

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PAULA FABIANA COSTA SOUZA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO EM DESGASTE A SECO DE AÇOS DE
RODA COM MICROESTRUTURA PERLÍTICA E BAINÍTICA**

JUIZ DE FORA

2016

PAULA FABIANA COSTA SOUZA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO EM DESGASTE A SECO DE AÇOS DE
RODA COM MICROESTRUTURA PERLÍTICA E BAINÍTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira Mecânica.

Orientador: DSc. Luiz Henrique Dias Alves

JUIZ DE FORA

2016

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Souza, Paula Fabiana Costa.

Avaliação do Comportamento em Desgaste a Seco de Aços de Roda com Microestrutura Perlítica e Bainítica / Paula Fabiana Costa Souza. -- 2016.

116 f. : il.

Orientador: Luiz Henrique Dias Alves

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2016.

1. Tribologia. 2. Tratamento Térmico. 3. Perlita. 4. Bainita. 5. Engenharia Ferroviária. I. Alves, Luiz Henrique Dias , orient. II. Título.

PAULA FABIANA COSTA SOUZA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO EM DESGASTE A SECO DE AÇOS DE
RODA COM MICROESTRUTURA PERLÍTICA E BAINÍTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em 05 de dezembro de 2016.

BANCA EXAMINADORA

DSc. Luiz Henrique Dias Alves (Orientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora

DSc. Moisés Luiz Lagares Júnior
Universidade Federal de Juiz de Fora

DSc. Carlos Renato Pagotto
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida. Sempre presente nas horas difíceis ao longo de minha trajetória, me colocando em seus braços e serenando meu coração.

A minha incomparável mãe, por sua irrestrita dedicação, por seu amor incondicional e por ser um exemplo de vida. Te amarei para todo o sempre.

A minha tia Dora, por seu delicado carinho, preocupação e por sempre demonstrar ser a minha segunda mãe. Sempre estará presente em minha vida.

Aos meus padrinhos, Célia e Elmo, por sempre demonstrar um contagiante afeto, uma honrosa preocupação e principalmente um acalentador amor. Para sempre os levarei em meu coração.

A minha irmã, Isabela, pelo suporte de tantas horas, pelos atos de afeição e pelas demonstrações de carinho, união e amor. Obrigada por ser única em minha vida.

Aos meus tios, Mônica, Simone e Paulo, pelo apoio irrestrito, pelas palavras atenciosas e pelos pequenos gestos de carinho e afeto.

A meus professores da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora pelo esforço e dedicação na arte de ensinar.

Em especial ao professor Luiz Alves, tanto por me proporcionar a oportunidade de participar de interessantes projetos de Engenharia Mecânica, quanto por sua preocupação e empenho com os alunos. Você é o meu mentor.

Ao meu namorado, Antuan, por toda paciência e dedicação. Por sempre estar presente em minha vida. Você foi o meu melhor presente. Te amo!

RESUMO

O estudo desenvolvido sobre as forças, tensões e comportamentos envolvidos no contato entre os componentes de vagões (roda ferroviária) e da via permanente (trilhos) é fundamental tanto para o avanço de novos materiais e tecnologias, quanto para a minimização de gastos de empresas de transporte ferroviário, pois se trata de manutenção corretiva, setor este onde há maior custo com manutenção. Assim a otimização do setor ferroviário, através da minimização de custos se torna fundamental.

Foram realizados estudos sobre o contato comparativo entre dois materiais de roda ferroviária, avaliando o atrito, desgaste a seco e comportamentos de microestruturas perlítica e bainítica.

As microestruturas estudadas apresentaram comportamentos bem distintos entre si, evidenciando o melhor desempenho da perlita se comparada com a bainita para a mesma dureza, ratificando a literatura. A perlita apresentou maior estabilidade em temperaturas elevadas do que a bainita. As amostras bainíticas apontaram taxas de desgaste sempre maiores do que as amostras perlíticas.

Palavras-chave: Tribologia, Bainita e Perlita

ABSTRACT

The study of the forces, tensions and behaviors involved in the contact between the railcar components (rail wheel) and the permanent way (rails) is fundamental both for the advancement of new materials and technologies, and the minimization of costs of railway companies, for it is about corrective maintenance, the sector with the highest cost of maintenance. Thus, the maintenance of the railway sector, through the minimization of costs, becomes fundamental.

Comparative studies were conducted on the contact between railway wheel materials, evaluating the friction, dry sliding wear, and behavior of pearlitic and bainitic microstructures.

The studied microstructures present very distinct behaviors between each other, evidencing the better performance of pearlite when compared to bainite for the same hardness, confirming the literature. Pearlite presented better stability at elevated temperatures than bainite. The bainitic samples showed higher wear rates than the pearlitic samples in all measurements and tests.

Keywords: Tribology, bainite, pearlite

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema das quatro formas de desgaste	16
Figura 2: Metodologia de Pesquisa	18
Figura 3: Visão geral do tribômetro	19
Figura 4: Transporte de um colosso egípcio a cerca de 1900 a.C.	22
Figura 5: Esquema de um tribossistema genérico	23
Figura 6: Desenho esquemático do tribossistema roda-trilho-sapata de freio.....	24
Figura 7: Experimento para determinação da força de atrito	25
Figura 8: Visão esquemática de uma interface entre duas superfícies	26
Figura 9: Representação simplificada do princípio do Modelo de Coulomb	27
Figura 10: Forças concorrentes em uma junção unitária.....	28
Figura 11: Contato em um pico de aspereza superficial.....	29
Figura 12: Perfil de uma placa deslizando sobre um fluido	30
Figura 13: Relação de Thruston.....	31
Figura 14: Contato e transferência de partículas	34
Figura 15: Desenho esquemático da abrasão à dois e três corpos	38
Figura 16: Modelo simplificado para o desgaste abrasivo	38
Figura 17: Exemplo mostrando o fluxo de calor em uma aspereza na superfície de aço submetido a atrito	42
Figura 18: Forma típica de uma cavidade (pit) mostrando a inclinação em relação à superfície e a forma de leque.....	44
Figura 19: Local de retirada de corpo-de-prova para ensaio de tração	48
Figura 20: Perfil padrão de uma roda ferroviária	50
Figura 21: Representação das curvas de aquecimento e resfriamento contínuo de normalização de um aço carbono hipoeutetóide	55
Figura 22: Faixas de temperatura usuais de alguns tratamentos térmicos de aços.....	56
Figura 23: Microestrutura de um aço 1045 (0,45 C) antes e depois da normalização	57
Figura 24: Comparação entre as curvas de resfriamento contínuo de um aço-carbono eutetóide	57
Figura 25: Microestrutura de aço temperado em óleo demonstrando ferrita em branco e a martensita (agulhas escuras	59

Figura 26: Microestrutura de aço duro temperado em água demonstrando as agulhas escuras de martensita em um fundo de austenita retida, que não se transformou durante o resfriamento brusco, em branco.....	59
Figura 27: Temperabilidade de vários tipos de aços com 0,4% de carbono	60
Figura 28: Ilustração do corpo de prova para ensaios de temperabilidade Jominy	61
Figura 29: Curva de resfriamento da austêmpera de um aço com alto teor de carbono.....	63
Figura 30: Curva de resfriamento da martêmpera de um aço com alto teor de carbono.....	64
Figura 31: Comportamento da dureza e da resistência ao choque (obtida em ensaio Charpy) em função da temperatura de revenimento para um aço 1045 temperado	66
Figura 32: Microestrutura de um aço temperado (à esquerda) e temperado revenido (à direita)	67
Figura 33: Esquema da elipse de contato e distribuição de pressão na região entre a roda e o trilho	69
Figura 34: Esquema para definição das variáveis geométricas dos corpos 1 e 2	69
Figura 35: Contato roda-trilho. (a) vista lateral e (b) vista longitudinal.....	72
Figura 36: Efeito cunha e efeito de filme espremido.....	81
Figura 37: Desenho esquemático de uma seção de roda CK36, destacando as dimensões e o local de retirada das amostras (100 x 140 x 15) mm	84
Figura 38: Foto da serra de fita utilizada para os cortes na roda	85
Figura 39: Foto do corpo de prova	86
Figura 40: Desenho esquemático do ciclo de tratamento térmico.....	87
Figura 41: Microestrutura bainítica	88
Figura 42: Fotomicrografia da amostra perlítica 1 com aumento de 100 vezes.....	89
Figura 43: Fotomicrografia da amostra perlítica 1 com aumento de 200 vezes.....	89
Figura 44: Fotomicrografia da amostra perlítica 1 com aumento de 500 vezes.....	90
Figura 45: Fotomicrografia da amostra perlítica 1 com aumento de 1000 vezes.....	90
Figura 46: Fotomicrografia da amostra perlítica 2 com aumento de 100 vezes.....	91
Figura 47: Fotomicrografia da amostra perlítica 2 com aumento de 200 vezes.....	91
Figura 48: Fotomicrografia da amostra perlítica 2 com aumento de 500 vezes.....	92
Figura 49: Fotomicrografia da amostra perlítica 2 com aumento de 1000 vezes.....	92
Figura 50: Fotomicrografia da amostra bainítica 1 com aumento de 100 vezes	93
Figura 51: Fotomicrografia da amostra bainítica 1 com aumento de 200 vezes	93
Figura 52: Fotomicrografia da amostra bainítica 1 com aumento de 500 vezes	94
Figura 53: Fotomicrografia da amostra bainítica 1 com aumento de 1000 vezes	94

Figura 54: Fotomicrografia da amostra bainítica 2 com aumento de 100 vezes	95
Figura 55: Fotomicrografia da amostra bainítica 2 com aumento de 200 vezes	95
Figura 56: Fotomicrografia da amostra bainítica 2 com aumento de 500 vezes	96
Figura 57: Fotomicrografia da amostra bainítica 2 com aumento de 1000 vezes	96
Figura 58: Fotos do durômetro Equilam EQTSM utilizado. (a) Vista geral; (b) Carga selecionada de 150kgf	98
Figura 59: Sistema de fixação dos corpos de prova no tribômetro	101
Figura 60: Especificações do tribômetro: (a) Braço com o pino para apoio da carga; (b) Aplicação da carga.....	101
Figura 61: Sistema de aferição da carga para realização de ensaios no tribômetro	102
Figura 62: Realização do ensaio de desgaste	103
Figura 63: Gráfico Carga (N) versus Taxa de Desgaste (g.h/m) da amostra perlítica 1	105
Figura 64: Gráfico Carga (N) versus Taxa de Desgaste (g.h/m) da amostra perlítica 2	106
Figura 65: Gráfico Carga (N) versus Taxa de Desgaste (g.h/m) da amostra bainítica 1	107
Figura 66: Gráfico Carga (N) versus Taxa de Desgaste (g.h/m) da amostra bainítica 1	108
Figura 67: Gráfico Carga (N) versus Taxa de Desgaste (g.h/m) das amostras	109
Figura 68: Fotomicrografias de corpo de prova perlítico. (a) aumento de 100x. (b) aumento de 1000x.	112
Figura 69: Fotomicrografias de corpo de prova bainítico. (a) aumento de 100x. (b) aumento de 1000x.	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Constante de desgaste por abrasão	40
Tabela 2: Composição química e recomendações para uso segundo AAR M-107/M-208.....	47
Tabela 3: Composição química conforme norma UIC para rodas	47
Tabela 4: Propriedades mecânicas de aços de roda ensaiados conforme ASTM A 370 - 94 a partir de corpos-de-prova retirados da pista de rolamento da roda, para aços fundidos classe B e C.....	48
Tabela 5: Dimensões típicas de rodas ferroviárias de maior utilização e as respectivas cargas máximas aplicadas, conforme AAR M 208 (Dimensões nominais - mm).....	51
Tabela 6: Coeficientes K_a e K_b em função de φ	74
Tabela 7: Coeficiente de atrito estático a temperatura ambiente.....	78
Tabela 8: Coeficiente de atrito em rodas e trilhos de trem.....	80
Tabela 9: Coeficiente de atrito entre sapatas de freio e rodas	80
Tabela 10: Relação entre coeficientes de atrito e velocidade.....	80
Tabela 11: Composição química das microestruturas via Espectrômetro de Emissão Óptica Marca ARL, modelo 3460 - ASTM E415	85
Tabela 12: Resultados do Ensaio de Dureza realizados após o tratamento térmico de austêmpera.....	98
Tabela 13: Resultados do Ensaio de Dureza realizados após o tratamento térmico de revenimento	99
Tabela 14: Resultados do Ensaio de Dureza realizados no contra-corpo (disco).....	100
Tabela 15: Dados sobre o ensaio de desgaste na Amostra 1 de Perlita.....	105
Tabela 16: Dados sobre o ensaio de desgaste na Amostra 2 de Perlita.....	106
Tabela 17: Dados sobre o ensaio de desgaste na Amostra 1 de Bainita.....	107
Tabela 18: Dados sobre o ensaio de desgaste na Amostra 2 de Bainita.....	108
Tabela 19: Ângulos de cada trecho das curvas Carga (N) versus Taxa de Desgaste (g.h/m) das amostras.....	110
Tabela 20: Relação entre as Taxas de desgaste para o carregamento de 5,5N.....	111
Tabela 21: Relação entre as Taxas de desgaste para o carregamento de 11N.....	111
Tabela 22: Relação entre as Taxas de desgaste para o carregamento de 25,4N.....	111

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

μ	Coefficiente de atrito
θ	Ângulo de atrito
ASTM	American Society for Testing and Materials
Curva TTT	Curva Tempo x Temperatura x Transformação
F	Força aplicada
f_a	Força de atrito
H	Dureza do material
K	Coefficiente de desgaste dimensional
N	Força normal
Q	Taxa de desgaste
rpm	Rotação por minuto
a.C.	Antes de Cristo
Aa	Área de contato aparente
Ar	Área real de contato
Et	Energia total do processo
ΔE_c	Varição da energia cinética
Ea	Energia dissipada pelo atrito
Ep	Varição da energia potencial
Pe	Pressão de escoamento
L	Carregamento na direção normal
τ_e	Tensão cisalhante
σ_e	Tensão de escoamento uniaxial
d	Diâmetro da junção
Nj	Número total de junções
ΔV	Volume das partículas
ΔL_e	Distância de escorregamento
AAR	Association of American Railroads
UIC	Union International Railways
BHN	Brinell Hardness Number
HRC	Dureza Rockwell Classe C

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
1.2. JUSTIFICATIVA	17
1.3. ESCOPO	17
1.4. OBJETIVO	18
1.5. METODOLOGIA	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1. TRIBOLOGIA	21
2.1.1. INTRODUÇÃO	21
2.1.2. FENÔMENOS TRIBOLÓGICOS	24
2.1.2.1. ATRITO	24
2.1.2.2. LUBRIFICAÇÃO	30
2.1.2.3. DESGASTE	32
2.2. MATERIAIS PARA RODA-TRILHO	46
2.2.1. APRESENTAÇÃO	46
2.2.2. DIMENSÕES	49
2.3. TRATAMENTO TÉRMICO	51
2.3.1. HISTÓRICO	51
2.3.2. DEFINIÇÃO	53
2.3.3. TRATAMENTOS COM RESFRIAMENTO CONTÍNUO	54
2.3.3.1. NORMALIZAÇÃO	54
2.3.3.2. TÊMPERA	58
2.3.4. TRATAMENTOS ISOTÉRMICOS	62
2.3.4.1. AUSTÊMPERA	62
2.3.4.2. MARTÊMPERA	63
2.3.5. REVENIMENTO	64
2.4. ÁREA DE CONTATO	67
2.4.1. SECO	67
2.4.1.1. TEORIA DE HERTZ	67
2.4.1.2. CONTATO ELÍPTICO DE HERTZ	68
2.4.1.3. CONTATO RODA-TRILHO	72
2.4.1.4. COEFICIENTES DE ATRITO	77
2.4.2. LUBRIFICADO	81
2.4.2.1. INTRODUÇÃO	81
2.4.2.2. A EQUAÇÃO DE REYNOLDS	81
2.4.2.3. DESGASTE NA CONDIÇÃO LUBRIFICADA	82
2.5. CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	83
3. MATERIAIS E MÉTODOS	84
3.1. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	84
3.2. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO	86
3.2.1. TRATAMENTO TÉRMICO - AUSTÊMPERA	86

3.2.2.	ENSAIO DE DUREZA APÓS AUSTÊMPERA	97
3.2.3.	TRATAMENTO TÉRMICO - REVENIMENTO.....	99
3.2.4.	ENSAIO DE DUREZA APÓS O REVENIMENTO	99
3.2.5.	ENSAIO DE DUREZA - CONTRA CORPO (DISCO).....	100
3.2.6.	ENSAIO DE DESGASTE.....	100

4. RESULTADOS.....104

4.1. RESULTADOS ALCANÇADOS.....104

4.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS109

4.2.1. COMPORTAMENTO DE CURVAS

4.2.2. PROPORÇÃO ENTRE TAXAS DE DESGASTE

4.2.3. ANÁLISE MICROGRÁFICA APÓS ENSAIO DE DESGASTE

5. CONCLUSÃO114

REFERÊNCIAS115

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Independente da cadeia de produção, a logística, ou seja, o provimento de recursos, equipamentos e informações para execução de uma atividade empresarial, desempenha papel fundamental no que tange a competitividade entre empresas. Dessa forma, a minimização de custos é assunto prioritário, com o intuito de garantir não somente a manutenção de seu faturamento, mas também a ampliação dos negócios da empresa no setor pertencente.

O setor de transporte ferroviário não é exceção sobre o dito acima, sendo pioneiro em diversas pesquisas com o objetivo de redução de custos, sobretudo os custos com manutenção corretiva. De acordo com Alves (2000), existem três principais formas de redução de custos no setor, são eles: i. Aumento da carga transportada por eixo; ii. Aumento da carga transportada por trem; e iii. Aumento da velocidade no trajeto.

Normalmente, se verifica um aumento dos três pontos citados (i., ii. e iii.). Por um lado, nota-se o aumento da capacidade de transporte de cargas e aumento da velocidade, por outro, aumenta-se também os custos com manutenção corretiva, uma vez que aceleram as falhas nos componentes dos vagões e via permanente. O sistema roda-trilho ou roda-trilho-sapata de freio é sensivelmente afetado por esses aumentos de esforços. Assim como os trilhos na via permanente, as rodas representam o maior custo na manutenção do material rodante e a principal causa de retenção de vagões para manutenção corretiva. No caso das ferrovias, o contato roda-trilho responde praticamente por 50% dos custos de manutenção (ALVES, 2000).

Neste cenário, torna-se oportuno o desenvolvimento de pesquisas sobre os sistemas roda-trilho ou roda-trilho-sapata de freio. A fim de embasar tecnicamente a interação entre os componentes da via permanente e do vagão, torna-se necessário o estudo e o aprofundamento teórico sobre tribologia.

A Tribologia é definida como a ciência que estuda o movimento entre superfícies sólidas quando em interação, incorporando o estudo da fricção, lubrificação e desgaste. Uma das

principais vertentes de estudo da Tribologia é o desgaste. Tradicionalmente são aceitos quatro formas de desgaste, de acordo com a Figura 1:

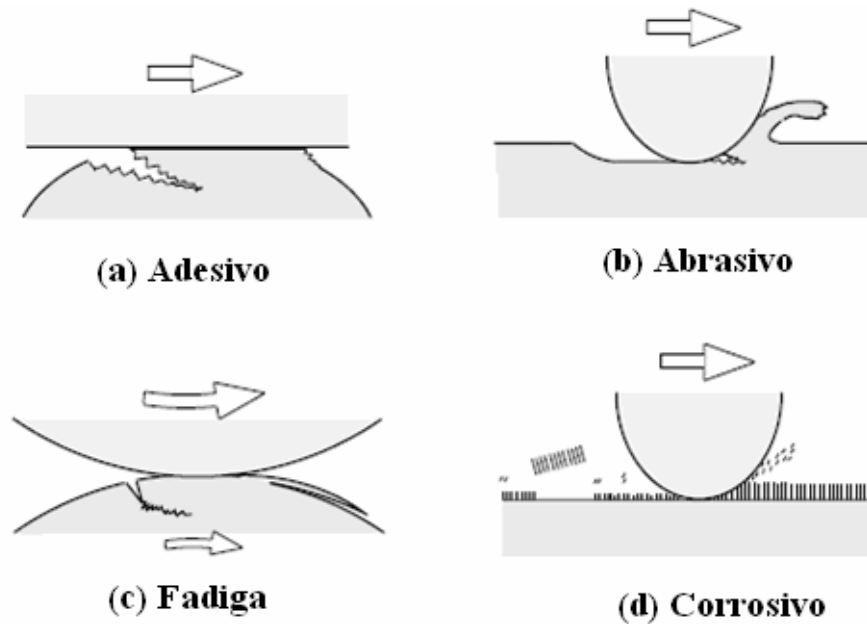


Figura 1: Esquema das quatro formas de desgaste

Fonte: Kato, 2001 apud Radi, 2007 et al

O desgaste adesivo ocorre quando a ligação adesiva entre as superfícies é suficientemente forte para resistir ao deslizamento. Como resultado dessa adesão, uma deformação plástica é causada na região de contato gerando uma trinca que pode se propagar levando à geração de um terceiro corpo e a uma transferência completa de material. No desgaste abrasivo ocorre remoção de material da superfície. Esse desgaste ocorre em função do formato e da dureza dos dois materiais em contato. Quando o desgaste é ocasionado pelo alto número de repetições do movimento ele é chamado de desgaste por fadiga. Finalmente, o desgaste corrosivo ocorre em meios corrosivos, líquidos ou gasosos. Neste tipo de desgaste são formados produtos de reação devido às interações químicas e eletroquímicas. Essas reações são conhecidas como reações tribo químicas e produzem uma intercamada na superfície que depois é removida (RADI, 2007).

O tratamento térmico trata-se de um conjunto de operações controladas envolvendo aquecimento, tempo de permanência da estrutura em temperaturas específicas e resfriamento, caracterizando-se pelo beneficiamento de materiais metálicos com o objetivo de alterar a microestrutura e por conseguinte as suas propriedades mecânicas.

De acordo com Assunção (1988), quando o tratamento térmico modifica intencionalmente a composição química da região superficial da peça de aço é denominado tratamento termoquímico. Caso contrário, é denominado tratamento termo físico ou simplesmente tratamento térmico.

Os principais tratamentos térmicos aplicados aos aços são: recozimento, normalização, beneficiamento (têmpera e revenimento), cementação (carbonetação), nitretação, cianetação e carbonitretação.

Dentre os tratamentos térmicos acima citados, a cementação, a nitretação, a cianetação e a carbonitretação são tratamentos termoquímicos.

1.2. JUSTIFICATIVA

O trabalho avalia o comportamento em desgaste a seco de aços de roda com microestrutura perlítica e bainítica. Do ponto de vista acadêmico, o trabalho é muito relevante pois aborda o comportamento em desgaste de aços de mesma composição química, mas com diferentes microestruturas, por meio de ensaios de desgaste. Seus resultados poderão ajudar a clarificar dúvidas existentes na literatura sobre qual microestrutura tem melhor comportamento. Isso é de grande importância para a Engenharia Mecânica, especialmente a relacionada com a atividade de manutenção corretiva das rodas de vagões ferroviários, sendo este a maior causa de retenção de vagões nos pátios das empresas do setor ferroviário brasileiro.

1.3. ESCOPO

O escopo do trabalho tem como fundamentação a experimentação de diferentes microestruturas para roda, através da utilização de um tribômetro, tipo rolo contra disco, onde o corpo ou rolo será o material da roda e o contra corpo ou disco o material do trilho, empregado atualmente nas ferrovias da Vale. Esta máquina de ensaio de desgaste foi desenvolvida na Universidade Federal de Juiz de Fora, e permite avaliar o desempenho, as características e comparando-as a fim de obter a mais adequada, tendo em vista fatores econômicos, sociais, durabilidade, possíveis influências em outros componentes, etc.

O ensaio de desgaste foi realizado de modo a seco, sem qualquer uso de líquido ou material lubrificante.

1.4. OBJETIVO

O trabalho proposto, desenvolvido no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora, visa descrever, estudar e comparar duas microestruturas de aços para rodas de vagões, quando em contato com outras superfícies, de maneira a simular o trilho da via permanente. Ao longo do trabalho, será realizado um estudo de caracterização (propriedades físicas e mecânicas e composições químicas) das microestruturas de aços empregados, bem como a definição dos mecanismos de desgastes atuantes no tribossistema roda-trilho (ou roda-trilho-sapata de freio) que influenciam diretamente no desgaste da pista de rolamento da roda.

1.5. METODOLOGIA

A metodologia de um trabalho acadêmico torna-se elementar, pois a partir dele inicia-se uma base teórico-científica de maneira a proporcionar o desenvolvimento dos assuntos abordados ao longo da pesquisa.

A Figura 2, baseada na proposta de Miguel (2010), mostra a categorização quanto à natureza, objetivo e abordagem da pesquisa que será realizada:

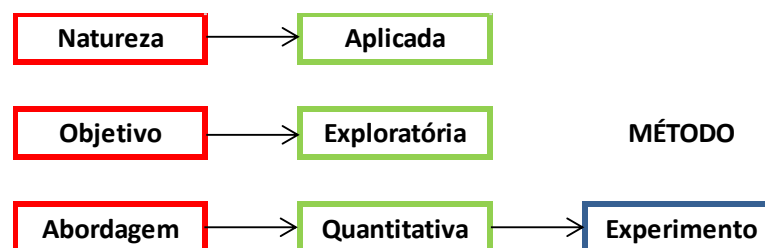


Figura 2: Metodologia de Pesquisa

Fonte: Miguel, 2010 (Adaptado)

A pesquisa é caracterizada por sua natureza aplicada, pois o resultado que será obtido pode ser aplicado diretamente no mercado ferroviário. Possui objetivo de pesquisa exploratório, de forma a analisar, estudar e comparar diferentes tipos de materiais para roda de vagão. Tem abordagem quantitativa com metodologia experimental.

O tratamento térmico utilizado para transformar a microestrutura perlítica em bainítica foi a austêmpera, usualmente empregado quando se objetiva melhorar as propriedades mecânicas do aço, principalmente a ductilidade e a tenacidade. Resulta na diminuição da possibilidade de trincas e empenamentos e na melhora a resistência ao desgaste.

O experimento foi realizado através da utilização de uma máquina de ensaio de desgaste ou tribômetro, possibilitando a simulação do desgaste de uma roda de trem no conjunto rolo contra disco no equipamento.

O tribômetro é um equipamento versátil para medição de propriedades de atrito e desgaste de combinações de materiais e lubrificantes sob condições específicas de carga, velocidade, temperatura e atmosfera. A caracterização tribológica envolve estudos sobre as reais condições de uso do material assim como os estudos sobre o coeficiente de atrito, taxa de desgaste e durabilidade do filme. Estes estudos podem ser aplicados em diversas áreas tais como automotiva, aeroespacial, eletrônica, biomédica e ótica (RADI, 2007).

A Figura 3 mostra o tribômetro a ser utilizado:



Figura 3: Visão geral do tribômetro

Fonte: Alves, 2013(Adaptado)

De acordo com a Figura 3, temos a seguinte legenda:

1. Apoio do pirômetro;
2. Rolo;
3. Disco;
4. Base fundida;
5. Polia;
6. Motor.

O tribômetro mostrado na Figura 3, possui um motor trifásico com 1360 rpm com transmissão mecânica conectadas por meio de polias. Esta energia é transferida ao disco, e concomitantemente é aplicada uma carga no rolo de forma a comprimi-lo contra o disco, simulando o contato entre a roda do vagão e o trilho, podendo o primeiro escorregar. O corpo ou rolo (roda) e o contra corpo ou disco (trilho) se mantêm em movimento. Este tipo de tribômetro normalmente é empregado para experimentos em pequena escala e com cargas reduzidas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. TRIBOLOGIA

2.1.1. INTRODUÇÃO

A palavra tribologia é derivada das palavras grega TRIBOS que significa atrito, e LOGOS que significa estudo, de forma que uma tradução literal significa 'Estudo do Atrito', ou a ciência que estuda o Atrito. Tribologia é definida como “A ciência e a tecnologia da interação entre superfícies com movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionadas”. A palavra tribologia, em sua atual conotação, surgiu pela primeira vez na Inglaterra, em 1966, em um relatório do Departamento de Educação e Ciência. Embora a palavra seja nova, o assunto a que e refere não o é, incluindo os tópicos relativos ao atrito, desgaste e lubrificação (STOETERAL, 2004).

De acordo com Stoeterau (2004), a invenção da roda pelo homem constituiu-se em um dos primeiros dispositivos tribológicos criados, mas o atrito afetou o desenvolvimento da civilização de várias formas. É conhecido o uso de brocas durante o período paleolítico, que eram apoiadas em mancais feitos de chifres ou ossos e serviam para fazer furos e produzir fogo. É possível supor que o desenvolvimento dos primeiros mancais progrediu a partir do momento em que o homem começou a empregar o movimento rotativo. As rodas de oleiro, utilizadas em 2.000 a.C. empregavam mancais de pedra polida.

O mais antigo registro do uso de rodas em veículos provem de tábuas da Suméria, na antiga Babilônia, e datam de 3.500 A.C.. Os lubrificantes foram, também, empregados neste período, o que foi constatado pela abertura de tumbas do Egito antigo. Uma carruagem lá encontrada continha lubrificante animal, possivelmente sebo de boi ou de carneiro nos mancais das rodas. A aplicação de princípios tribológicos na redução do atrito em movimentos lineares pode ser constatada, também, no antigo Egito. Ilustrações na forma de baixo relevo mostram o uso de rolos e pranchas para transportar figuras colossais. A Figura 4 mostra um exemplo desse tipo de transporte: 172 escravos são empregados para puxar uma grande estátua pesando cerca de 60 ton. O desenho mostra um homem sobre o trenó colocando um líquido na sua frente. Possivelmente um dos primeiros preocupados com a lubrificação. A Figura 4 mostra também, homens carregando pranchas planas e jarros contendo, possivelmente lubrificante.

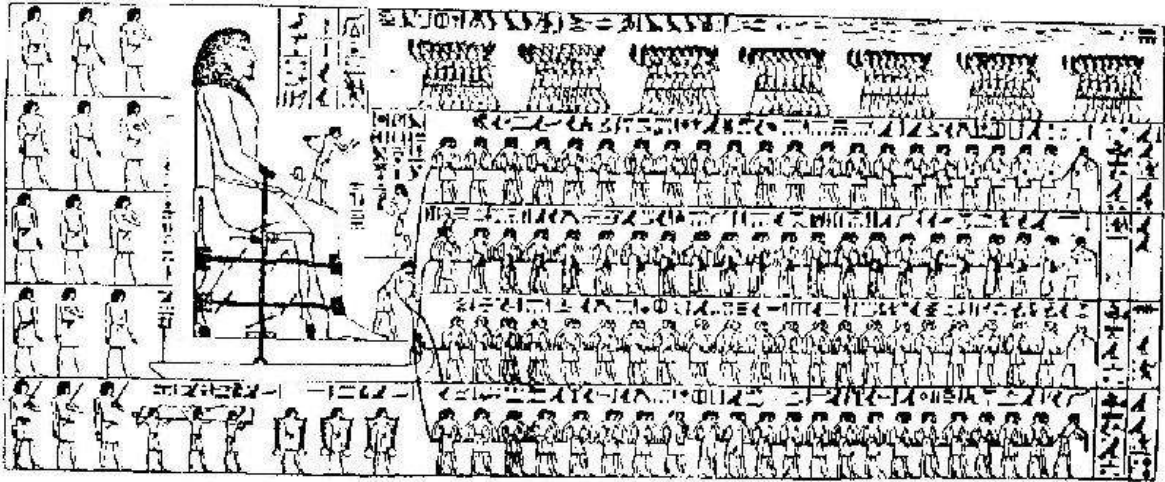


Figura 4: Transporte de um colosso egípcio a cerca de 1900 a.C.

Fonte: Halling, 1993 apud Stoeterau, 2004

Na época de Leonardo da Vinci (1452 – 1519), o qual foi o primeiro cientista a enunciar que a força de atrito é proporcional à carga e independente da área de contato. Alguns séculos após, Coulomb confirmou as leis de atrito e estabeleceu a sua terceira lei, na qual é enunciada que a força de atrito é independente da velocidade.

Stoeterau (2004) relata que, embora as leis essenciais do fluxo viscoso tivessem sido postuladas por Newton em data anterior, a compreensão científica da operação de mancais lubrificados não ocorreu antes do fim do século XIX. Realmente, nossos entendimentos sobre os princípios da lubrificação hidrodinâmica datam de 1883 e são devidos aos estudos experimentais de Beauchamp Tower. Seguindo os trabalhos de Tower, os princípios da lubrificação com filme fluido foram formulados por Osborne Reynolds em um extraordinário trabalho científico publicado em 1886. Aplicando os princípios hidrodinâmicos do escoamento laminar a uma geometria representativa da folga entre superfícies de um mancal radial, Reynolds mostrou que o movimento da superfície do eixo poderia gerar campos de pressão na película de óleo capazes de suportarem cargas consideráveis. Esse importante conceito é conhecido como efeito cunha do lubrificante.

Ainda de acordo com Stoeterau (2004), desde o início do século XX, impulsionados pela demanda industrial, nosso conhecimento em todas as áreas da tribologia expandiu-se enormemente. Neste contexto, os mancais de elementos rolantes baseados em esferas que surgido em aplicações industriais por volta de 1700, alcançaram uma eficiência incomum.

Eles são encontrados em uma ampla gama de tamanhos e oferecem, atualmente, uma solução muito econômica e flexível para muitos problemas de projeto tribológicos.

Dessa forma, podemos representar os problemas e situações que envolvem os tribossistemas de acordo com o ilustrado na Figura 5:

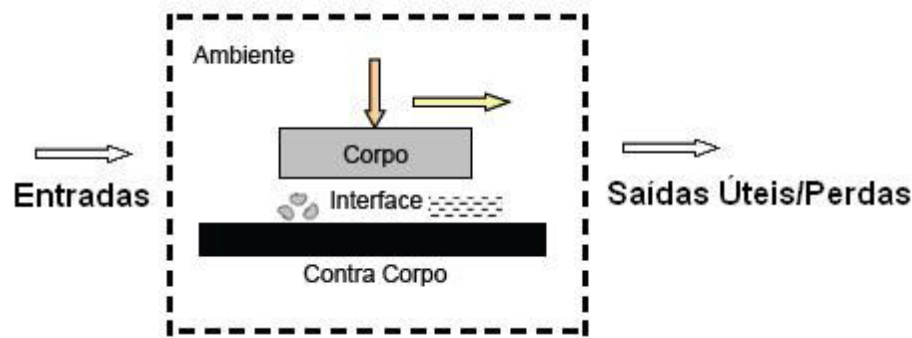


Figura 5: Esquema de um tribossistema genérico

Fonte: Alves, 2015

A tribologia apresenta diferentes interesses nas diversas áreas do conhecimento tecnológico, com uma série de disciplinas científicas se ocupando de problemas tribológicos, tais como:

- a ciência dos materiais, com o desenvolvimento de materiais tribológicos especiais;
- a química, com o estudo de lubrificantes, aditivos e problemas de camada limite;
- a física, com estudos de novos materiais e processos de revestimentos, e estudo atrito no nível atômico / quântico;
- a fabricação, com estudo da qualidade de superficial proveniente da fabricação e suas relações com a tribologia;
- a metrologia, com a qualificação superfícies tribológicas e a automação de sistemas;
- o projeto, com a aplicação de superfícies tribológicas;
- a automação, com o estudo da influência do atrito em sistemas de controle; entre outras.

Aplicando o raciocínio abordado para o setor ferroviário, temos:

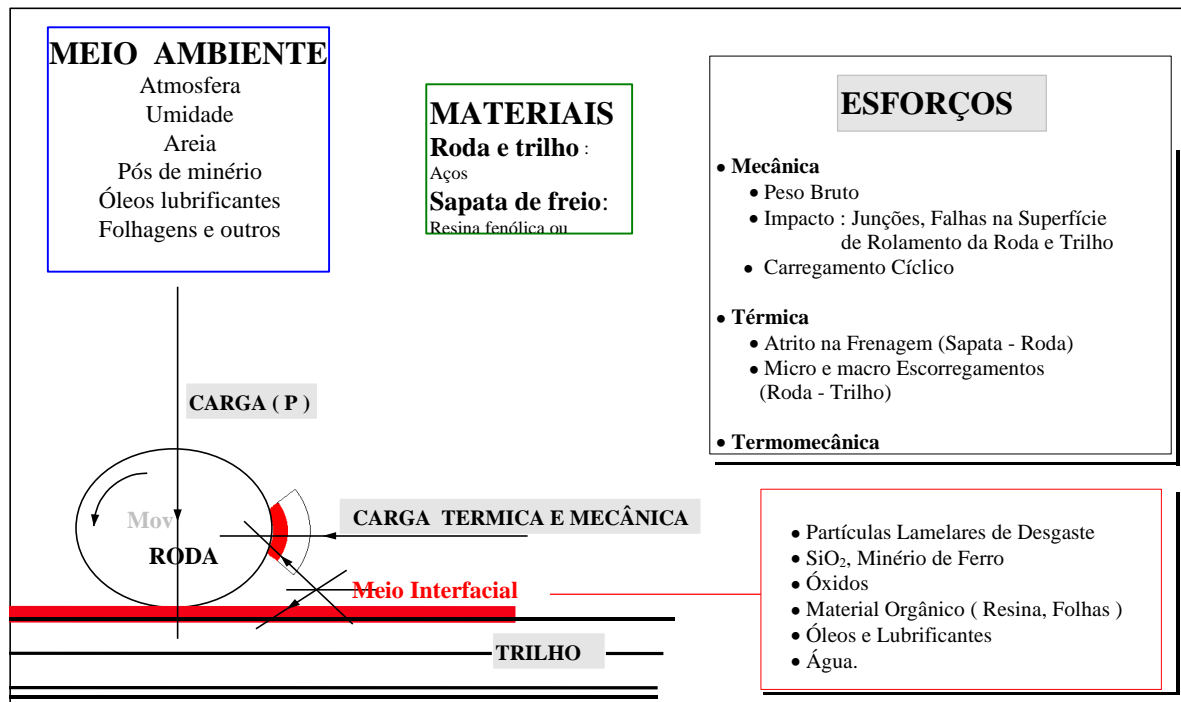


Figura 6: Desenho esquemático do tribossistema roda-trilho-sapata de freio

Fonte: Alves, 2000

2.1.2. FENÔMENOS TRIBOLÓGICOS

2.1.2.1. ATRITO

A. INTRODUÇÃO

A fim de entendermos o atrito, podemos esquematizar uma situação simples, onde um corpo A desliza sobre o corpo B, a partir da aplicação de uma força F. Dessa forma, a resistência ao movimento é chamada de força de atrito, como mostrado na Figura 7:

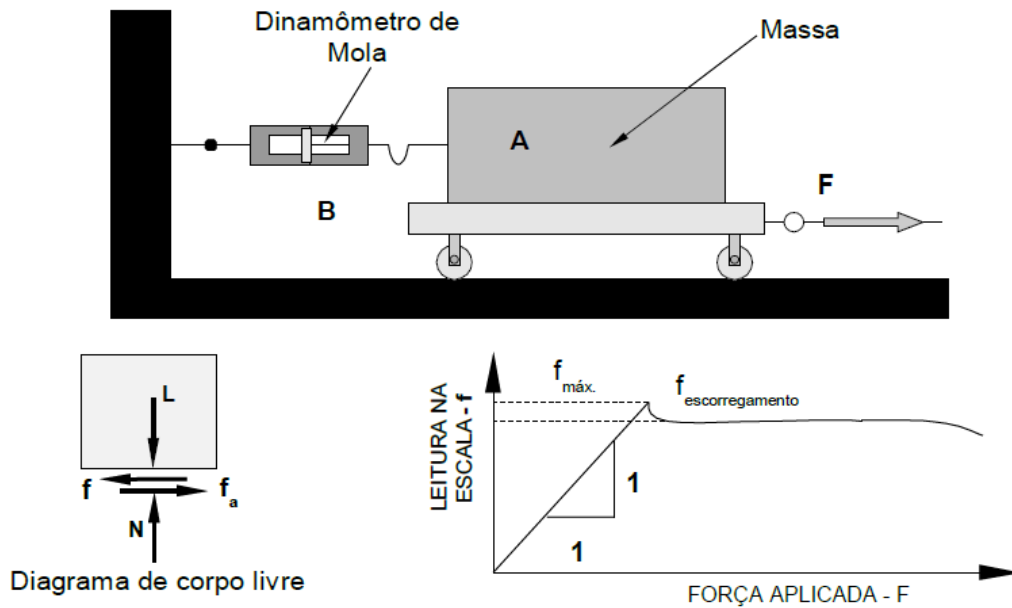


Figura 7: Experimento para determinação da força de atrito

Fonte: Stoeterau, 2004

Observa-se no gráfico da Figura 7 que, de acordo com o aumento da força F no corpo B, a leitura no dinamômetro de mola aumenta de forma proporcional, até o ponto em que há o escorregamento do corpo A. Uma vez iniciado o escorregamento entre os blocos, o valor de f sofre uma pequena queda, permanecendo constante e independente da força F , que atua sobre o corpo B (LEVINSON, 1968 apud STOETERAU, 2004).

B. ÁREA DE CONTATO REAL

De acordo com Stoeterau (2004), quando colocamos duas superfícies em contato, somente algumas regiões na sua superfície estarão em contato, ao passo que outras estarão afastadas. Nosso desejo é determinar quais átomos interagem fortemente com os átomos correspondentes da outra superfície, e quais não. É sabido que a distâncias muito pequenas forças atômicas muito fortes se estabelecem, em geral, distâncias na ordem de angstroms (10^{-10} m), o que representa o tamanho médio dos átomos. Assim é possível simplificar o problema assumindo que todas as interações ocorrem nestas regiões onde ocorre nos contatos atômicos. Estas regiões são denominadas de junções, e a soma das áreas destas junções constitui a área real de contato- A_r . A área de interferência total consiste da área real de contato e da área que aparenta estarem contato, mas não está, ou seja, é uma área de contato aparente – A_a .

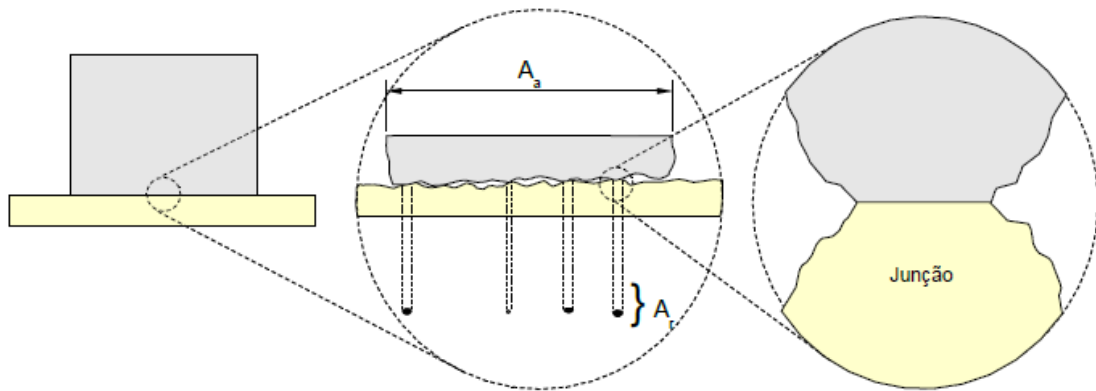


Figura 8: Visão esquemática de uma interface entre duas superfícies

Fonte: Stoeterau, 2004

C. TEORIAS DE ATRITO

Assim como já foi abordado, temos as seguintes leis sobre o atrito, são elas:

- ✓ A força de atrito é proporcional à força (ou carregamento) normal;
- ✓ A força de atrito é independente da velocidade de escorregamento;
- ✓ A força de atrito é independente da área de contato aparente.

i. Teoria de Amonton - Coulomb

Stoeterau (2004) relata que, Amonton e Coulomb determinaram que a principal contribuição à força de atrito surge da interação mecânica entre as deformações elásticas e rígidas das asperezas, estas considerações deram origem ao Modelo de Coulomb para atrito de escorregamento. A Figura 9 apresenta uma representação simplificada do princípio por trás do Modelo de Coulomb. Nesse modelo a ação dos picos das asperezas, representado sob a forma dentes de serra, forçam as superfícies a se separarem durante o escorregamento do ponto A para B.

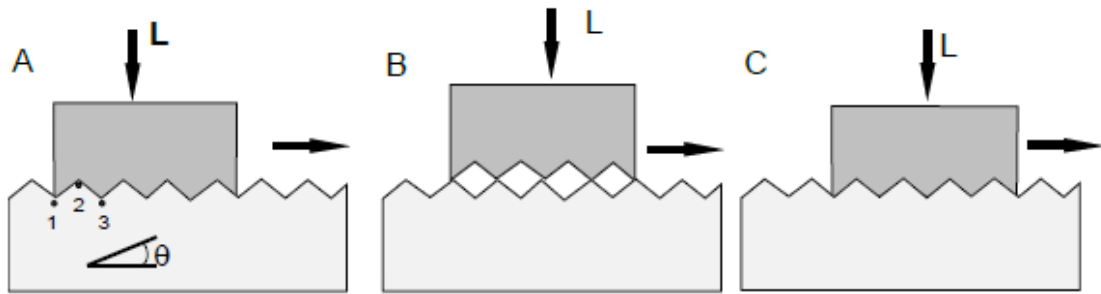


Figura 9: Representação simplificada do princípio do Modelo de Coulomb

Fonte: Stoeterau, 2004

O modelo de Coulomb para atrito falha quando se faz o balanço de energia entre dois pontos do movimento. Tomando os pontos 1 e 3 como sendo o deslocamento total do corpo, temos que a energia total do processo (E_t) equivale a variação da energia cinética (ΔE_c) menos a energia dissipada pelo atrito (E_a):

Equação 1

$$E_t = \Delta E_c - E_a$$

Neste caso a energia dissipada pelo atrito (E_a) equivale a variação da energia potencial (E_p) necessária para subir a aspereza da superfície inferior, que corresponde aos pontos 1 e 2 da Figura 9. Contudo essa energia é devolvida ao sistema durante o deslocamento entre os pontos 2 e 3, tendendo a anular-se com a energia armazenada durante a subida da superfície. Desta forma temos:

Equação 2

$$E_{t1,3} = \Delta E_c - (E_{p1,2} - E_{p2,3})$$

o que resulta em:

Equação 3

$$E_{t1,3} = \Delta E_c - 0$$

o que não corresponde a realidade, pois a equação 3 só tem validade se o atrito for desprezado.

ii. Teoria de Adesão

Stoeterau (2004) define: A colocação em contato de duas superfícies leva ao aparecimento da área real de contato (A_r), considerando que os pontos de contato, ou junções, que definem A_r apresentam deformações puramente elásticas.

Considerando as junções decorrentes do contato de duas superfícies, as quais definem a área real de contato (A_r), como apresentando deformações puramente elásticas, temos um estado tri-axial de tensões, conforme a Figura 10. Neste estado a máxima tensão de compressão que essa região de material pode suportar sem que ocorra escoamento plástico é conhecida como pressão de escoamento P_e , que é da ordem de três vezes a tensão de escoamento do material em compressão uniaxial (a pressão de escoamento P_e corresponde a dureza dos materiais). Nessas condições o valor real da área real de contato A_r é dado por:

Equação 4

$$A_r \gg \frac{L}{P_e}$$

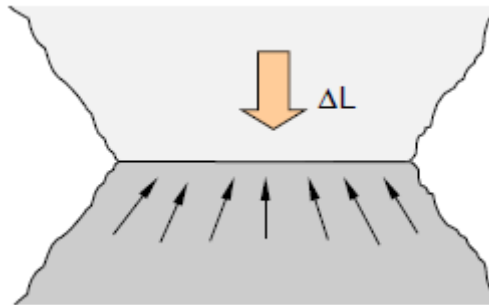


Figura 10: Forças concorrentes em uma junção unitária

Fonte: Stoeterau, 2004

A observação da Figura 10 leva a estabelecer uma analogia entre este tipo de contato e os ensaios de dureza, ou de micro dureza. Como a topografia das superfícies é caracterizada pela presença de picos e vales, estas superfícies quando pressionadas uma contra a outra, apresentam um comportamento semelhante ao de um ensaio de dureza, a menos de um fator de escala. Assim, ocorrerão deformações elásticas e plásticas em vários pontos de contato, os quais irão aumentar em número até o ponto onde esta deformação cessa. O que leva a área real de contato a atingir o valor:

Equação 5

$$A_r = \frac{L}{P_e}$$

A equação 5 não apresenta validade para casos onde as superfícies sejam muito lisas, ou seja, as asperezas são muito pequenas, pois não ocorrem deformações plásticas, somente elásticas nos pontos de junção e A_r é bem maior.

iii. Teoria de Adesão Simplificada

De acordo com Stoeterau (2004), esta simplificação da teoria de adesão é baseada nos trabalhos de Bowden e Tabor, estes consideram que quando superfícies metálicas são postas em contato, as junções ocorrem somente nos picos das asperezas. Esta consideração implica em que área real de contato é pequena, a pressão nas asperezas em contato é suficientemente elevada para causar deformação plástica. Essa deformação (escoamento) ocasiona um aumento na área de contato até que a área real de contato seja o suficiente para suportar a carga, Figura 11.

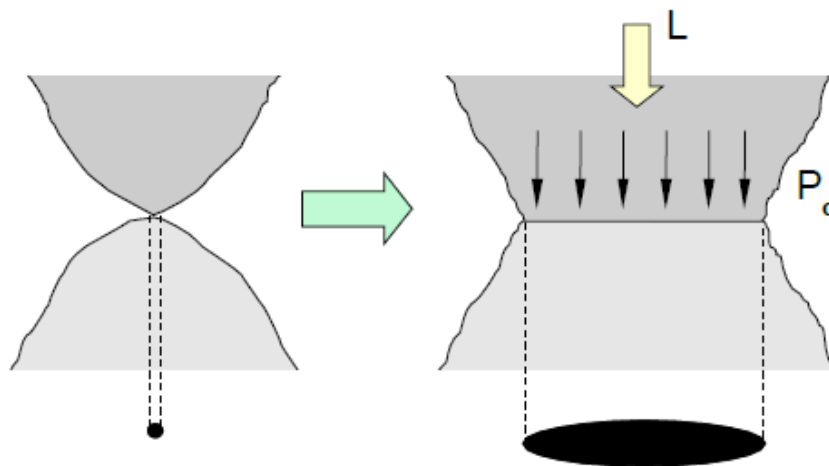


Figura 11: Contato em um pico de aspereza superficial

Fonte: Stoeterau, 2004

Equação 6

$$L = A_r \cdot P_e$$

onde:

A_r = área real de contato;

P_e = pressão de escoamento;

L = carregamento na direção normal.

Os picos sofrem deformação plástica até que as áreas de contato tenham crescido o suficiente para suportar a carga. Nas regiões de contato íntimo entre metais, Bowden e Tabor consideram que ocorre forte adesão, e que as junções tendem a sofrer um caldeamento (soldagem a frio). Se a tensão τ_e é a força por unidade de área de contato necessária ao cisalhamento da junção, ou seja, τ_e é a tensão cisalhante necessária para causar o escoamento e a fratura final, e F é a força de atrito, temos:

Equação 7

$$F = A_r \cdot \tau_e$$

Equação 8

$$F = L \cdot \frac{\tau e}{P e}$$

Equação 9

$$\mu = \frac{F}{L}$$

Equação 10

$$\mu = \frac{\tau e}{P e}$$

Desta forma a teoria simplificada fornece uma explicação às duas primeiras leis do atrito, ou seja, que o atrito independe da área aparente de contato e que a força de atrito é proporcional ao carregamento na direção normal.

2.1.2.2. LUBRIFICAÇÃO

A. INTRODUÇÃO

Historicamente os primeiros estudos científicos sobre atrito e lubrificação foram realizados por Leonardo Da Vinci no século XVI. No século seguinte (1687) Isaac Newton introduz o conceito de viscosidade (1687).

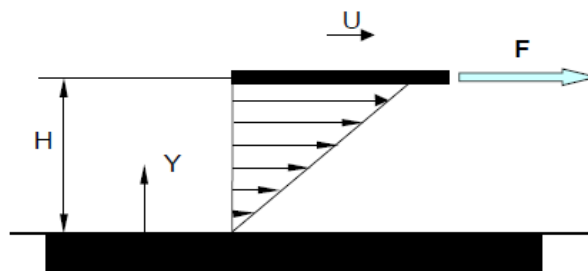


Figura 12: Perfil de uma placa deslizando sobre um fluido

Fonte: Stoeterau, 2004

Equação 11

$$F = t \cdot A$$

onde,

Equação 12

$$t = m \frac{\delta u}{\delta y}$$

Equação 13

$$t = m \frac{U}{H}$$

No mesmo período Thruston (1879) determina a relação entre o coeficiente de atrito viscoso e carga, concluindo que o coeficiente de atrito viscoso depende da velocidade, indo de encontro à terceira lei do atrito, postulada por Coulomb. A terceira lei do atrito afirma que o atrito entre duas superfícies sólidas, sofrendo escorregamento, independe da velocidade, exceto para velocidades extremamente altas (STOETERAU, 2004).

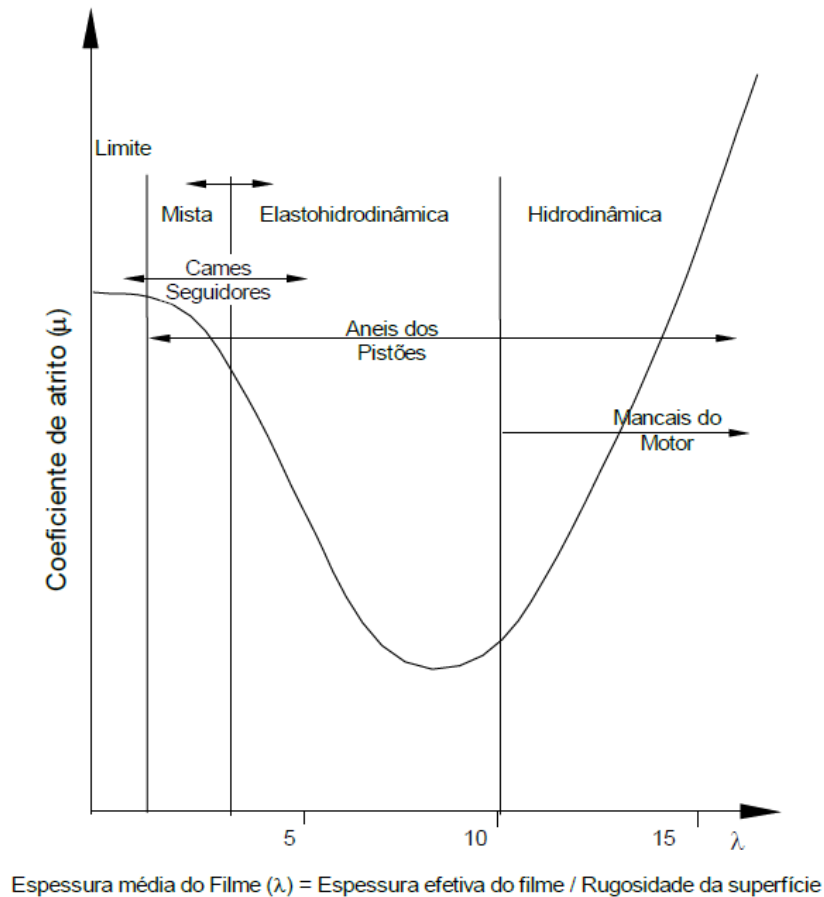


Figura 13: Relação de Thruston

Fonte: Stoeterau, 2004

De forma geral a lubrificação é dividida em cinco grandes áreas de estudo, as quais são:

- Lubrificação hidrodinâmica – onde a força de sustentação, no filme de lubrificante, é gerada pelo movimento relativo entre as superfícies;
- Lubrificação Elastohidrodinâmica – Lubrificação ocorre na presença de contato de rolamento entre as partes (atrito de rolamento);
- Lubrificação Limite – quando a espessura do filme lubrificante é na ordem molecular;
- Lubrificação Sólida – ocorre comumente em casos onde não há um filme delubrificante fluido separando as superfícies, promovendo um coeficiente de atrito constante;

- Lubrificação Hidrostática.

B. LUBRIFICANTES

Aplicação e a seleção de lubrificantes são determinadas pelas funções que eles devem preencher. Em algumas aplicações, como em mancais de instrumentos delicados, o controle de atrito é o mais significativos. Em outras, como em cortes de metais, pode ser mais importante o controle da temperatura. Os lubrificantes variam dependendo das diferentes funções que devem desempenhar. Neste item, nos referiremos principalmente a lubrificantes líquidos embora muitos gases e sólidos desempenhem importante papel como lubrificantes (STOETERAU, 2004).

Sendo que as principais funções dos lubrificantes são:

- 1 - Controle de atrito;
- 2 - Controle do desgaste;
- 3 - Controle de temperatura;
- 4 - Controle de corrosão;
- 5 - Isolante (elétrico);
- 6 - Transmissão de potência (hidráulica);
- 7 - Amortecimento de choques (amortecedores, engrenagens);
- 8 - Remoção de contaminantes (ação de lavagem por jato);
- 9 - Formação de vedação (graxa).

Essas funções são interdependentes. Na análise de problemas de lubrificação e falhas de peças lubrificadas, muitas vezes a interdependência das funções dos lubrificantes é negligenciada. Na discussão dessas funções, procurar-se-á evidenciar o efeito de uma grande variação em uma dada função sobre as outras funções dependentes.

2.1.2.3. DESGASTE

A. INTRODUÇÃO

De acordo com Stoeterau (2004), praticamente todos os ramos da engenharia enfrentam problemas de desgaste. Os engenheiros de fabricação, em especial os que trabalham com o processo de usinagem, tem uma preocupação constante em avaliar o desgaste de ferramentas de corte, sem, contudo, em muitos casos, não levarem em conta a natureza do desgaste que essas sofrem.

De forma geral o desgaste pode ser definido como uma mudança cumulativa e indesejável em dimensões motivada pela remoção gradual de partículas discretas de superfícies em contato e com movimento relativo, devido, predominantemente, a ações mecânicas.

B. MECANISMOS DE DESGASTE

Stoeterau (2004) relata que o desgaste é um processo complexo, resultado de diferentes processos que podem ocorrer independentemente ou em combinações. Podem ser salientadas quatro formas de desgaste:

- por adesão:
- por abrasão;
- por corrosão e
- por fadiga superficial.

i. Desgaste por Adesão

De acordo com Stoeterau (2004), o desgaste por adesão é a mais comum forma de desgaste encontrada, sendo que sua teoria tem as mesmas bases da teoria do atrito por adesão, e apresentam um longo histórico de pesquisa. Segundo a teoria do atrito por adesão, fortes soldagens a frio são formadas em alguns pontos de contato entre pico das superfícies, e essas soldagens devem ser rompidas para permitir a continuidade do escorregamento. O rompimento das asperezas soldadas provoca severo dano a superfície, em geral sob a forma de crateras visíveis (macroscópicas). Este tipo de desgaste pode ser um problema quando se tem dois materiais de mesma natureza em contato, como por exemplo, aços e suas ligas, ou quando ocorre uma lubrificação deficiente e temperaturas altas, ou velocidades de escorregamento elevadas.

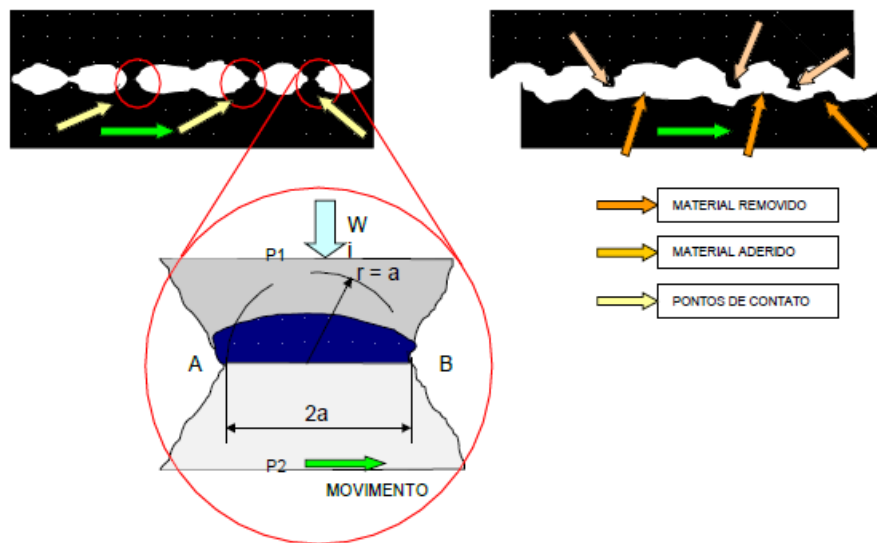


Figura 14: Contato e transferência de partículas

Fonte: Stoeterau, 2004

Na Figura 14 podem-se observar as seguintes etapas:

- I – Superfícies carregadas em contato. A carga aplicada causa plastificação e soldagem a frio;
- II – Ruptura na interface sem transferência de partículas;
- III – Ruptura da aspereza abaixo da junção soldada, com conseqüente transferência de partícula.

Uma estimativa quantitativa do desgaste por adesão pode ser assumindo-se que a tensão de escoamento por compressão, que pode ser considerada como três vezes a tensão de escoamento uniaxial ($3\sigma_e$) devido ao estado multiaxial de tensões, é ultrapassada após o contato inicial das asperezas, o material escoam localmente. Assim, se a área real de contato é A_r , a tensão de escoamento por compressão é $3\sigma_e$, e a força normal que pressiona as superfícies é N , tem-se:

Equação 14

$$N = A_r \cdot (3 \cdot \sigma_e)$$

Segundo Collins, baseado em estudos de Archard, quando duas asperezas entram em contato para formar uma junção, existe uma probabilidade constante que seja formada uma partícula de desgaste. Assumindo que sua forma é hemisférica, de diâmetro d , igual ao diâmetro da junção, e que todas as junções são do mesmo tamanho, se existirem n junções em cada instante, a área real de contato A_r será:

Equação 15

$$Ar = n \cdot \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \right)$$

Combinando as equações 14 e 15, temos:

Equação 16

$$n = \frac{4 \cdot Ar}{(\pi \cdot d^2)} = \frac{4 \cdot N}{(3 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \sigma_e)}$$

Ainda de acordo com Stoeterau (2004), em seguida, é assumido que cada junção permanece intacta durante um a distância de escorregamento igual ao diâmetro da junção d , após que a junção é rompida e uma nova junção se forma. Assim, cada junção deve ser refeita l/d vezes por unidade de distância de escorregamento, e o número total de junções N_j formada por unidade de distância de escorregamento é:

Equação 17

$$N_j = n \left(\frac{l}{d} \right) = \frac{4 \cdot N}{(3 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \sigma_e)}$$

Se a probabilidade de formação de uma partícula de desgaste é p , o número total de junções formada por unidade de distância de escorregamento é N_j , e as partículas formadas são hemisféricas, com volume $\pi d^3/12$, o volume das partículas ΔV formado por unidade de distância de escorregamento ΔL_e é dado por:

Equação 18

$$\frac{\Delta V_p}{\Delta L_e} = p \cdot n \left(\frac{\pi \cdot d^3}{12} \right)$$

Combinando as equações 17 e 18, tem-se:

Equação 19

$$\frac{\Delta V_p}{\Delta L_e} = \frac{p \cdot W \cdot L}{9 \cdot \sigma_e}$$

Analisando a Figura 14 e assumindo o hemisfério formado como tendo um raio a , a distância de escorregamento $2a$, temos um volume gerado de $2/3\pi a^3$. O volume desgastado por unidade de deslocamento é $(2/3\pi a^3)/2a$ resultando em $1/3\pi a^3$. Como o pico é deformando somente plasticamente, pode-se relacionar a dimensão a com o carregamento L_i , através da dureza H , assim:

Equação 20

$$L_i = H \pi a$$

Assumindo todos estes eventos temos que o desgaste total é:

Equação 21

$$Q = \frac{\pi}{3} \sum a^2$$

Equação 22

$$Q = \frac{1}{(3\pi)} \sum \left(\frac{p L_i}{H} \right)$$

Equação 23

$$Q = \frac{L}{3H}$$

Como $Q = \sum L_i$, o valor previsto para o coeficiente de desgaste K para a junção como um todo é de 1/3.

Integrando a equação 23 sobre a distância total de escorregamento L_e , tem-se o volume de desgaste por adesão:

Equação 24

$$Q_{ad} = \frac{k \cdot W \cdot L}{9 \cdot \sigma_e}$$

Se d_{ad} é a profundidade média de desgaste e A_a a área de contato aparente, equação 24 pode ser modificada para:

Equação 25

$$d_{ad} = \frac{Q_{ad}}{A_a} = \left(\frac{k}{9 \cdot \sigma_e} \right) \cdot \left(\frac{W}{A_a} \right)$$

Ou

Equação 26

$$d_{ad} = k_{ad} \cdot p_m \cdot L$$

Onde

$p_m = W/A_a$ é a pressão média nominal de contato entre as duas superfícies;
 $k_{ad} = k / (9 \cdot \sigma_e)$ um coeficiente de desgaste.

O coeficiente k_{ad} depende da probabilidade de formação de um fragmento transferido e da tensão de escoamento (ou dureza) do material mais mole.

De forma complementar, o deslizamento é comumente modelado pela equação de Archard, conforme Tomanik (2000):

Equação 27

$$Q = \frac{K \cdot W}{H}$$

Onde:

Q: volume desgastado do material mais mole, por unidade de distância percorrida;

K: coeficiente adimensional de desgaste;

W: carga normal (N);

H: dureza do corpo mais mole (N.m²).

ii. Desgaste por Abrasão

De acordo com Stoeterau (2004), esta é a forma de desgaste que ocorre quando uma superfície rugosa e dura, ou uma superfície mole contendo partículas duras, desliza sobre uma superfície mais mole, e riscar uma série de ranhuras nesta superfície. O material das ranhuras é deslocado na forma de partículas de desgaste, geralmente soltas.

De acordo com Alves (2000), o desgaste abrasivo tem origem em partículas externas ao sistema roda-trilho-sapata como fragmentos de minérios e areia, entre outros, ou em partículas removidas do sistema oriundas de qualquer de seus três membros e encruadas devido ao movimento relativo entre elas. Ele pode ser a três corpos quando o abrasivo movimentar-se entre o par sapata-roda ou roda-trilho, ou ainda a dois corpos quando o abrasivo se aloja no corpo mais mole, por exemplo, a sapata, desgastando a roda como se fosse uma ferramenta de corte. Os coeficientes de desgaste abrasivo a dois e a três corpos são respectivamente: 0,2 a 0,9 mm³/kg.m e 0,01 a 0,03 mm³/kg.m, mostrando a maior severidade do desgaste a dois

corpos. A Figura 15 ilustra esquematicamente o desgaste por abrasão a dois corpos(a) e a três corpos (b).



Figura 15: Desenho esquemático da abrasão à dois e três corpos

Fonte: Alves, 2000

Stoeterau (2004) cita que Rabinowicz desenvolveu um modelo simples para o desgaste abrasivo, considerando uma forma cônica para as asperezas cortantes, ou partículas, conforme mostra a Figura 16:

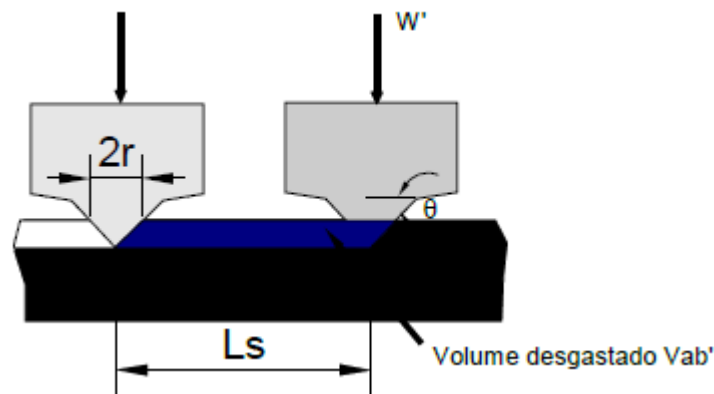


Figura 16: Modelo simplificado para o desgaste abrasivo

Fonte: Stoeterau, 2004

Considerando, primeiramente, a ação de uma única aspereza cônica, podemos deduzir que a profundidade de penetração na superfície mole pode ser estimada considerando que essa penetração cessa quando a porção de carga suportada por essa única aspereza, W' , dividida pela área de contato da aspereza projetada em um plano horizontal, A_{ph} , for igual à tensão de escoamento, ou seja,

Equação 28

$$\frac{W'}{A_{ph}} = 3 \sigma_e$$

ou

Equação 29

$$W' = 3 \sigma_e p r^2$$

onde r é o raio do cone da aspereza penetrante na altura da superfície do metal mole.

A área da seção transversal da ranhura V produzida pelo cone riscando através do metal mole pode ser expressa por:

Equação 30

$$A_{pv} = h r = r^2 \tan \theta$$

e o volume total de desgaste, produzido em uma distância de escorregamento L_s é:

Equação 31

$$V'_{ab} = A_{pv} L_s = L_s r^2 \tan \theta$$

Substituindo r^2 tirado de equação 28 tem-se para uma única aspereza

Equação 32

$$V'_{ab} = \frac{W' L_s \tan \theta}{3 p \sigma_e}$$

E para todas as asperezas (que suportam a carga total W)

Equação 33

$$V'_{ab} = W L_s \frac{(\tan \theta)_m}{3 p \sigma_e}$$

onde W é a carga total aplicada, $(\tan \theta)_m$ é um valor médio para todas as asperezas, L_s é a distância total de escorregamento, e σ_e é a tensão de escoamento uniaxial para o material mole.

Comparando a equação 29 para o volume de desgaste por abrasão com a equação 24 para o volume e desgaste por adesão, nota-se que são semelhantes com a constante $k/3$ em equação 24 substituída por $(\tan \theta)_m/p$ na equação 29. Valores típicos para a constante $3(\tan \theta)_m/p$ para diversos materiais, são mostrados na Tabela 1.

Uma profundidade média do desgaste por abrasão pode então ser calculada por

Equação 34

$$d_{ad} = V_{ab} = \frac{(\tan \theta)_m}{3 p \sigma_e}$$

Equação 35

$$d_{ad} = k_{ab} p_m L_s$$

onde $p_m = W/A_a$ é a pressão média nominal de contato entre as duas superfícies, L_s é a distância total de escorregamento e $k_{ab} = (\tan \theta)_m / (3 p \sigma_e)$ é um coeficiente de desgaste por abrasão que depende das características de rugosidade das superfícies e da tensão de escoamento (ou dureza) do material mole. Valores de k_{ab} devem ser determinados experimentalmente para cada combinação de materiais e condições de superfícies de interesse, embora dados úteis para uma aproximação de k_{ab} tenham sido obtidos em vários casos, alguns dos quais estão mostrados na Tabela 1.

Como pode ser observado pela Tabela 1, os valores de k_{ab} para desgaste de três corpos são aproximadamente, uma ordem de grandeza menores que para o caso de dois corpos, provavelmente porque as partículas introduzidas entre as superfícies tendem a rolar a maior parte do tempo e cortam parte do tempo.

A Tabela 1 apresenta uma série de constantes de desgaste por abrasão $3 (\tan \theta)_m / p$ para vários materiais em contato deslizante segundo relatórios de vários pesquisadores.

Tabela 1: Constante de desgaste por abrasão

Materiais	Tipos de Desgaste	Tamanho da partícula mm	$3 (\tan \theta)_m / p$
Vários	dois corpos	---	$180 \cdot 10^{-3}$
Vários	dois corpos	110	$150 \cdot 10^{-3}$
Vários	dois corpos	40-150	$120 \cdot 10^{-3}$
Aço	dois corpos	260	$80 \cdot 10^{-3}$
Vários	dois corpos	80	$24 \cdot 10^{-3}$
Latão	dois corpos	70	$16 \cdot 10^{-3}$
Aço	três corpos	150	$6 \cdot 10^{-3}$
Aço	três corpos	80	$4,5 \cdot 10^{-3}$
Vários	três corpos	40	$2 \cdot 10^{-3}$

Fonte: Stoeterau, 2004

Ainda de acordo com Stoeterau (2004), como no caso do desgaste por adesão, o problema em aplicações praticas da equação 18 é encontrar o valor apropriado da constante de desgaste por

abrasão. Se forem usados acabamentos superficiais adequados, o caso de desgaste de dois corpos raramente é o predominante. Normalmente o desgaste é governado pelo tipo de três corpos e é gerado por partículas de fontes externas, como poeira e sujeira existente na atmosfera; como essas partículas são variáveis em composição, tamanho, geometria e quantidade, o desgaste por abrasão resultante é muito variável. Se, em uma determinada aplicação, o desgaste produzido por partículas provenientes do ambiente externo é significativo, devem ser tomadas providências para selar, filtrar ou excluir por outro modo as partículas abrasivas prejudiciais à superfície.

iii. Desgaste por Corrosão

A influência do deslizamento na taxa de oxidação de um metal, e comenta que sob condições de deslizamento, mesmo a baixas temperaturas ambientes, a taxa de oxidação do metal é muito maior que sob condições estáticas. Este forte aumento da oxidação devido ao deslizamento possivelmente é resultado do aumento das taxas de difusão através da camada de óxido, que em face de grande quantidade de defeitos causados pela quebra mecânica das camadas, facilitam a difusão através da mesma (ALVES, 2000 apud HUTCHINGS, 1992).

Segundo Alves (2000), durante o escorregamento, pode-se atingir temperaturas passíveis de transformação de fase nos aços de rodas e, nessas temperaturas, as taxas de oxidação são intensas, chegando o óxido formado a atingir camadas com espessuras apreciáveis de vários microns em pequenos intervalos de tempo. Se, por um lado, a presença de óxidos no contato reduz o coeficiente de atrito e a possibilidade de adesão no local o que é favorável ao melhor comportamento do material da roda e trilho. Por outro lado, as formações de espessos filmes de óxidos também aceleram o desgaste. Durante os ciclos subsequentes de deslizamento estes óxidos formados de maneira acelerada pelas perturbações mecânicas e térmicas no contato (quebra do óxido, cisalhamento de camadas sub superficiais de óxidos, flutuações de temperaturas e flash temperaturas elevadas) se quebram e se destacam em forma de partículas de desgaste. Como elas se destacam, o material fica rapidamente exposto à re-oxidação.

Muitas propostas tem sido feitas para detalhar os mecanismos através dos quais partículas de óxidos se destacam como partículas desgaste. Uma delas propõe que a oxidação formada em uma aspereza, acelerada pelo aumento da temperatura, é raspada no ciclo posterior pelas condições do contato expondo novamente a aspereza do metal à re-oxidação. Desta forma

tem-se um ciclo oxidação, raspagem, re-oxidação do material. As partículas se soltam, mas, devido às compressões no contato, podem se aderir às partículas maiores que se formaram anteriormente, e, se destacarão posteriormente (Alves, 2000 apud Hutchings, 1992).

Empregando ensaios de desgaste disco-contra-disco estudaram a cinética do desgaste de aços de rodas e trilhos em condições de desgaste severo sem lubrificação, e propuseram um modelo para formação de partículas de desgaste e óxidos durante o ensaio. O número de partículas formadas (m) por unidade de volume (Δv) por unidade de tempo (Δt) é dada pela Equação 35 (Alves, 2000 apud Aronov & Kalpakjian, 1980):

Equação 36

$$m(\Delta v) = C_1(A_1 \Delta v)^\delta \cdot (\Delta t)$$

onde :

C_1 : constante

δ : função das propriedades do material

A_1 : energia para formação de uma partícula

Em caso de aços esse efeito pode ser complicado devido à formação de martensita. Algumas vezes o calor gerado em uma áspera, ou pico, aquecido provoca um fluxo de calor suficientemente alto, na direção ao material de base das camadas interiores frias, que às vezes pode levar a formação de martensita, o que leva a um repentino aumento de dureza na superfície.

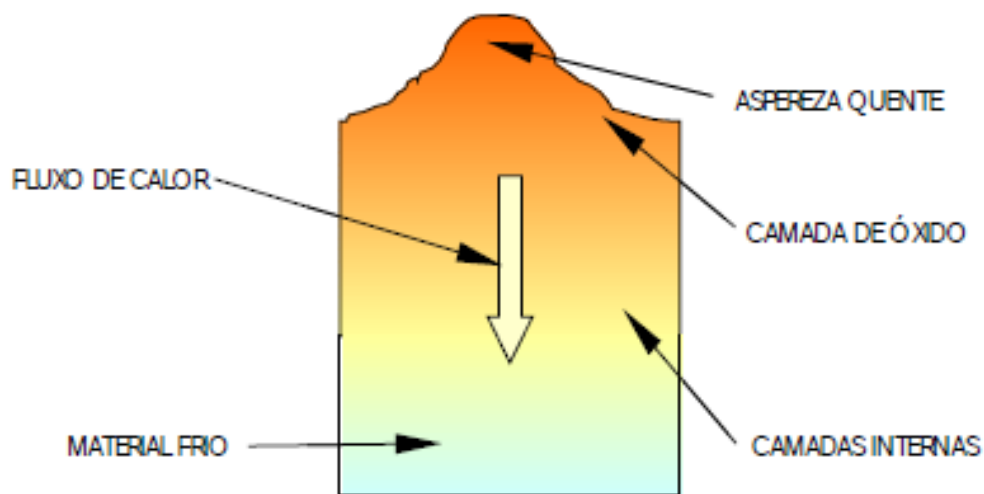


Figura 17: Exemplo mostrando o fluxo de calor em uma aspereza na superfície de aço submetido a atrito

Fonte: Stoeterau, 2004

Outro problema associado ao fluxo de calor gerado na ponta de uma aspereza, esta no aparecimento de tensões residuais na superfície, resultado da expansão volumétrica decorrentes da transformação martensítica.

Velocidades maiores de deslocamento geram temperaturas maiores, não levando somente ao aumento da taxa de oxidação, mas também resultando em um filme de óxido que pode estar amolecendo e se deformando localmente, absorvendo calor latente durante isto. O filme fino nessa região de desgaste por oxidação severa subsequentemente flui e se espalha por regiões mais frias da superfície de forma tão eficiente distribuindo esta energia com a solidificação do óxido. Assim a fusão de picos de asperezas é uma forma de uma forma mais uniforme de redistribuir o calor que flui para interior da superfície. Uma sensível idealização sobre a natureza e severidade dos contatos dos picos de asperezas foi realizada por Lim e Ashby, em 1987, em uma tentativa de modelar o processo de oxidação, equação 36.

Equação 37

$$Q_{ox} = f_m * \left\{ AP + B \frac{\sqrt{P}}{U} \right\}$$

onde:

A e B: parâmetros próprios dos materiais;

f_m : fator de perda de oxido da superfície.

iv. Desgaste por fadiga superficial

Quando duas superfícies atuam em contato com rolamento, o fenômeno de desgaste é diferente do desgaste que ocorre entre superfícies que escorregam. Em superfícies em contato com rolamento surgem tensões de contato, segundo Hertz, as quais produzem tensões de cisalhamento cujo valor máximo ocorre logo abaixo da superfície. Com o movimento de rolamento, a zona de contato desloca-se, de modo que a tensão de cisalhamento varia de zero a um valor máximo e volta à zero, produzindo tensões cíclicas que podem levar a uma falha por fadiga do material. Abaixo da superfície pode se formar uma trinca que se propaga devido ao carregamento cíclico podendo chegar à superfície lascando-a e fazendo surgir uma partícula superficial macroscópica com a correspondente formação de uma cavidade (pit). Essa ação, chamada de desgaste por fadiga superficial, é um modo comum de falha em

mancais de rolamento, dentes de engrenagens e em partes de máquinas que envolvem superfícies em contato com rolamento.

As características do processo de desgaste por fadiga são:

1 - As partículas que são removidas tendem a ser grandes, ou seja, sua dimensão e da ordem da área de contato sobtensão (ordem de grandeza de 100m), enquanto que as partículas características de um desgaste por adesão para o material considerado seriam bem menores (ordem de grandeza de 30m).

2 - A forma mais característica de uma cavidade formada pelo processo é de um leque, conforme mostra a Figura 18.

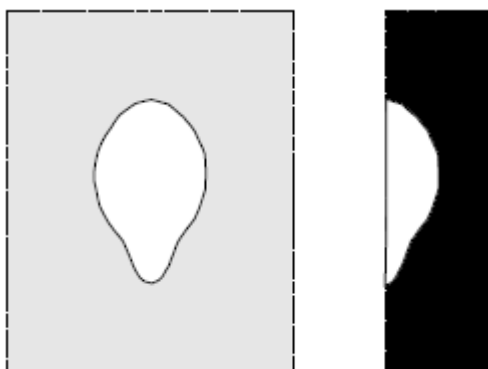


Figura 18: Forma típica de uma cavidade (pit) mostrando a inclinação em relação à superfície e a forma de leque

Fonte: Stoeterau, 2004

A trinca chega à superfície como um pequeno "V" que irá crescer gradualmente para o interior da peça durante o processo de formação da partícula. Quando a partícula é deslocada, a orientação da trinca é tal que o vértice do V corresponde ao vértice da cavidade em forma de leque. As trincas de fadiga superficial são sempre inclinadas em relação à superfície, formando com ela um ângulo agudo e aprofundando-se na direção do movimento do rolamento da superfície oposta.

3 - O crescimento da trinca de fadiga superficial está relacionado com a ação do óleo lubrificante existente entre as superfícies. A teoria aceita é que o óleo entra na trinca que surgiu na superfície, é aprisionado pela superfície rolante que fecha a entrada da pista e fica submetido a altas pressões enquanto o elemento rolante avança. Este óleo aprisionado sob alta pressão age como uma cunha que aprofunda a trinca. Esta teoria é consistente com a

observação da inclinação da trinca e da existência de uma viscosidade crítica de óleo. Para um dado material, acabamento e carga, existe uma viscosidade crítica de óleo abaixo da qual, na temperatura de operação, o óleo promoverá a formação de crateras (pitting). Óleos com viscosidade maior não causarão fadiga superficial, pois não entram na trinca e não formam cunha.

A fadiga superficial (pitting) não ocorre sem óleo. Quando as superfícies rolantes são testadas a seco nota-se formação de escamas, mas não de cavidades que somente surgirão pela ação do óleo.

4 - A vida do sistema é bastante dependente da carga, sendo a relação do tipo:

Equação 38

$$Vd = \left(\frac{C}{L}\right)^3$$

sendo V_d a vida em ciclos de carregamento, L a carga aplicada e C é uma constante.

5 - A faixa de variação da vida é enorme. Variações de 200:1 sob condições aparentemente idênticas, não são incomuns. Deve ser mostrado que em condições de desgaste por adesão embora a faixa de variação seja grande, geralmente não ultrapassa um fator 10.

As duas diferenças importantes entre a fadiga normal e a fadiga superficial são, primeiro, que as flutuações na vida são muito maiores em situações de contato por rolamento (fator >100) do que nos casos normais de fadiga (fator -10).

Segundo, nos casos ordinários de fadiga existe um limite de tensão (usualmente entre um terço e metade da tensão de escoamento) abaixo do qual o material atinge uma vida infinita. Esse limite não existe para o caso da fadiga superficial. Essas diferenças dificultam projetar elementos com contato por rolamento com cargas elevadas e para uma vida longa e previsível.

Não é possível projetar elementos com esse tipo de contato cujas tensões de contato estejam abaixo de um certo valor e ter a certeza que foi eliminado a falha por fadiga superficial. Além disso, se conhecermos as condições que permitem uma determinada vida para um conjunto de

elementos com contato por rolamento, digamos 90% deles, e muito difícil definir as medidas que levariam a garantir a mesma vida para 99,9%.

Em dentes de engrenagens deve ser considerada, também, a possibilidade de fadiga superficial. Em certos tipos de engrenagens como sem fim-coroa, ou engrenagens hipóides, existe uma combinação de rolamento e escorregamento, o que facilita o surgimento de trincas superficiais; desgaste por adesão, por abrasão, por corrosão ou por fadiga superficial são modos potenciais de falha. Portanto, resultados satisfatórios de operação em elementos potencialmente sujeitos a fadiga superficial somente podem ser obtidos com um projeto adequado, com uma manufatura cuidadosa e com o uso do lubrificante próprio para as condições de trabalho.

2.2. MATERIAIS PARA RODA-TRILHO

2.2.1. APRESENTAÇÃO

De acordo com Alves (2000), os materiais normalmente empregados em rodas e trilhos são aços de composições químicas próximas do eutetóide. Os trilhos são produzidos por laminação e as rodas por forjamento a partir de lingotes ou fundidas em moldes de grafite pelo processo baixa pressão. As rodas forjadas encontram sua maior aplicação na Europa em carros de passageiros onde se utilizam menores cargas, enquanto que as fundidas nos Estados Unidos, em vagões de carga. As especificações que definem as composições químicas, propriedades mecânicas e requisitos de qualidade de rodas ferroviárias são definidas pelas normas AAR (Association of American Railroads) para o padrão americano e UIC (Union International Railways) para o europeu. No Brasil adota-se o padrão americano.

A Tabela 2 lista as recomendações da AAR para rodas forjadas e fundidas atendendo respectivamente a normas AAR M107/208 em sua última revisão.

Tabela 2: Composição química e recomendações para uso segundo AAR M-107/M-208

Classe	Aplicação	Composição Química				Dureza
		C	Mn	Si	P/S	BHN
L	Altas velocidades com severas condições de frenagem e cargas leves nas rodas	0,47 máx.	0,60 a 0,85	0,15 mín.	0,05 máx.	177 a 277
A	Altas velocidades com severas condições de frenagem e cargas moderadas nas rodas (vagões de cargas leves)	0,47 a 0,57	0,60 a 0,85	0,15 mín.	0,05 máx.	255 a 321
B	Altas velocidades com severa frenagem a altas cargas nas rodas (vagões de minério)	0,57 a 0,67	0,60 a 0,85	0,15 mín.	0,05 máx.	277 a 341
C	Serviços com condições leves de frenagem e altas cargas nas rodas ou altas cargas nas rodas com freios fora da pista (carro passageiro)	0,67 a 0,77	0,60 a 0,85	0,15 mín.	0,05 máx.	321 a 363

Fonte: Alves, 2000

A Tabela 3 lista as composições químicas das diversas classes de aços para rodas ferroviárias conforme padrão europeu definidas pela norma UIC.

Tabela 3: Composição química conforme norma UIC para rodas

Composição Química (Valores Máximos, %)											
Classe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V	Cr+Mo+Ni
R1	0,48	0,50	0,9	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,5
R2	0,58	0,50	0,9	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,5
R3	0,70	0,50	0,9	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,5
R6	0,48	0,40	0,75	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,5
R7	0,52	0,40	0,80	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,5
R8	0,56	0,40	0,80	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,5
R9	0,60	0,40	0,80	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,5

Fonte: Alves, 2000

De acordo com Alves (2000), as classes mais empregadas, conforme o padrão americano são as classes B e C, sendo que ambas apresentam microestrutura predominantemente perlítica obtida por processo de normalização, porém com uma fina camada de bainita de aproximadamente 8mm na pista de rolamento devido ao resfriamento com água para obtenção de tensão de compressão e em seguida estes aços passam por um revenimento para alívio das tensões.

Analisando a Tabela 3 e comparando as classes B e C verifica-se que há uma faixa de dureza comum às duas classes, ou seja, 321 a 341 BHN, porém a composição química se difere no teor de carbono. Como se trata de aços perlíticos-ferríticos o teor de carbono é fundamental para definição da dureza e conseqüentemente das propriedades mecânicas.

A Tabela 4 lista as propriedades mecânicas de aços de roda ensaiados conforme ASTM A 370 - 94, a partir de corpos-de-prova retirados da pista de rolamento da roda conforme Figura 19 para aços fundidos classe B e C.

Tabela 4: Propriedades mecânicas de aços de roda ensaiados conforme ASTM A 370 - 94 a partir de corpos-de-prova retirados da pista de rolamento da roda, para aços fundidos classe B e C

Material	Limite de Resistência (LR MPa)	Limite de Escoamento (LE MPa)	Alongamento (%)	Estricção (%)
CLASSE C[7]	1100	883	10	20
CLASSE B[7]	1061	800	16	38

Fonte: Alves, 2000

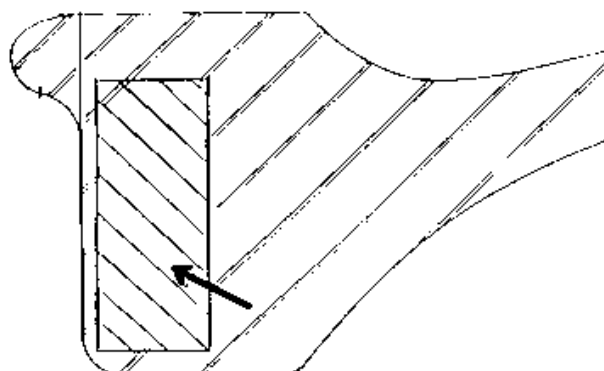


Figura 19: Local de retirada de corpo-de-prova para ensaio de tração

Fonte: Alves, 2000

Alves (2000) cita a importância da ductilidade do aço da roda face a efeitos combinados de cargas mecânicas e térmicas periódicas aplicadas sobre ela. Isto implica na necessidade de considerável tenacidade e baixa suscetibilidade à trinca térmica. Vários estudos foram orientados para o mecanismo de iniciação de trincas térmicas e o desenvolvimento de aços que sejam menos sensíveis a esse tipo de trinca e com maior tenacidade a fratura. A influência do teor de C na tenacidade do aço e define que o teor desse elemento deve ser tal que propicie uma microestrutura predominantemente perlítica, porém com alguma ferrita livre, o que de certa forma garante a não existência de cementita em contorno de grão, tendo assim um bom equilíbrio entre resistência mecânica e tenacidade. Esses estudos levaram muitas companhias ferroviárias a optarem por aços AAR classe B. Nestes aços adições de ligas como o manganês, silício, cromo e vanádio atuam favoravelmente no aumento de sua resistência mecânica e dureza, através dos mecanismos de endurecimento por solução sólida e por dispersão. Além disto, o aumento do teor destes elementos provoca um deslocamento do ponto eutetóide para a esquerda e conseqüentemente o aumento da fração volumétrica de perlita na microestrutura para menores teores de carbono como é o caso do aço AAR classe B.

2.2.2. DIMENSÕES

De acordo com Alves (2000), outra característica importante da roda é sua geometria, que, em conjunto com a manga do eixo em que é montada, limita a carga aplicada sobre o eixo. Entre as principais dimensões da roda se destacam o diâmetro externo do aro ou pista de rolamento (dimensão D da Tabela 5), a espessura do friso (dimensão B da Tabela 5), as espessuras mínimas do disco ou alma (dimensão N1 e N2 da Tabela 5), a inclinação na região do contato com o trilho, a altura do cubo (dimensão P da Tabela 5), e altura do aro (dimensão L da Tabela 5). A espessura do aro (dimensão G da Tabela 5), limita o número de vidas ou possibilidades de reperfilamento da roda após desgastada. As rodas são classificadas conforme a espessura do aro em rodas de uma vida (1W), dupla vida (2W) ou múltipla vida (MW).

As rodas de uma vida não apresentam nenhum sobre-material que a permita ser reperfilada após desgaste ou presença de falhas oriundas da aplicação de esforços nas quais são submetidas. As rodas de dupla vida apresentam a possibilidade de um reperfilamento e as rodas de múltipla vida apresentam sobre-material para dois ou mais reperfilamentos. Essa

operação é feita com a usinagem das duas rodas simultaneamente. Retira-se em torno de 3 a 6mm de material por reperfilamento e refaz-se toda a pista e friso da roda.

A Tabela 5 mostra as dimensões típicas de rodas mais utilizadas de uma vida (1W), dupla vida (2W) e múltipla vida (MW) e as cargas máximas permitidas por roda conforme AAR M 208 em sua última revisão.

O carregamento, a velocidade, o material, a geometria da roda e do trilho na região do contato entre outras formam um tribossistema que irá determinar o desgaste e o desempenho da roda e trilho durante sua aplicação.

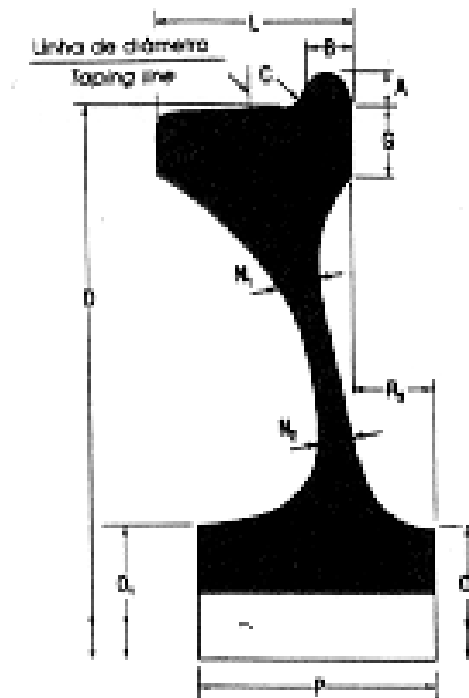


Figura 20: Perfil padrão de uma roda ferroviária

Fonte: Alves, 2000

Tabela 5: Dimensões típicas de rodas ferroviárias de maior utilização e as respectivas cargas máximas aplicadas, conforme AAR M 208 (Dimensões nominais - mm)

MODELO	CJ33	CH36	CB38	CJ36	CD29	CR33	CK36	CD38
Tipo	1W	1W	1W	2W	MW	MW	MW	MW
Carga. Máx/roda	12.5 t	14.9 t	17.8 t	14.9 t	10 t	12.5 t	14.9 t	17.8 t
Manga de eixo**	6"x11"	6,5" x 12"	7"x12"	6,5"x 12"	5,5"x 12"	6"x11"	6,5"x 12"	6,5"x 12"
Diâmetro (D)	838.20	914.40	965.20	914.40	743.00	838.20	914.40	965.20
A	25.40	25.40	25.40	25.40	27.00	25.40	25.40	25.40
B	34.90	34.90	34.90	34.90	30.60	34.90	34.90	29.40
C	19.00	19.00	19.00	19.00	17.40	19.00	19.00	17.40
G (mín)	31.70	38.10	38.10	50.80	69.80	63.50	63.50	69.80
L	145.20	145.20	145.20	145.20	133.40	145.20	145.20	145.20
N1 (mín)	15.90	19.00	22.20	19.00	19.00	19.00	19.00	22.20
N2 (mín)	15.90	19.00	28.60	19.00	25.40	19.00	19.00	22.20
P	177.80	177.80	177.80	177.80	168.30	177.80	177.80	177.80
R2	63.50	63.50	63.50	63.50	76.20	63.50	63.50	63.50
Furo (ϕ máx)	212.70	225.40	244.50	225.40	196.80	212.70	225.40	244.40
Parede mín. cubo	28.60	28.60	31.70	28.60	28.60	28.60	28.60	31.70
O1/O2	269.90	269.90	308.00	282.60	254.00	269.90	282.60	307.00

** Dimensões indicadas em polegadas por serem assim conhecidas no meio ferroviário

Fonte: Alves, 2000

2.3. TRATAMENTO TÉRMICO

2.3.1. HISTÓRICO

De acordo com Vale (2011), a humanidade há milhares de anos (aproximadamente 1000 a.C.), descobriu os metais e as aplicações destes em seu cotidiano. Em seguimento, aprendeu que, com aquecimento e resfriamento desses metais, podia modificar suas propriedades

mecânicas e metalúrgicas, tornando-os mais duros, trabalháveis, moles, resistentes, frágeis, dentre outras características.

Cerca de 350 a.C. surge na Índia, e ainda antes na China, o ferro de fusão: ferro extraído do minério por meio de fornos cujo funcionamento era semelhante ao dos atuais altos-fornos. Um bloco esponjoso obtido era martelado para libertar as escórias, sendo depois refundido em pequenos cadinhos que se deixavam arrefecer lentamente. Os aços de Damasco eram já verdadeiros compósitos formados de camadas alternadas de aço duro e aço macio ligados entre si por solda e forjamento.

Posteriormente, o homem descobriu o aço, liga de ferro e carbono, e dela conseguiu obter características diferenciadas, como a elevada dureza, através do aumento da velocidade de resfriamento das ligas ou trabalhando com aços de teores de carbono mais elevados. Concluiu assim que esses dois fatores são decisivos nas modificações das propriedades dos aços.

É antiga a preocupação do homem em possuir metais de elevada resistência e qualidade. Em guerras medievais, exércitos com espadas e outros armamentos metálicos levavam desvantagem bélica quando não tratavam termicamente seus arsenais, tornando-os vulneráveis no momento de repararem suas armas de ferro danificadas.

Todavia o homem necessitou de muitas gerações para lidar de maneira mais eficaz com o calor e com os processos e meios de resfriamento dos metais, para realizar um tratamento térmico melhorado.

Ainda de acordo com Vale (2011), apenas no século XVIII (1740) Huntsman redescobriu a fusão do aço. Fundindo em um cadinho pequenos pedaços de ferro enriquecido em carbono, obteve um bloco de aço homogêneo e que endurecia de maneira uniforme.

No início do século XIX surgiu a elaboração, por mistura em cadinho, antes da fusão, de ferro e materiais ricos em carbono e, mais tarde, de gusa. Contudo, apenas em 1820 é que Karsten mostrou que a diferença entre ferro, aço e gusa (ferro fundido) consistia no teor em carbono.

A contínua evolução e aplicabilidade da mecanização e a diversidade dos meios empregados para transformar os diferentes materiais elevaram o campo de utilização dos aços-ferramenta,

levando fabricantes de ligas a dotá-las de várias qualidades para atender às necessidades da indústria. Essa diversificação se deve ao fato de o aço-ferramenta ser aplicado em diversas possibilidades: das ferramentas manuais, passando por ferramentas de trabalho a quente, até ferramentas de corte.

2.3.2. DEFINIÇÃO

Tratamento térmico é o processo de aquecimento e resfriamento, em condições controladas de ligas metálicas, ferrosas e não ferrosas, onde se objetiva modificar as suas propriedades. Dessa forma obtém-se uma variedade de propriedades que permitem que as ligas sejam adequadas a diversas aplicações, conseguindo-se tais efeitos com reduzidos gastos financeiros (Vale, 2011).

De acordo com Assunção (1988), quando o tratamento térmico modifica intencionalmente a composição química da região superficial da peça de aço é denominada tratamento termoquímico. Caso contrário, é denominada tratamento termo físico ou tratamento térmico.

Os principais tratamentos térmicos aplicados aos aços são:

- a. Recozimento;
- b. Normalização;
- c. Beneficiamento (Têmpera e Revenimento);
- d. Cementação (Carbonetação);
- e. Nitretação;
- f. Cianetação;
- g. Carbonitretação;

Dentre os citados acima, a Cementação, a Nitretação, a Cianetação e a Carbonitretação são tratamentos termoquímicos.

O conhecimento da composição química do aço é fundamental para a realização dos tratamentos térmicos, pois na maioria das vezes, os dados necessários à realização do tratamento térmico variam com o tipo de aço.

Para muitos tratamentos térmicos, principalmente a têmpera, o conhecimento prévio do diagrama TTT (Transformação - Tempo - Temperatura) do aço é de grande importância na realização do tratamento. Por exemplo, a escolha do meio de resfriamento na têmpera depende, além de outros fatores, da posição das curvas do diagrama TTT do aço, ou seja, de sua temperabilidade.

Vale (2011) relata que o tratamento térmico pode ser executado basicamente, a partir de três fases principais:

- a. Aquecimento;
- b. Manutenção da temperatura;
- c. Resfriamento.

O tratamento térmico imprime as seguintes características aos materiais que passam por esse tipo de processo:

- a. Remoção de tensões internas;
- b. Aumento ou diminuição da dureza;
- c. Aumento da resistência mecânica;
- d. Melhoria da ductilidade;
- e. Melhoria da usinabilidade;
- f. Melhoria da resistência ao desgaste;
- g. Melhoria da resistência à corrosão;
- h. Melhoria da resistência ao calor;
- i. Melhoria das propriedades elétricas e magnéticas.

2.3.3. TRATAMENTOS COM RESFRIAMENTO CONTÍNUO

2.3.3.1. NORMALIZAÇÃO

De acordo com Vale (2011), a normalização é o tratamento térmico indicado para uniformizar e refinar a granulação dos aços, bem como melhorar a uniformidade da microestrutura. É frequentemente usada antes da têmpera e revenimento.

Na normalização, é obtida uma melhor homogeneização das microestruturas resultantes do que no recozimento pleno, pois a temperatura de tratamento é mais alta. A granulação mais fina é conseguida no resfriamento mais rápido.

A normalização é o tratamento térmico indicado para obter uma melhor resistência e a tenacidade desses aços. Além disto, em muitos casos, para se obter uma resposta uniforme a outros tratamentos térmicos (como têmpera, por exemplo) é necessário a partir de uma estrutura uniforme obtida através de normalização. (COLPAERT, 2008).

A metodologia do tratamento térmico é caracterizada através do aquecimento de um aço a temperaturas acima da sua zona crítica, observada na Figura 21, mantendo-o nessa temperatura para completa homogeneização com posterior resfriamento ao ar.

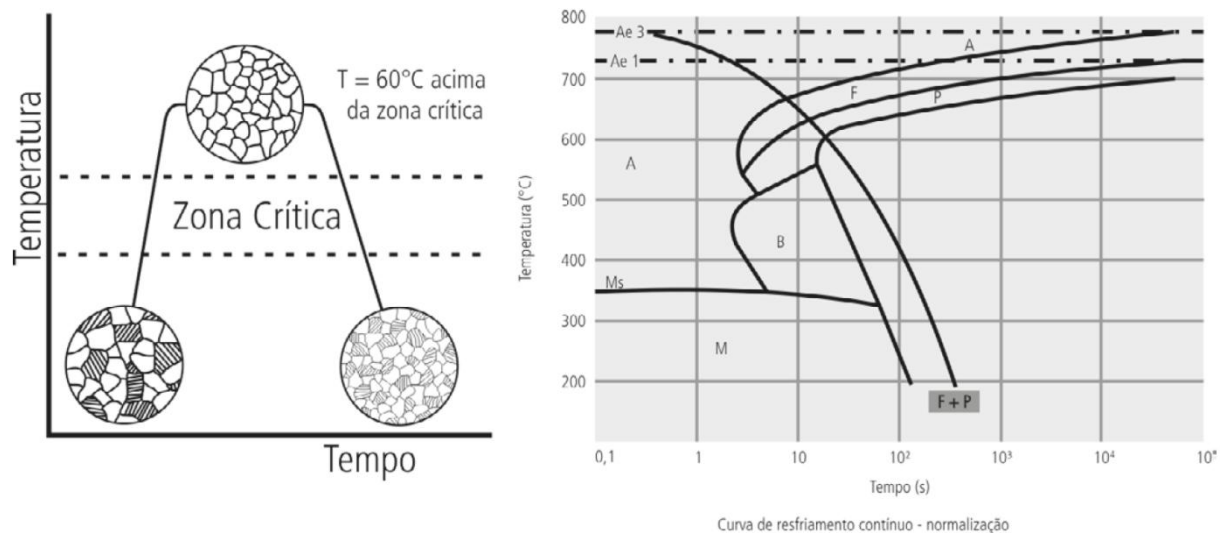


Figura 21: Representação das curvas de aquecimento e resfriamento contínuo de normalização de um aço carbono hipoeutetóide

Fonte: Oliveira, 2007 apud Vale, 2011

Este tratamento térmico pode ser aplicado tanto para peças fundidas e/ou forjadas, quanto peças de grandes dimensões. Para aços hipoeutetóides e hipereutetóides, as temperaturas são caracterizadas acima da linha A3 e acima da linha Acm, respectivamente, como podemos observar na Figura 22:

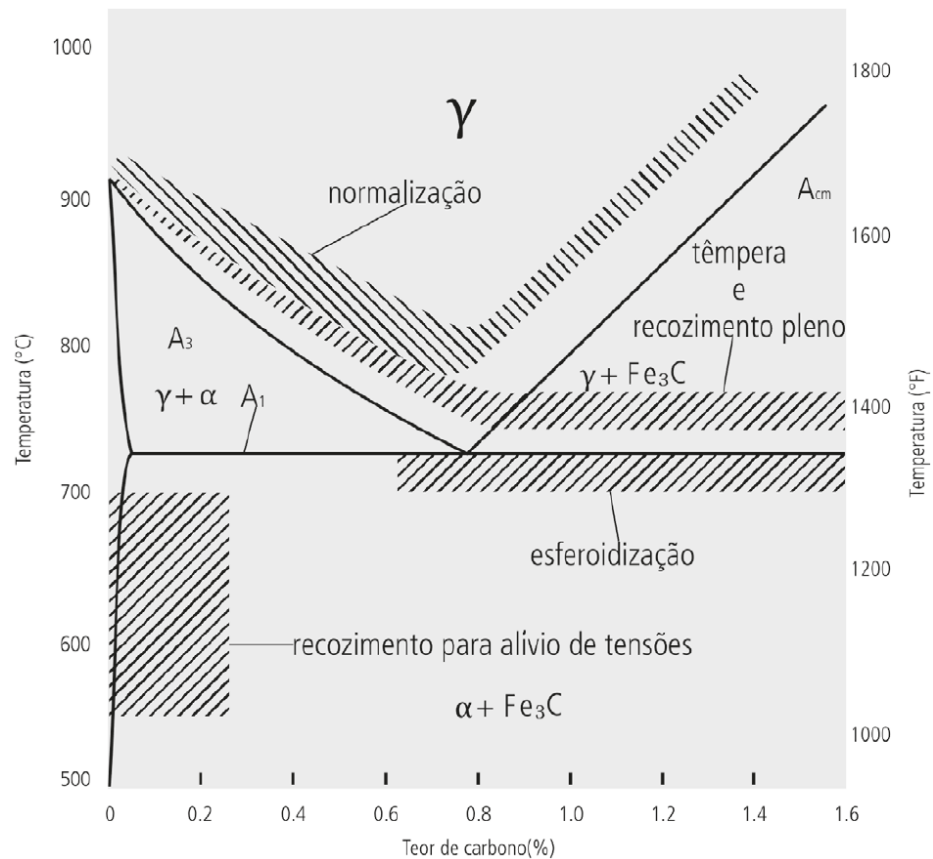


Figura 22: Faixas de temperatura usuais de alguns tratamentos térmicos de aços

Fonte: Oliveira, 2007 apud Vale, 2011

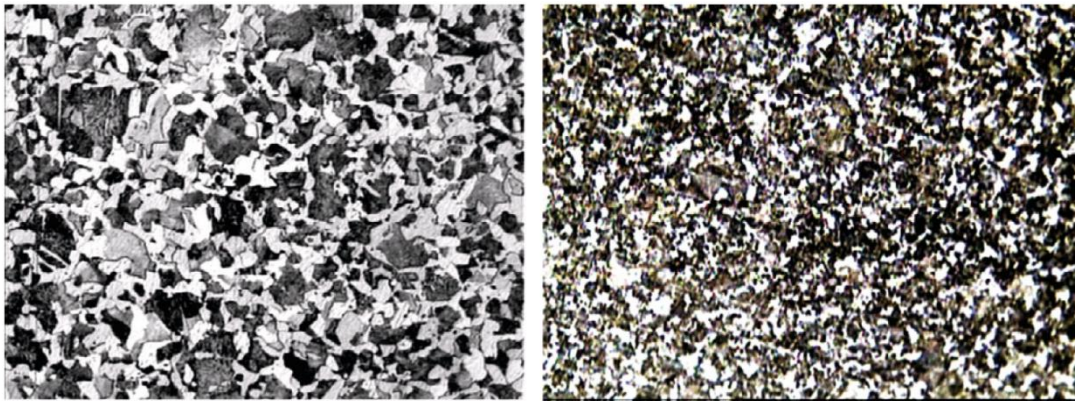
Vale (2011) salienta que nas temperaturas acima da linha A_{cm} , não há formação de um invólucro de carbonetos frágeis em função da velocidade de resfriamento ser maior, o que gera grãos menores e mais homogêneos. O resfriamento dos aços deve ser ao ar, de forma calma ou forçada.

Os constituintes resultantes deste tratamento térmico para os aços a seguir são:

- a. hipoeutetoide: ferrita + perlita fina
- b. eutetoide: perlita fina
- c. hipereutetoide: cemetita + perlita fina

Deve-se observar que de acordo com o aço utilizado, pode obter bainita.

Em relação ao recozimento a microestrutura é mais fina, apresenta menor quantidade e melhor distribuição de carbonetos, o que é demonstrado nas Figura 23:



Antes do Tratamento (zoom 250x) Depois do Tratamento

Figura 23: Microestrutura de um aço 1045 (0,45 C) antes e depois da normalização

Fonte: Oliveira, 2007 apud Vale, 2011

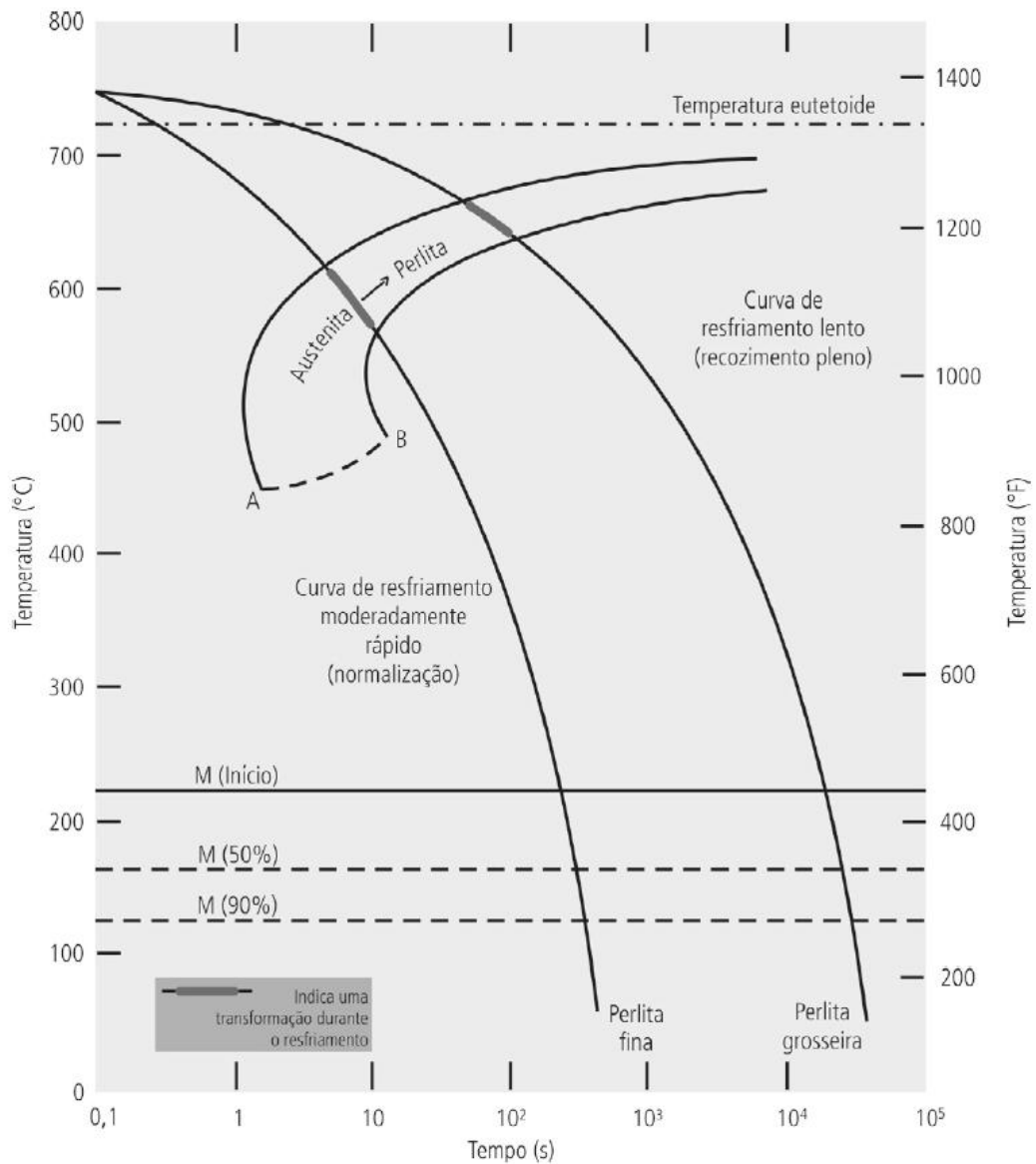


Figura 24: Comparação entre as curvas de resfriamento contínuo de um aço-carbono eutetóide

Fonte: Callister, 2002 apud Vale, 2011

2.3.3.2. TÊMPERA

De acordo com Vale (2011), a têmpera é o tratamento térmico indicado para obter a martensita (constituente metaestável endurecido do aço-carbono) e também melhorar a resistência ao desgaste do aço.

A metodologia de execução do tratamento térmico é definido pelo aquecimento de um aço a temperaturas acima da sua zona crítica, mantendo-o nessa temperatura para completa homogeneização com posterior resfriamento em meios severos, como água ou óleo de têmpera.

As aplicações do tratamento térmico podem ser em peças de aço com baixo ou médio teor de carbono, excepcionalmente com teor elevado desse elemento. A temperatura de tratamento térmico (aquecimento) recomendada para os aços são:

- a. hipoeutetoides é de 50° C acima da linha A3;
- b. eutetoides entres as linhas Acm e A1;
- c. hipereutetoides - acima da linha A3.

A. RESFRIAMENTO DIRETO:

Os meios de resfriamento dependem muito da composição do aço, ou seja, da porcentagem de carbono e elementos de liga, e da espessura da peça. Utiliza-se água, salmoura e óleo. No processo de têmpera direta, o mais utilizado de todos, consiste basicamente no resfriamento rápido, direto da temperatura de austenitização.

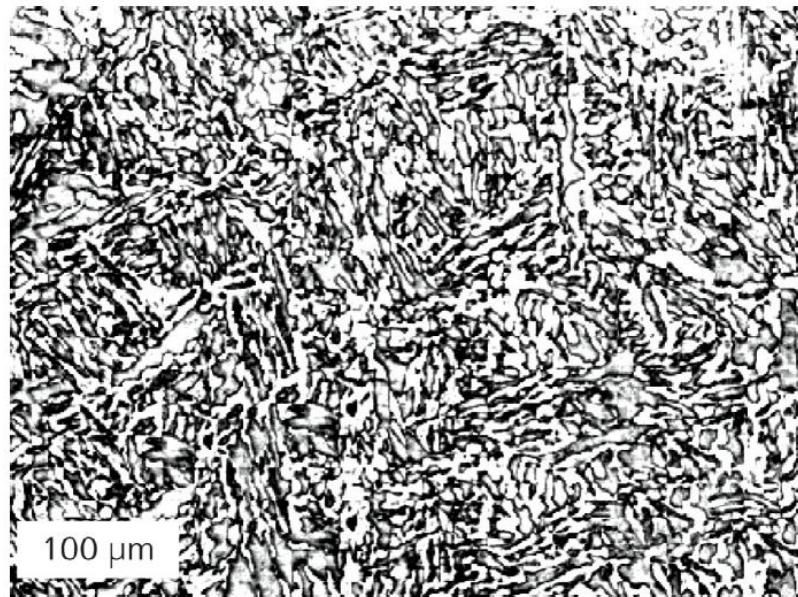


Figura 25: Microestrutura de aço temperado em óleo demonstrando ferrita em branco e a martensita (agulhas escuras)

Fonte: Vale, 2011

Já na Figura 26, pode-se visualizar a microestrutura de um aço duro, resfriado em água. Nesse caso, em virtude de a severidade do meio de resfriamento ser mais elevada, cerca de três vezes maior do que óleo de têmpera, a martensita obtida será mais acicular (agulhas mais bem definidas) e mais grosseira, tendo em vista que o cisalhamento ocorrido foi mais intenso do que o registrado na Figura 25.



Figura 26: Microestrutura de aço duro temperado em água demonstrando as agulhas escuras de martensita em um fundo de austenita retida, que não se transformou durante o resfriamento brusco, em branco

Fonte: Callister, 2002 apud Vale, 2011

A temperabilidade é a capacidade de um aço adquirir dureza por têmpera a uma certa profundidade. Na Figura 27 está o exemplo comparativo da temperabilidade de vários aços com 0,4% de carbono. A curva que indica a queda de dureza em função da profundidade recebe o nome de curva Jominy que é obtida por meio de ensaios normalizados.

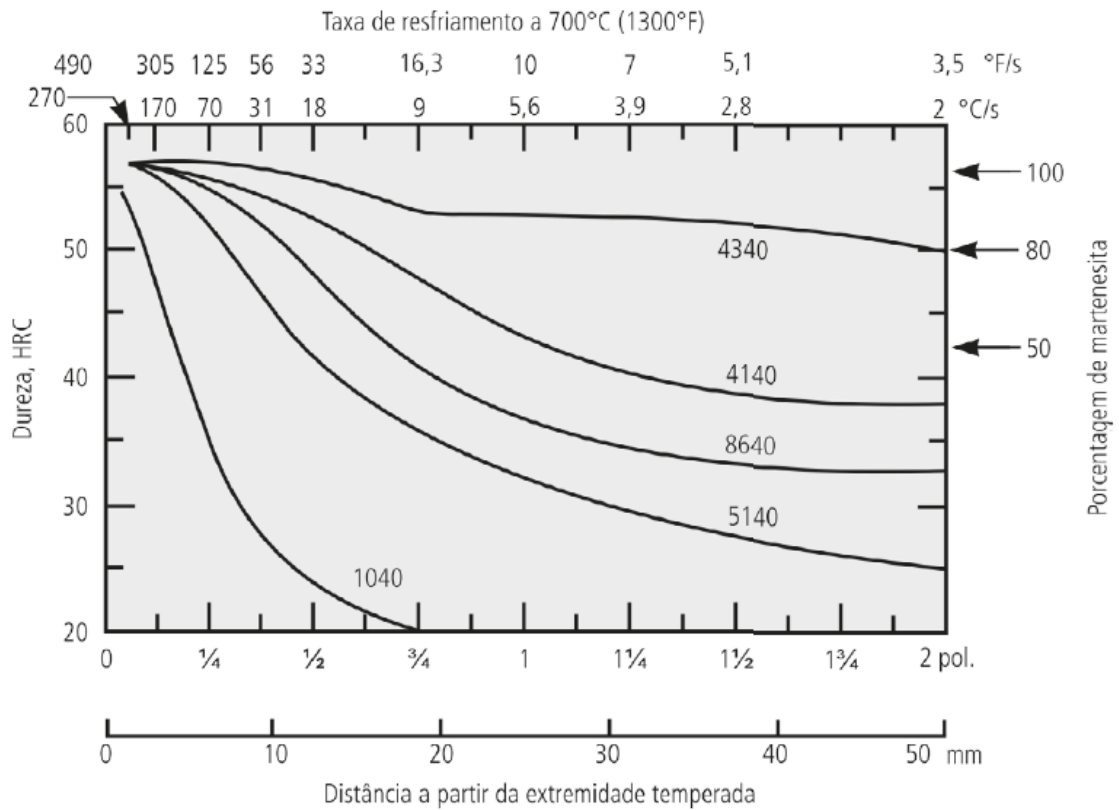


Figura 27: Temperabilidade de vários tipos de aços com 0,4% de carbono

Fonte: Callister, 2002 apud Vale, 2011

O Ensaio de Temperabilidade de Jominy consiste em temperar pela base, por meio de jato de água, em dispositivo apropriado, um corpo de prova-padrão; após o tratamento térmico, medições de dureza são realizadas ao longo do comprimento (verificando-se a diminuição da dureza longitudinal da peça, conforme se ilustra na Figura 28).

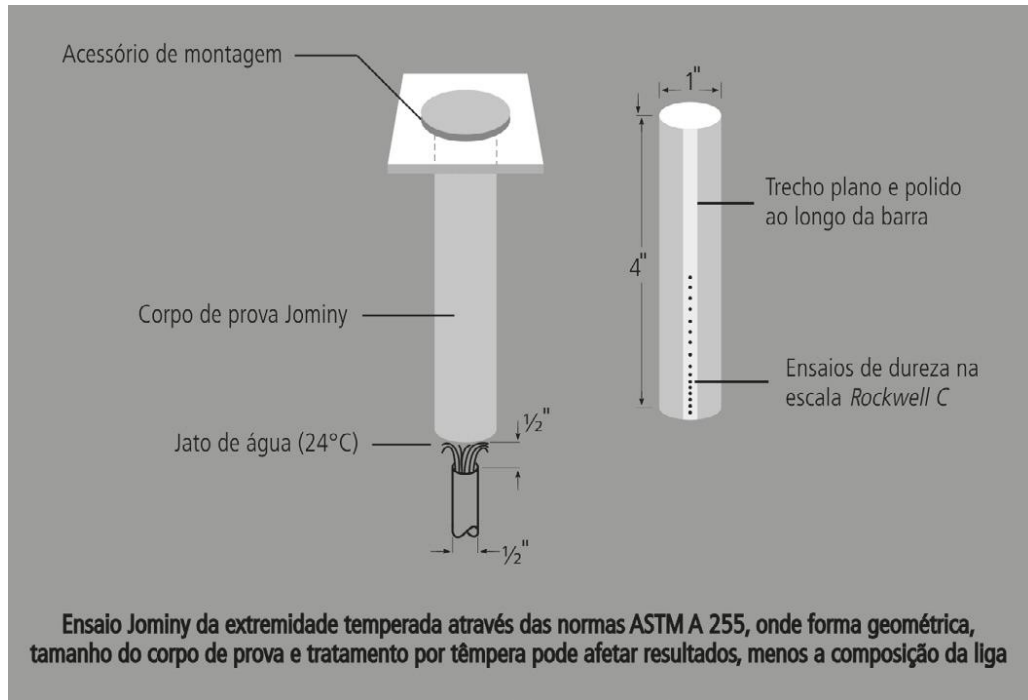


Figura 28: Ilustração do corpo de prova para ensaios de temperabilidade Jominy

Fonte: Callister, 2002 apud Vale, 2011

B. RESFRIAMENTO POR SPRAY:

No processo de manufatura as rodas ferroviárias passam por um tratamento térmico que consiste em austenitização em temperatura adequada ao material (aproximadamente 900° C), seguido do resfriamento empregando sprays com água ou "spray quenching", somente na pista de rolamento, objetivando adequar a microestrutura e a dureza da pista às severas condições de trabalho além de criar estado de tensões compressivas na peça.

Imediatamente após o "spray quenching" a roda passa por um revenimento para alívio de tensões (aproximadamente 500° C). Todo esse processo precisa ser bem controlado uma vez que é fundamental para a garantia da homogeneidade de propriedades mecânicas da roda (Alves, 2000).

Totten et al (1993) mostra que a homogeneidade da microestrutura e das propriedades mecânicas no final de um processo de têmpera por spray está diretamente relacionada a fatores como homogeneidade da austenita, tamanho de grão austenítico, composição química do aço, coeficiente de transmissão de calor do aço, tipo de refrigerante (água, água + polímeros), temperatura do refrigerante, distância da válvula ou bico de projeção do

refrigerante até a superfície a ser tratada, volume ou fluxo de refrigerante, pressão, velocidade do refrigerante e distribuição dele sobre a superfície.

As variáveis relativas ao aço estão diretamente relacionados à sua temperabilidade. Todas as maneiras de aumentar a temperabilidade de um aço bem como as suas consequências se aplicam num processo de spray quenching. As variáveis referentes ao meio refrigerante são relacionadas ao processo. Um bom controle do processo passa por garantir que essas variáveis acima citadas estejam corretamente controladas e de acordo com as especificações de pressão, velocidade, temperatura, qualidade do refrigerante, fluxo e volume de refrigerante, distância do bico até a superfície e homogeneidade de resfriamento.

Uma variação da pressão ou da distância do bico até a superfície a ser tratada por exemplo, vai interferir diretamente na microestrutura e profundidade da dureza. Quanto maior a pressão ou menor a distância, maior a dureza na superfície e mais profundas serão as camadas de martensita ou bainita no caso de rodas (TOTTEN et al, 1993).

2.3.4. TRATAMENTOS ISOTÉRMICOS

Vale (2011) aborda que nos tratamentos térmicos verifica-se que as transformações de fase ocorrem a uma temperatura constante. Os dois tratamentos dessa natureza são a austêmpera e a martêmpera.

2.3.4.1. AUSTÊMPERA

Esse tratamento isotérmico é adequado a aços de alta temperabilidade, ou seja, àqueles com alto teor de carbono.

Nesse tratamento a peça é aquecida acima da zona crítica (temperatura superior a 800°C dependendo do teor de carbono), por certo tempo, até a completa austenitização, o que pode ser observado na posição 1 da Figura 29. A seguir, é resfriada bruscamente em banho de sais fundidos, com temperaturas na ordem de 260 a 440°C (posição 2 da Figura 29), permanecendo nessa temperatura por um tempo, até que sejam cortadas as duas curvas TTT,

ocorrendo transformação da austenita em bainita (posição 3). Em seguida a peça é resfriada ao ar livre (posição 4).

A dureza da bainita (constituente resultante da austêmpera) é de, aproximadamente, 0 HRC e a dureza da martensita é de 65 a 67 HRC. Os aços que podem ser utilizados no processo pertencem às classificações que seguem:

- Aços-carbono com 0,5 a 1,0% C e com um mínimo de 0,6% de Mn.
- Aços-carbono com mais de 0,9% C e pouco menos de 0,6 % de Mn.
- Aços-carbono com menos de 0,5% C e com 1,0 a 1,65 % de Mn.
- Alguns aços-liga com mais de 0,3% de carbono.

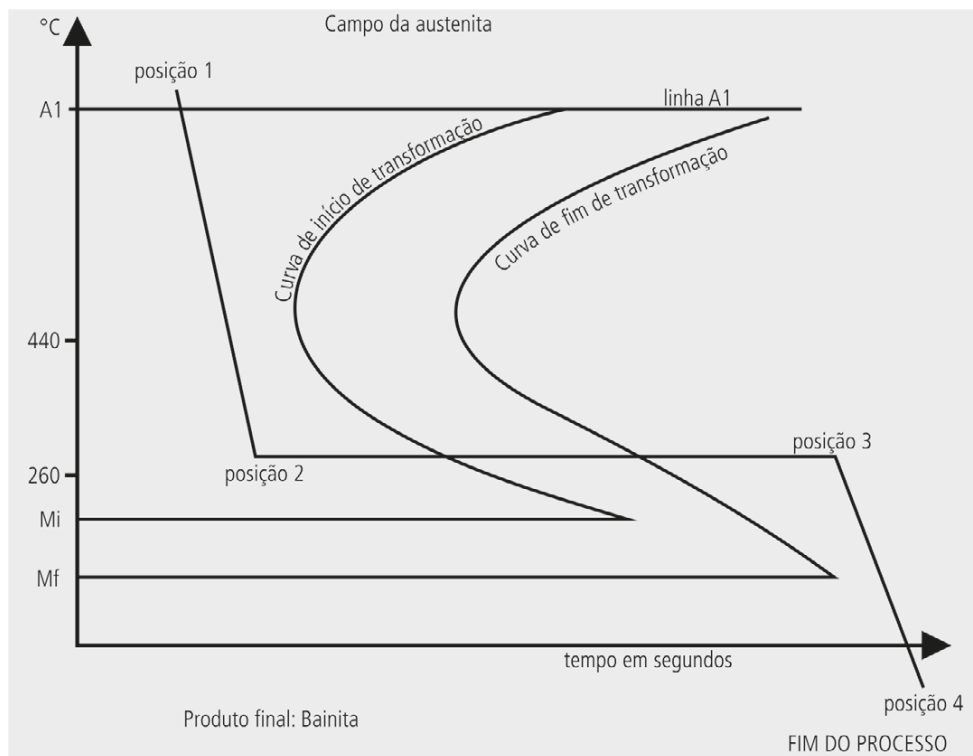


Figura 29: Curva de resfriamento da austêmpera de um aço com alto teor de carbono

Fonte: Oliveira, 2007 apud Vale, 2011

2.3.4.2. MARTÊMPERA

A martêmpera ou têmpera interrompida é um tipo de tratamento isotérmico indicado para aços-liga. Esse tipo de processo reduz o risco de empenamento, trincas e tensões residuais das peças.

O processo é ilustrado no diagrama TTT na Figura 30.

A peça é aquecida acima da zona crítica para se obter a austenita (posição 1). Depois, é resfriada em duas etapas. Na primeira, a peça é mergulhada num banho de sal fundido ou óleo quente, com temperatura um pouco acima da linha Mi (posição 2). Mantém-se a peça nessa temperatura por certo tempo, tendo-se o cuidado de não cortar a primeira curva (posição 3). A segunda etapa é a do resfriamento final, ao ar, em temperatura ambiente (posição 4).

A martensita obtida apresenta-se uniforme e homogênea, diminuindo os riscos de trincas.

Após a martêmpera é necessário submeter a peça a revenimento.

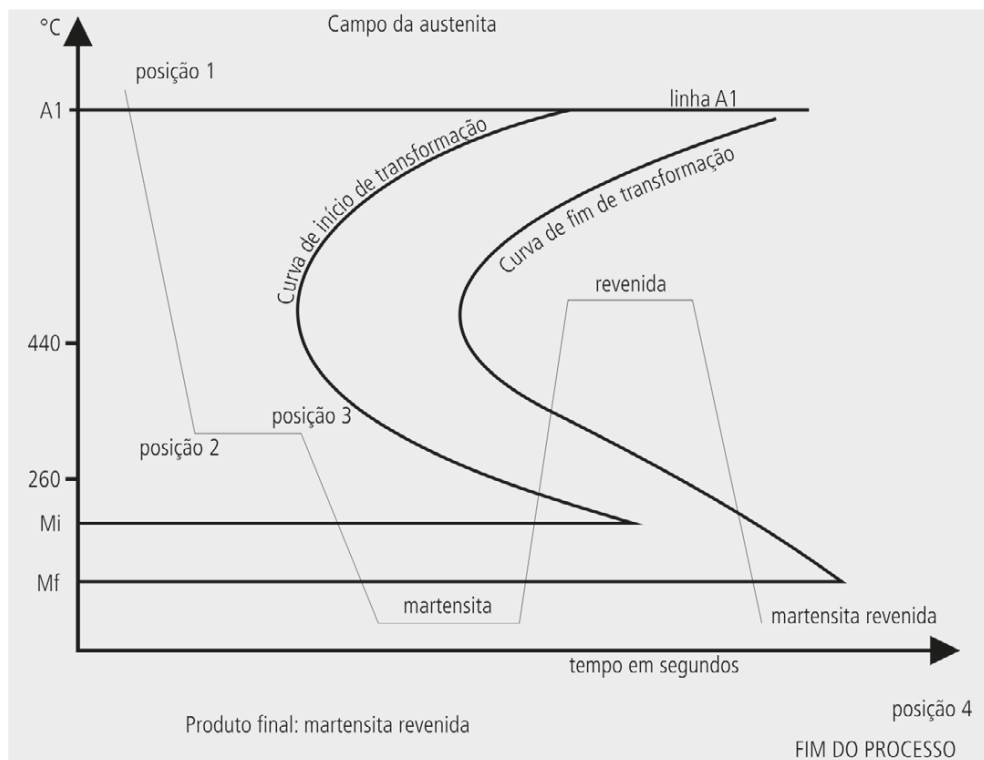


Figura 30: Curva de resfriamento da martêmpera de um aço com alto teor de carbono

Fonte: Oliveira, 2007 apud Vale, 2011

2.3.5. REVENIMENTO

De acordo com Vale (2011), o tratamento térmico de revenimento geralmente acompanha a têmpera e é indicada para:

- a. Aliviar ou remover as tensões adquiridas na têmpera;

b. Corrigir a dureza e a fragilidade da peça, aumentando resistência, desgaste e tenacidade, minimizando os efeitos térmicos e mecânicos provocados pelo cisalhamento da estrutura austenitizada.

A metodologia de execução do tratamento térmico consiste no tratamento térmico após a têmpera, a temperaturas inferiores às críticas, seguido de resfriamento lento, efetivando alívio de tensões.

A temperatura pode ser escolhida de acordo com as combinações de propriedades desejadas. Essa denominação se aplica genericamente a qualquer temperatura de revenido. Como é sabido, para cada faixa de temperatura, tem-se uma estrutura e uma dureza específica:

a. 150 a 230° C: os carbonetos começam a se precipitar.

Estrutura: martensita revenida (escura, preta)

Dureza: decresce de 65 RC para 60-63 RC

b. 230 a 400° C: os carbonetos continuam a se precipitar em forma globular, invisíveis ao microscópio ótico.

Estrutura: perlita fina (Troostita)

Dureza: decresce de 62 RC para 50 RC

c. 400 a 500° C: os carbonetos crescem em glóbulos, visíveis ao microscópio ótico.

Estrutura: sorbita

Dureza: decresce de 50 RC para 20-45 RC

d. 650 a 738° C: os carbonetos formam partículas globulares visíveis ao microscópio comum.

Estrutura: esferoidita

Dureza: decresce a valores abaixo de 20 RC

Na Figura 31, podem-se ver os comportamentos da dureza e da resistência ao impacto de um aço-carbono hipoeutetóide quando submetido a diferentes temperaturas de revenimento.

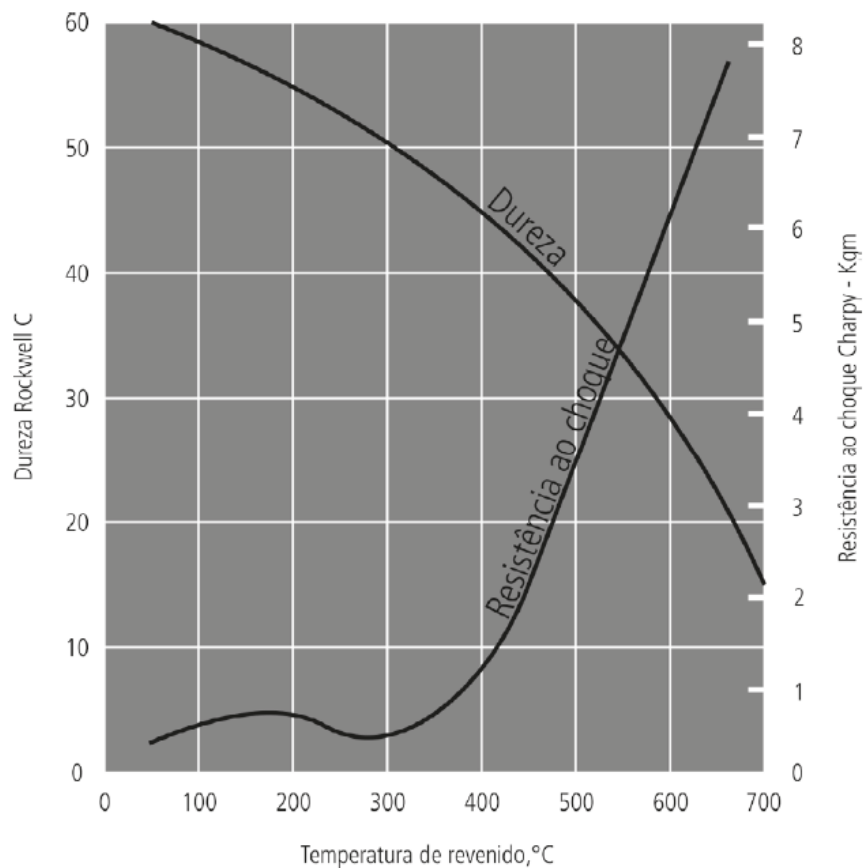


Figura 31: Comportamento da dureza e da resistência ao choque (obtida em ensaio Charpy) em função da temperatura de revenimento para um aço 1045 temperado

Fonte: Oliveira, 2007 apud Vale, 2011

Alguns aços podem apresentar certa fragilidade após revenimento, principalmente quando a temperatura é da ordem de 270° C. Podem-se citar algumas fragilidades, como por exemplo:

a. O primeiro tipo de fragilidade que se verifica é a denominada Fragilidade Azul que ocorre na faixa de temperatura de 230 a 370°C. Em algumas classes de aço há uma diminuição de tenacidade. Ocorre devido a uma rede de carbonetos precipitados que envolvem as agulhas de martensita. Este tipo de fragilidade é eliminado empregando aço com teor elevado de silício para inibir início da precipitação de carbonetos.

b. Outro tipo de fragilidade verificado na faixa de temperatura de 375/400°C a 575/550°C é a Fragilidade Krupp ou reversível, que ocorre quando o aço é mantido por algum tempo ou resfriado lentamente nessa faixa de temperatura e está relacionado com presença de impurezas segregadas próximas ao contorno de grão na austenitização.

c. A correção, em geral para esse tipo de problema ocorre com a aplicação de um novo revenimento ou por sub-resfriamento.

Na Figura 32 demonstram-se duas estruturas provenientes de um aço temperado (imagem da esquerda) com 200 vezes de ampliação, resultando em uma microestrutura composta de martensita (veios claros), de perlita fina ou troostita (contornos globulares escuros) e de temperado revenido (imagem da direita), com 1000 vezes de ampliação, resultando na sorbita.

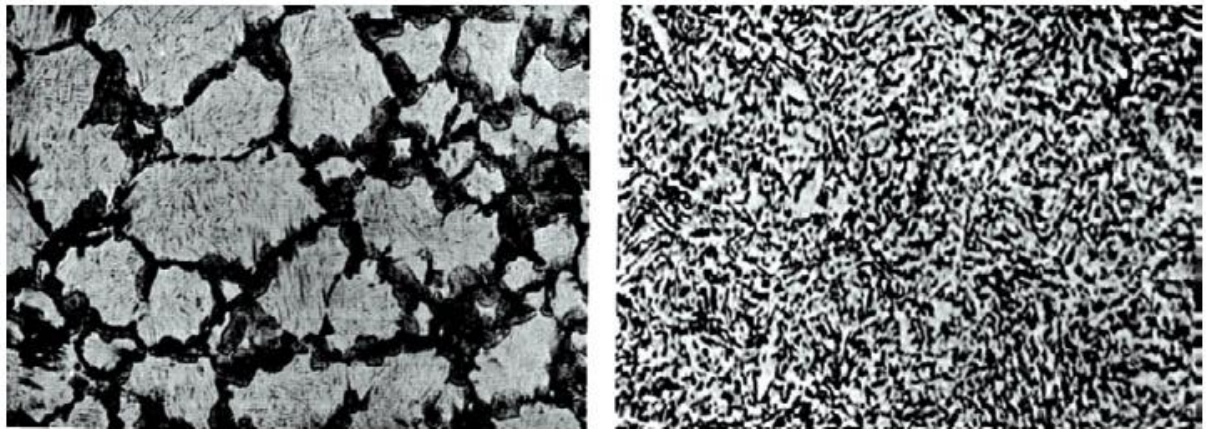


Figura 32: Microestrutura de um aço temperado (à esquerda) e temperado revenido (à direita)

Fonte: Oliveira, 2007 apud Vale, 2011

2.4. ÁREA DE CONTATO

O contato entre dois corpos pode ser realizado tanto de modo seco, quanto lubrificado, conforme apresentado na seqüência.

2.4.1. SECO

2.4.1.1. TEORIA DE HERTZ

De acordo com Campos (1994), a primeira teoria desenvolvida para explicar o fenômeno de contato entre dois corpos foi apresentada por Hertz, no fim do século passado (1985). Segundo Hertz, quando dois sólidos de perfil curvo são postos em contato, eles inicialmente se tocam em um ponto (contato entre duas esferas ou entre uma esfera e um plano) ou ao longo de uma linha (contato entre cilindros). Quando é aplicado um carregamento a esses sólidos em contato, eles se deformam próximo ao ponto inicial de contato, formando entre

eles uma área finita. Essa área é normalmente muito pequena quando comparada às dimensões dos dois sólidos.

O tipo de contato estudado por Hertz é estático, isto é, não considera os movimentos de translação e rotação entre os corpos. A Teoria de Hertz também pode ser empregada para o estudo de contato entre corpos em rolamento puro, isto é, não havendo o deslizamento entre eles. Em sua teoria, Hertz considera corpos em contato como sendo elásticos, ou seja, as deformações produzidas entre os corpos são totalmente reversíveis. Apesar de ter direcionado seu trabalho considerando apenas a elasticidade de um sólido quando este está sob certa pressão de contato, Hertz não considerou que, a depender da magnitude da pressão, pode haver um escoamento do material em contato. Isso se deveu a dificuldade de determinar o ponto inicial de escoamento do material sob a ação das tensões normais de contato. Um conhecimento mais profundo da elasticidade, resistência e escoamento do material sob a ação de tensões que levam ao escoamento só iria acontecer mais tarde, com o desenvolvimento da teoria da plasticidade (CAMPOS, 1994).

Existem basicamente três modelos empregados para o estudo do contato entre corpos rolantes que utilizam a teoria de Hertz, são eles:

- Contato elíptico (caso geral);
- Contato cilíndrico;
- Contato esférico.

De acordo com Campos (1994), no contato roda-trilho, tanto a roda como o trilho são modelados como se fossem cilindros com os seus eixos principais perpendiculares entre si. Quando é aplicada uma carga vertical entre ambos, forma-se uma área elíptica na região de contato devido à deformação dos corpos.

2.4.1.2. CONTATO ELÍPTICO DE HERTZ

Quando dois corpos são postos em contato, a região de contato é representada por um ponto, caso nenhum carregamento seja aplicado no sentido de comprimi-los. Quando um carregamento é aplicado, surge necessariamente uma área de contato. Hertz observou em seus

experimentos com lentes cilíndricas de vidro que após a aplicação de um carregamento, a região formada no contato tem a forma elíptica (CAMPOS, 1994).

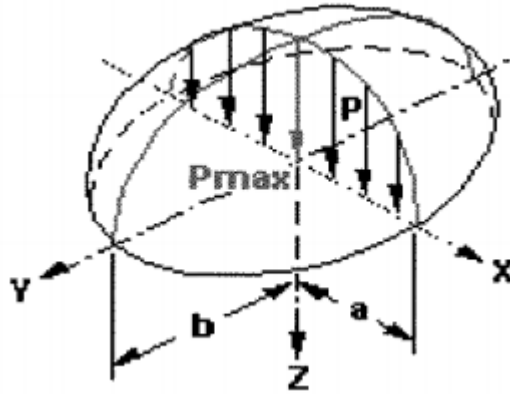


Figura 33: Esquema da elipse de contato e distribuição de pressão na região entre a roda e o trilho

Fonte: Campos, 1994

De acordo com Campos (1994), para calcular os valores dos semi eixos da elipse de contato (a e b) e, conseqüentemente, as tensões, deve-se primeiro determinar as suas constantes geométricas, que são função dos raios de curvatura dos corpos em contato.

Considerando primeiramente dois corpos em contato em um ponto “O”, origem do sistema de coordenadas cartesianas “ $x_1 y_1 z_1$ ” e “ $x_2 y_2 z_2$ ”, para os corpos 1 e 2, respectivamente. Os planos $x_1 y_1$ e $x_2 y_2$ são tangentes ao ponto de contato, como mostra a Figura 22. A direção do eixo $y_{1,2}$ é perpendicular ao plano do papel.

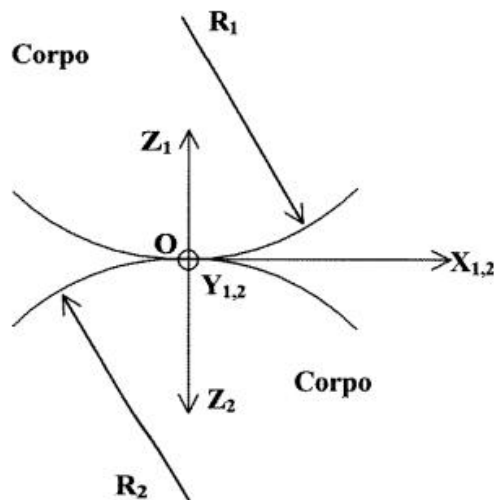


Figura 34: Esquema para definição das variáveis geométricas dos corpos 1 e 2

Fonte: Campos, 1994

As superfícies dos corpos 1 e 2, perto da região de contato, podem ser representados pelas equações de plano representadas nas equações 38 e 39, respectivamente.

Equação 39

$$Z_1 = A_1 x_1^2 + B_1 y_1^2 + C_1 x_1 y_1$$

Equação 40

$$Z_2 = A_2 x_2^2 + B_2 y_2^2 + C_2 x_2 y_2$$

De acordo com Campos (1994), considerando os valores somente no eixo x, os termos das equações 38 e 39 que contem a variável y irão desaparecer. O mesmo acontece quando se considera a direção y, os termos que contem x somem. Dessa forma, para valores ao longo dos eixos x e y, as equações 38 e 39 podem ser escritas como:

Equação 41

$$Z_1 = A_1 x_1^2 + B_1 y_1^2$$

Equação 42

$$Z_2 = A_2 x_2^2 + B_2 y_2^2$$

Reescrevendo as equações 40 e 41 em função dos raios de curvatura dos corpos, temos:

Equação 43

$$Z_1 = \frac{1}{2R_1} x_1^2 + \frac{1}{2R'_1} y_1^2$$

Equação 44

$$Z_2 = \frac{1}{2R_2} x_2^2 + \frac{1}{2R'_2} y_2^2$$

De acordo com Campos (1994), os raios R'_1 e R'_2 , chamados de raios ortogonais dos corpos em contato e estão em um plano perpendicular ao plano dos raios R_1 e R_2 . Considerando que não existe inclinação entre os sistemas de coordenada $x_1 y_1 z_1$ e $x_2 y_2 z_2$, conclui-se que os dois sistemas são paralelos, logo a distância entre dois pontos quaisquer dos corpos em contato, pode ser dada pela composição das equações 42 e 43.

Equação 45

$$Z_1 + Z_2 = \left(\frac{1}{2R_1} + \frac{1}{2R_2} \right) x^2 + \left(\frac{1}{2R'_1} + \frac{1}{2R'_2} \right) y^2$$

Comparando as equações ver material com a equação acima, pode-se obter o valor das constantes A e B, que são a soma das constantes “A₁ + A₂” e “B₁ + B₂”, respectivamente. Define-se então a soma A + B, como sendo:

Equação 46

$$A + B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R'_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R'_2} \right)$$

Os raios R₁ e R'₁ são os principais raios de curvatura do corpo 1. Eles representam o valor máximo e mínimo para qualquer combinação de raios de curvatura existentes no corpo. O mesmo acontece para os raios R₂ e R'₂ do corpo 2. A tensão depende diretamente dos raios de curvatura das superfícies em contato. Logo, estes devem ser determinados com precisão.

Caso os eixos coordenados de cada um dos corpos estejam inclinados um em relação ao outro de um ângulo θ, define-se a diferença “B - A”, como sendo:

Equação 47

$$B - A = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R'_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R'_2} \right)^2 + 2 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R'_1} \right) \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R'_2} \right) \cos 2\theta \right]^{1/2}$$

onde θ é o ângulo entre os planos que contém os raios R₁ e R₂.

Para manter a notação original, as equações 45 e 46 são chamadas de A e B, respectivamente.

Assim:

Equação 48

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R'_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R'_2} \right)$$

Equação 49

$$B = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R'_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R'_2} \right)^2 + 2 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R'_1} \right) \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R'_2} \right) \cos 2\theta \right]^{1/2}$$

2.4.1.3. CONTATO RODA-TRILHO

De acordo com Campos (1994), para o caso específico de contato entre uma roda e um trilho, o raio R_1 é definido como sendo o raio principal de roda, correspondente ao seu diâmetro, como mostra a Figura 35(a). O raio R'_1 é o raio ortogonal ou de curvatura da roda. Este raio está num plano perpendicular ao raio R_1 , como mostra a Figura 35(b). Para os casos analisados, o raio R'_1 é infinito (perfil de roda cônico). Entretanto, tão logo ocorra o desgaste da roda, R'_1 terá um valor finito. O raio R_2 corresponde ao raio do boleto do trilho e está no mesmo plano do raio R'_1 , como mostra a Figura 35(b). Esse raio tem aproximadamente $10''$ (254 mm – trilho TR-57). O raio R'_2 é o raio descrito pelo trilho no seu comprimento. Como este é reto, esse raio terá valor infinito, como mostra a Figura 35(a). Por convenção, os raios de curvatura são considerados positivos se os seus centros estiverem dentro dos respectivos corpos. Caso contrário, serão negativos.

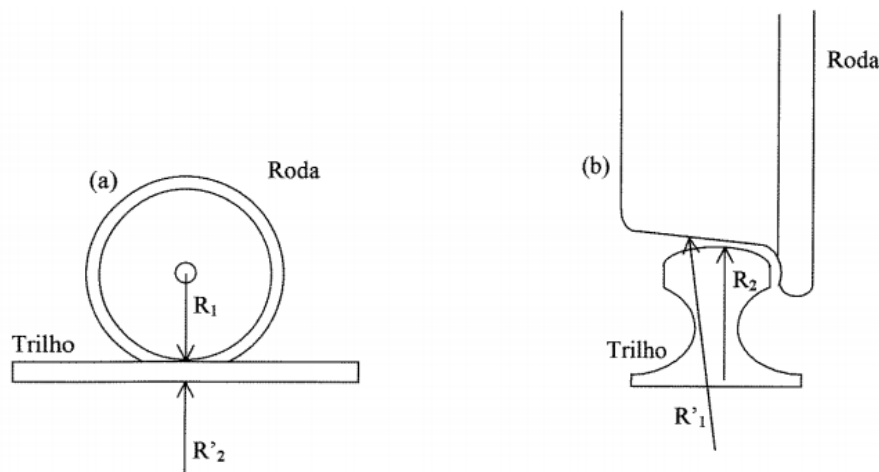


Figura 35: Contato roda-trilho. (a) vista lateral e (b) vista longitudinal

Fonte: Campos, 1994

Para determinação dos valores dos semi eixos a e b da elipse de contato, é necessário determinar duas constantes geométricas, m_1 e m_2 , que são funções do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson da roda e do trilho. Essas constantes são dadas pela equação 49.

Equação 50

$$m_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \qquad m_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$$

onde E_1 e E_2 são módulos de elasticidade e ν_1 e ν_2 são os coeficientes de Poisson da roda e do trilho, respectivamente.

Os valores dos semi eixos a e b da elipse de contato são dados pelas equações 50 e 51:

Equação 51

$$a = K_a \sqrt[3]{\frac{3N(m_1 + m_2)}{4A}}$$

Equação 52

$$b = K_b \sqrt[3]{\frac{3N(m_1 + m_2)}{4A}}$$

Onde A é a constante dada pela equação 47.

K_a e K_b são constantes adaptadas por Hertz que dependem indiretamente dos valores de A e B calculados pelas equações 47 e 48. Define-se então um parâmetro ϕ , função das constantes A e B , como mostra a equação 52.

Equação 53

$$\Phi = \cos^{-1}\left(\frac{B}{A}\right)$$

Os valores de K_a e K_b são função do parâmetro ϕ e podem ser obtidos através da Tabela 6:

Tabela 6: Coeficientes Ka e Kb em função de ϕ

Φ	K_a	K_b
0	∞	0
0,5	61,40	0,102
01	36,89	0,131
1,5	27,48	0,152
02	22,26	0,169
03	16,50	0,196
04	13,31	0,219
06	9,79	0,255
08	7,86	0,285
10	6,612	0,319
20	3,778	0,408
30	2,731	0,493
35	2,397	0,530
40	2,136	0,567
45	1,926	0,604
50	1,754	0,641
55	1,611	0,678
60	1,486	0,717
65	1,378	0,759
70	1,284	0,802
75	1,202	0,846
80	1,128	0,893
85	1,061	0,944
90	1	1

Fonte: Campos, 1994

De acordo com Campos (1994), a pressão máxima no contato será na direção de aplicação do carregamento (vertical) e estará localizada na superfície e no centro da elipse de contato. À medida que o ponto analisado se desloca para as bordas da elipse, o valor da pressão diminui até atingir o valor nulo. O valor da pressão máxima é dado pela equação 53.

Equação 54

$$P_{\max} = \frac{3N}{2\pi ab}$$

A pressão média aplicada na região de contato será o próprio carregamento vertical dividido pela área da elipse de contato, como mostra a equação 54:

Equação 55

$$P_m = \frac{N}{\pi ab}$$

A distribuição da pressão ao longo da área de contato foi determinado por Hertz e é dada pela equação 55:

Equação 56

$$p = P_{\max} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}$$

De acordo com Campos (1994), as tensões normais σ_x e σ_y variam ao longo dos semi eixos da elipse de contato e σ_z com a profundidade. Essas tensões são todas compressivas e tem valor máximo na superfície de contato. Também diminuem rapidamente com a profundidade e com o afastamento de centro da elipse. As tensões σ_x , σ_y e σ_z também correspondem as tensões principais σ_1 , σ_2 e σ_3 , respectivamente.

- ao longo do eixo x ($y=0$) as tensões são dadas por:

Equação 57

$$\sigma_x = P_{\max} \left[-2\nu\gamma - (1-2\nu) \frac{b}{ae^2} \left\{ \left(1 - \frac{b\gamma}{a} \right) - \frac{x}{ae} \tanh^{-1} \left(\frac{ex}{a+b\gamma} \right) \right\} \right]$$

Equação 58

$$\sigma_y = P_{\max} \left[-2\nu\gamma - (1-2\nu) \frac{b}{ae^2} \left\{ \left(\frac{a\gamma}{b} - 1 \right) + \frac{x}{ae} \tanh^{-1} \left(\frac{ex}{a+b\gamma} \right) \right\} \right]$$

- ao longo do eixo y ($x=0$) as tensões são dadas por:

Equação 59

$$\sigma_x = P_{\max} \left[-2\nu\gamma - (1-2\nu) \frac{b}{ae^2} \left\{ \left(1 - \frac{b\gamma}{a} \right) - \frac{y}{ae} \tan^{-1} \left(\frac{aey}{b(b+a\gamma)} \right) \right\} \right]$$

Equação 60

$$\sigma_y = P_{\max} \left[-2\nu\gamma - (1-2\nu) \frac{b}{ae^2} \left\{ \left(\frac{a\gamma}{b} - 1 \right) + \frac{y}{ae} \tan^{-1} \left(\frac{aey}{b(b+a\gamma)} \right) \right\} \right]$$

A tensão na direção vertical é dada pela equação:

Equação 61

$$\sigma_z = P_{\max} \left[-\frac{b}{ae^2} \left\{ \left(1 - \frac{b^2 + z^2}{a^2 + z^2} \right) \left(\frac{a^2 + z^2}{b^2 + z^2} \right)^{1/2} \right\} \right]$$

Onde a excentricidade da elipse dada pela equação a seguir e y um parâmetro geométrico relacionado à coordenada do ponto no plano, dado pela equação 62:

Equação 62

$$e = \left(1 - \frac{b^2}{a^2} \right)^{1/2}$$

Equação 63

$$\gamma = \left\{ 1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 - \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right\}^{1/2}$$

Para o caso de movimento angular do rodeiro, as direções principais deixam de coincidir com os eixos x , y e z momentaneamente. O valor máximo das tensões normais é obtido na superfície ($z=0$) e no centro da área de contato ($x=y=0$), como mostram as equações 63, 64 e 65:

Equação 64

$$\sigma_x = - \left[2\nu + (1 - 2\nu) \frac{b}{a + b} \right] P_{\max}$$

Equação 65

$$\sigma_y = - \left[2\nu + (1 - 2\nu) \frac{a}{a + b} \right] P_{\max}$$

Equação 66

$$\sigma_z = -P_{\max}$$

A tensão de cisalhamento τ_{xz} superficial ($z=0$) tem seu maior valor dado pela equação 66:

Equação 67

$$\tau'_{xz} = \frac{|\sigma_x| - |\sigma_z|}{2}$$

De acordo com CAMPOS (1994), a máxima tensão de cisalhamento geralmente ocorre um ponto abaixo da superfície de contato. Esse valor de profundidade depende da razão entre os semi eixos a e b da elipse de contato. O valor dessa razão é dado pela equação a seguir:

Equação 68

$$\tau_{xz} = 0,34 P_{\max}$$

2.4.1.4. COEFICIENTES DE ATRITO

Os coeficientes de atrito para superfícies secas (atrito seco) dependem dos materiais que escorregam entre si e do acabamento superficial das superfícies. Com lubrificação limite, os coeficientes dependem tanto dos materiais e condições das superfícies como dos lubrificantes empregados. Coeficientes de atrito são sensíveis à poeira e umidade do ar, filmes óxidos, acabamento superficial, velocidade de escorregamento, temperatura, vibração, e a extensão de contaminação. Em muitos casos, o grau de contaminação é talvez a variável mais importante. Por exemplo, nas Tabelas 7, 8, 9 e 10, são listados valores do coeficiente de atrito estático de aço com aço e, dependendo do grau de contaminação das superfícies, o coeficiente de atrito varia de infinito a 0,013, Tabela 7.

Tabela 7: Coeficiente de atrito estático a temperatura ambiente

		Estático		Dinâmico	
		Seco	Lub. Limite	Seco	Lub. Limite
1	Aço Duro em Aço Duro	0,78	0,11 (a)	0,42	0,029
2			0,23 (b)		0,081 (c)
3			0,15 (c)		0,080 (l)
4			0,11 (d)		0,058 (j)
5			0,0075 (p)		0,084 (d)
6			0,0052 (h)		0,105 (k)
7					0,096 (l)
8					0,108(m)
9					0,12 (a)
10	Aço Doce em Aço Doce	0,74		0,57	0,09 (a)
11					0,19 (u)
12	Aço Duro em Grafite	0,21	0,09 (a)	0,33	
13	Aço Duro em Babbit (ASTM Nº 1)	0,70	0,23	0,33	0,16 (b)
14			0,15 (c)		0,06 (c)
15			0,08 (d)		0,11 (d)
16			0,085 (e)		
17	Aço Duro em Babbit (ASTM Nº 8)	0,42	0,17 (b)		0,14(b)
18			0,11 (c)		0,065 (c)
19			0,09 (d)		0,07(d)
20			0,08 (e)		0,08 (h)
21	Aço Duro em Babbit (ASTM Nº 10)		0,25 (b)		0,13 (b)
22			0,12 (c)		0,06 (c)
23			0,10 (d)		0,055 (d)
24			0,11(e)		
25	Aço Doce em Cádmió Prata				0,097 (f)
26	Aço Doce / Bronze Fosforoso			0,34	0,173 (f)
27	Aço Doce em Cobre Chumbo				0,145 (f)
28	Aço Doce em Ferro Fundido		0,183 (c)	0,23	0,133 (f)
29	Aço Doce em Chumbo	0,95	0,5 (f)	0,95	0,3 (f)
30	Níquel em Aço Doce			0,64	0,178 (x)

31	Alumínio em Aço Doce	0,61		0,47	
32	Magnésio em Aço Doce			0,42	
33	Magnésio em Magnésio	0,60	0,08 (y)		
34	Teflon em Teflon	0,04			0,04 (f)
35	Teflon em Aço	0,04			0,04 (f)
36	WC em WC	0,2	0,12 (a)		
37	WC em Aço	0,5	0,08 (a)		
38	WC em Cobre	0,35			
39	WC em Ferro	0,8			
40	Carboneto Ligado em Cobre	0,35			
41	Carboneto Ligado em Ferro	0,8			
42	Cádmio em Aço Doce			0,46	
43	Cobre em Aço Doce	0,53		0,36	0,18 (a)
44	Níquel em Níquel	1,10		0,53	0,12 (w)
45	Latão em Aço Doce	0,51		0,44	
46	Latão em Ferro Fundido			0,30	
47	Zinco em Ferro Fundido	0,85		0,21	
48	Magnésio em Ferro Fundido			0,25	
49	Cobre em Ferro Fundido	1,05		0,29	
50	Estanho em Ferro Fundido			0,32	
51	Chumbo em Ferro Fundido			0,43	
52	Alumínio em Alumínio	1,05		1,4	
53	Vidro em Vidro	0,94	0,01 (p)	0,4	0,09 (a)
54			0,005 (q)		0,116 (v)
55	Carbono em Vidro			0,18	
56	Garnet em Aço Doce			0,39	
57	Vidro em Níquel	0,78		0,56	
58	Cobre em Vidro	0,68		0,53	
59	Ferro Fundido/ Ferro Fundido	1,10		0,15	0,07 (d)
60					0,064 (n)
61	Bronze em Ferro Fundido			0,22	0,077 (n)
62	Madeira / Madeira (// à Fibra)	0,62		0,48	0,164 (r)
63					0,067 (s)
64	Madeira / Madeira (⊥ à fibra)	0,54		0,32	0,072 (s)
65	Couro em Madeira (// à fibra)	0,61		0,52	
66	Ferro Fundido em Madeira			0,49	0,075 (n)
67	Couro em Ferro Fundido			0,56	0,36 (t)
68					0,13 (n)
69	Plástico Laminado em Aço			0,35	0,05 (t)
70	Borracha macia apoiada em Aço				0,05 (t)

Fonte: Stoeterau, 2004

Alguns coeficientes de atrito de escorregamento ou dinâmico para casos especiais são definidos abaixo, de acordo com Stoeterau (2004):

i. Coeficiente de atrito entre rodas de aço e trilhos de trens:

Tabela 8: Coeficiente de atrito em rodas e trilhos de trem

Velocidade(Km/h)	Arrancada	11	22	44	66	88	97
μ_d	0,242	0,088	0,072	0,07	0,057	0,038	0,027

Fonte: Stoeterau, 2004

ii. Coeficientes de atrito para sapatas de freio de trem em rodas de aço:

Para freios de ferro fundido, Galton e Westingamm verificaram que μ_d diminui rapidamente com a velocidade do aro da roda; μ_d também diminui rapidamente com o tempo, em função do aumento da temperatura da sapata.

Tabela 9: Coeficiente de atrito entre sapatas de freio e rodas

Velocidade (Km/h)	16	32	48	64	80	96
μ_d quando o freio foi aplicado	0,32	0,21	0,18	0,13	0,1	0,06
após 6 segundos	0,21		0,11	0,1	0,07	0,05
após 12 segundos		0,13	0,10	0,08	0,06	0,05

Fonte: Stoeterau, 2004

iii. Relação de coeficientes de atrito e velocidade:

Schmidt e Schrader confirmaram a diminuição do coeficiente de atrito com o aumento da velocidade da roda, mas não constataram queda do atrito após uma prolongada aplicação dos freios, embora tenham verificado um pequeno decréscimo de μ_d com a elevação da pressão da sapata na roda. Suas medições são dadas a seguir:

Tabela 10: Relação entre coeficientes de atrito e velocidade

Velocidade (Km/h)	32	48	64	80	96
Coefficiente de atrito (μ_d)	0,25	0,23	0,19	0,17	0,16

Fonte: Stoeterau, 2004

2.4.2. LUBRIFICADO

2.4.2.1. INTRODUÇÃO

De acordo com Campos (1994), uma forma de reduzir o atrito, entre peças mecânicas em movimento relativo, é sem dúvida, a lubrificação. Este possibilita a formação de um filme lubrificante que separa os veios dos seus apoios. Se a espessura do filme for suficiente para separar completamente as duas superfícies, então, as forças de atrito serão apenas devidas as tensões de corte no filme lubrificante, as quais são consideravelmente inferiores às do mesmo contato sem lubrificante.

2.4.2.2. A EQUAÇÃO DE REYNOLDS

A equação de Reynolds descreve o escoamento do fluido lubrificante entre as superfícies dos dois sólidos, tendo em conta a geometria das próprias superfícies, a pressão no filme e as propriedades físicas do fluido lubrificante.

Osborne Reynolds (1886) apresentou soluções adicionais para o mancal de Beauchamps Tower, apresentou soluções para situações que envolvem o problema de filme espremido (squeeze film). Também desenvolveu a noção de que mancais radiais tem folga, mesmo que micrométricas, apresentou preocupação com o problema de cavitação em mancais e demonstrou a dependência da viscosidade com a temperatura, Figura 36.

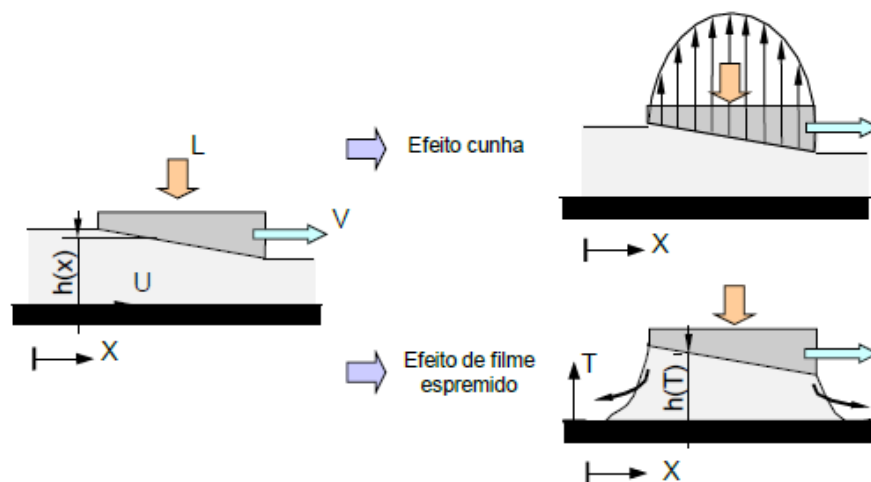


Figura 36: Efeito cunha e efeito de filme espremido

Fonte: Stoeterau, 2004

A partir destas considerações, Reynolds estabelece as bases da lubrificação a filme fluido. Reynolds explicou e formulou matematicamente o problema da lubrificação hidrodinâmica, segundo a equação 68.

Equação 69

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 6 \mu \frac{\partial}{\partial x} (U * h) + 2 \mu \frac{\partial h}{\partial t}$$

Equação 70

$$6 \mu \frac{\partial}{\partial x} (U * h) \text{ representa o efeito cunha, e}$$

Equação 71

$$2 \mu \frac{\partial h}{\partial t} \text{ representa o efeito de filme espremido.}$$

2.4.2.3. DESGASTE NA CONDIÇÃO LUBRIFICADA

De acordo com Stoeterau (2004), teoricamente o desgaste adesivo não ocorre quando as superfícies em escorregamento são separadas por um filme completo de fluido, como na lubrificação hidrostática, na lubrificação hidrodinâmica ou na lubrificação elasto hidrodinâmica. Praticamente, desgaste pode ocorrer nos arranques e nas paradas quando ocorre contato momentâneo motivado por vibrações, ou quando partículas sólidas penetram no filme de fluido. Entretanto, valores de desgaste podem ser obtidos nos arranques e nas paradas se os percursos percorridos durante a lubrificação limite puderem ser determinados.

Os lubrificantes mantêm sua efetividade somente enquanto a temperatura na interface for menor do que a temperatura de transição, valor específico de temperatura característica desse lubrificante. Se essa temperatura é excedida, a qualidade do lubrificante cai rapidamente.

Com temperatura ainda mais elevada, deve haver uma deterioração adicional na lubrificação, passando à condição não lubrificada. Para um lubrificante mineral típico, a temperatura de transição é cerca de 1500°C, enquanto que para um bom lubrificante sintético chega a 210°C. Para outros tipos de lubrificantes essa temperatura varia bastante. Nos lubrificantes pobres é, geralmente, 50°C somente, ou esse valor acima do ponto de solidificação de lubrificante, enquanto com lubrificantes bons pode estar 200°C acima desse ponto.

2.5. CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Pelo apresentado na revisão bibliográfica pode-se concluir que:

- i. As formas e mecanismos de desgaste a que estão sujeitas as rodas ferroviárias empregadas no Heavy Haul (tráfego pesado) são: desgaste por adesão (deslizamento) com diferentes mecanismos tais como deformação plástica, fadiga de contato, fadiga termomecânica; desgaste por oxidação e adesão com formação de partículas de desgaste duras ou encruadas durante o processo; desgaste abrasivo a dois e três corpos;
- ii. Os materiais empregados em rodas são na grande maioria aços perlíticos, com uma camada em torno de 8mm de bainita, que passam por um tratamento térmico de austenitização, seguido de resfriamento por spray na pista de rolamento da roda com objetivo de conferir as tensões compressivas à mesma e adequar a microestrutura e a dureza. Em seguida esses aços passam por um revenimento para alívio de tensões;
- iii. As tensões de contato envolvidas no par roda-trilho seguem modelo de Hertz para contato elástico. Porém, as altas cargas envolvidas sugerem também um contato plástico, visto que ocorrem deformações plásticas na pista de rolamento da roda.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Processos de Fabricação, Laboratório de Metalografia e Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras ensaiadas foram retiradas de uma roda CK36, classe C nova. A Figura 37 mostra esquematicamente o local de retirada das amostras. Percebe-se pela Figura 37 que as mesmas foram retiradas há aproximadamente 10mm da pista de rolamento. Foi retirado um bloco com cerca de 15mm de espessura, 100mm de largura e 140mm de comprimento. Os corpos de prova foram retirados desta posição uma vez que, tipicamente esta região da roda é constituída predominantemente de perlita fina.

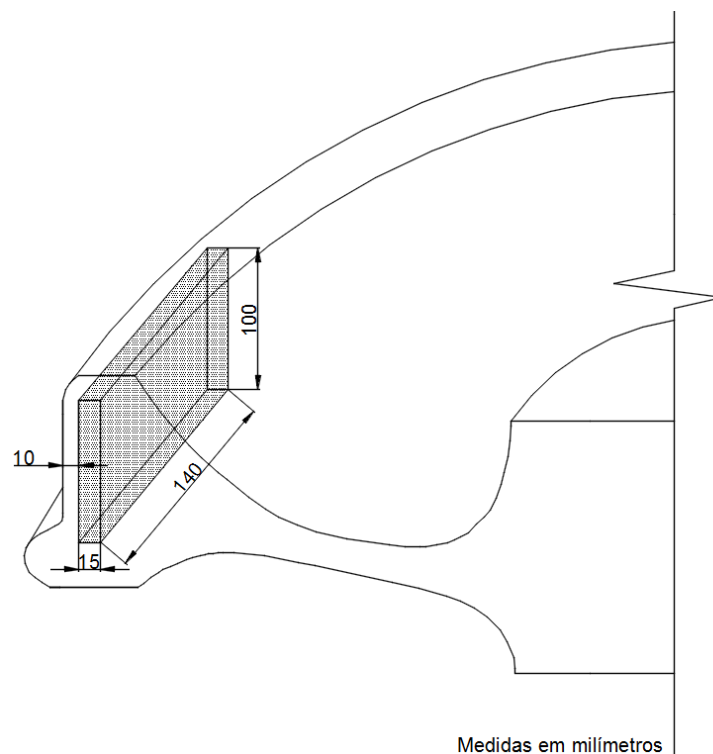


Figura 37: Desenho esquemático de uma seção de roda CK36, destacando as dimensões e o local de retirada das amostras (100 x 140 x 15) mm

Fonte: O autor

A Tabela 11 mostra a composição química das microestruturas (bainita e perlita) que foram estudadas no presente trabalho.

Tabela 11: Composição química das microestruturas via Espectrômetro de Emissão Óptica Marca ARL, modelo 3460 - ASTM E415

Elementos	Identificação das Amostras	
	Perlita	Bainita
Carbono (%)	0,763	0,757
Manganês (%)	0,841	0,850
Silício (%)	0,903	0,908
Fósforo (%)	0,014	0,014
Enxofre (%)	0,016	0,018
Cromo (%)	0,095	0,096
Molibdênio (%)	0,031	0,032
Níquel (%)	0,021	0,022
Alumínio (%)	0,004	0,003
Cobre (%)	0,033	0,034
Boro (%)	0,0003	0,0003
Vanádio (%)	0,0018	0,0020
Cobalto (%)	0,0068	0,0069

Fonte: O autor

Todos os cortes foram realizados em uma serra de fita com lubrificação conforme a Figura 38. Portanto não ocorreu nenhum aquecimento nos corpos de prova.



Figura 38: Foto da serra de fita utilizada para os cortes na roda

Fonte: O autor

Em seguida, foram usinados quatro corpos de prova, conforme modelo da Figura 39:



Figura 39: Foto do corpo de prova

Fonte: O autor

3.2. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO

As seções a seguir apresentam todos os procedimentos adotados para a preparação dos corpos de prova.

3.2.1. TRATAMENTO TÉRMICO - AUSTÊMPERA

Tendo em vista que o objetivo de comparar duas microestruturas (perlita fina e bainita) e sabendo que o tarugo retirado da roda ferroviária era constituído predominantemente de perlita fina, foi necessário realizar um tratamento térmico de austêmpera. Desta forma, 3 corpos de prova foram austemperados e um desses corpos de prova foi cortado para certificar a eficácia da austêmpera.

Para a austêmpera empregou-se como refrigerante um banho de chumbo fundido a 380° C. Os corpos de prova foram austenitizados a uma temperatura de 900° C por 15 minutos e em seguida foram submersos no banho de chumbo por 5 minutos, tempo suficiente para que ocorresse a transformação microestrutural (SILVA; MEI, 1998). Em seguida, os corpos de prova foram resfriados em água à temperatura ambiente. A Figura 40 ilustra esquematicamente o ciclo de tratamento térmico.

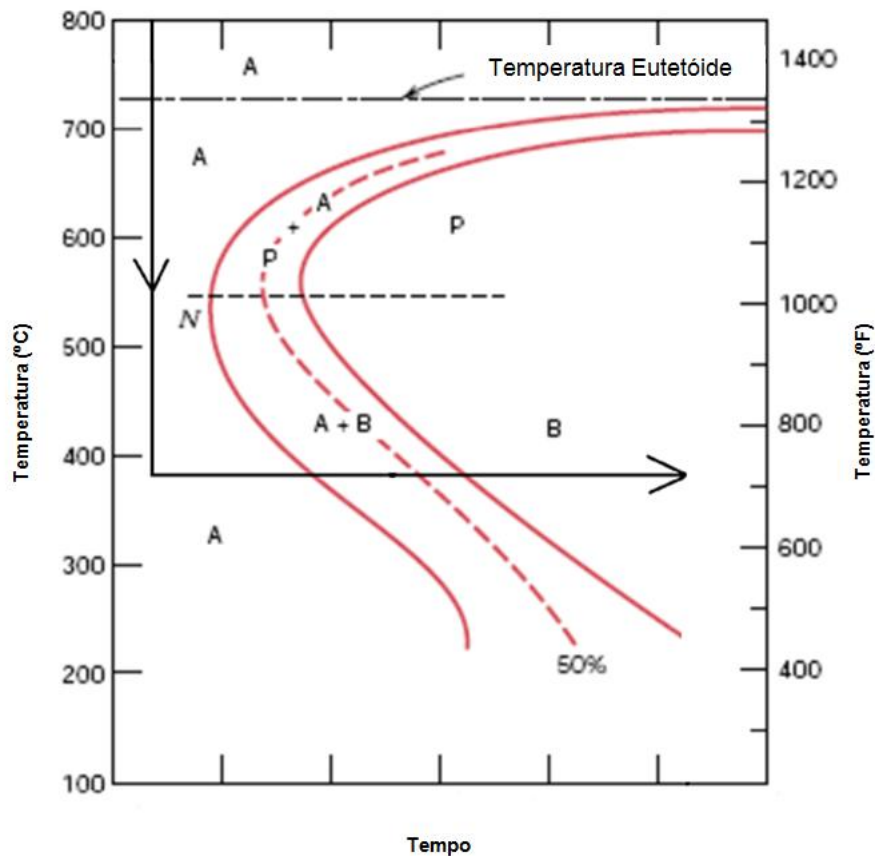


Figura 40: Desenho esquemático do ciclo de tratamento térmico

Fonte: Boyer, 1977 (Adaptado)

De acordo com Canale (2016), à medida que a temperatura de transformação é reduzida após a formação de perlita fina, um novo microconstituente é formado: bainita. Como ocorre na perlita, a microestrutura da bainita consiste nas fases ferrita e cementita, mas os arranjos são diferentes.

Para temperaturas entre 300° C e 540° C, a bainita se forma como uma série de agulhas de ferrita separadas por partículas alongadas de cementita, conforme mostra a Figura 41.

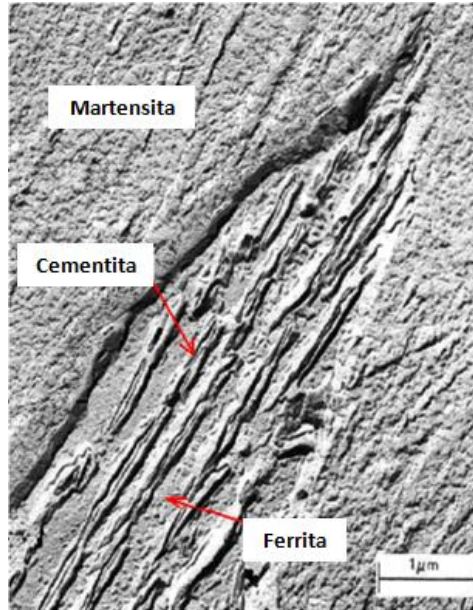


Figura 41: Microestrutura bainítica

Fonte: Bertranda, 2014 (Adaptado)

Após o polimento dos corpos de prova, foi realizado o ataque sobre a superfície polida com solução nital a 3%, composto de 97% de álcool etílico e 3% de ácido nítrico concentrado, por um período de cinco segundos, com intuito de revelar a microestrutura da superfície da amostra. Os corpos de prova foram então, levados para o microscópio Olympus, modelo BX51M, afim de analisar suas respectivas microestruturas, apresentadas nas Figuras 42 à 57.

i. Corpo de prova 1: Amostra 1 - Perlita (sem tratamento térmico).

A Figura 42 mostra a microestrutura da perlita com aumento 100 vezes:

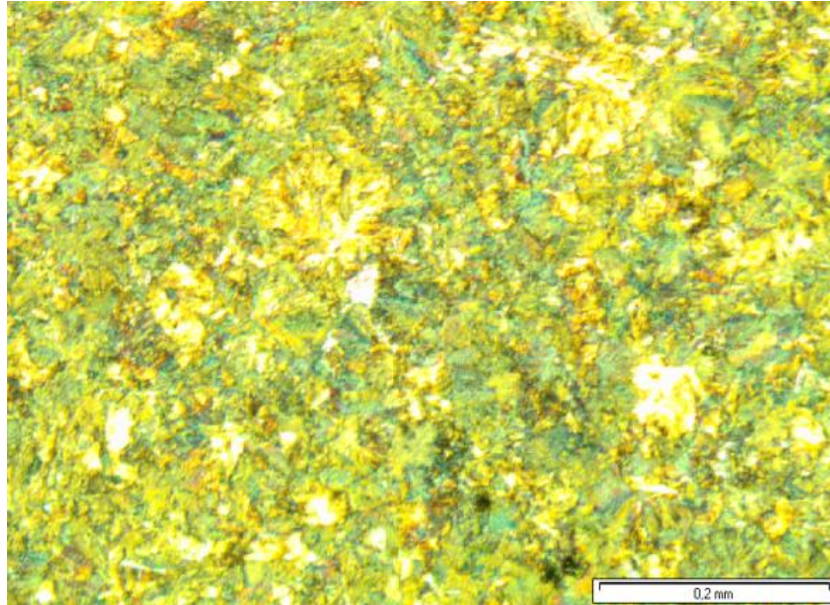


Figura 42: Fotomicrografia da amostra perlítica 1 com aumento de 100 vezes

Fonte: O autor

A Figura 43 mostra a microestrutura da perlita com aumento 200 vezes:

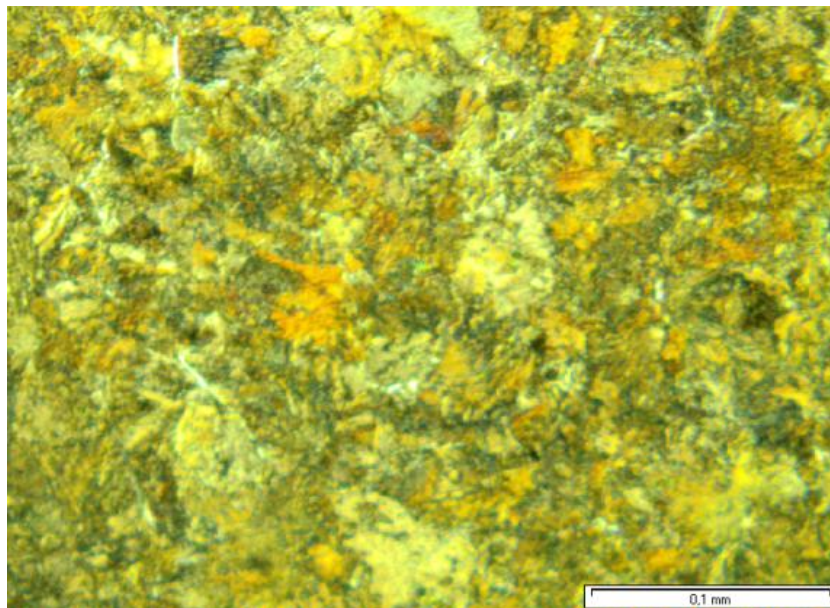


Figura 43: Fotomicrografia da amostra perlítica 1 com aumento de 200 vezes

Fonte: O autor

A Figura 44 mostra a microestrutura da perlita com aumento 500 vezes:

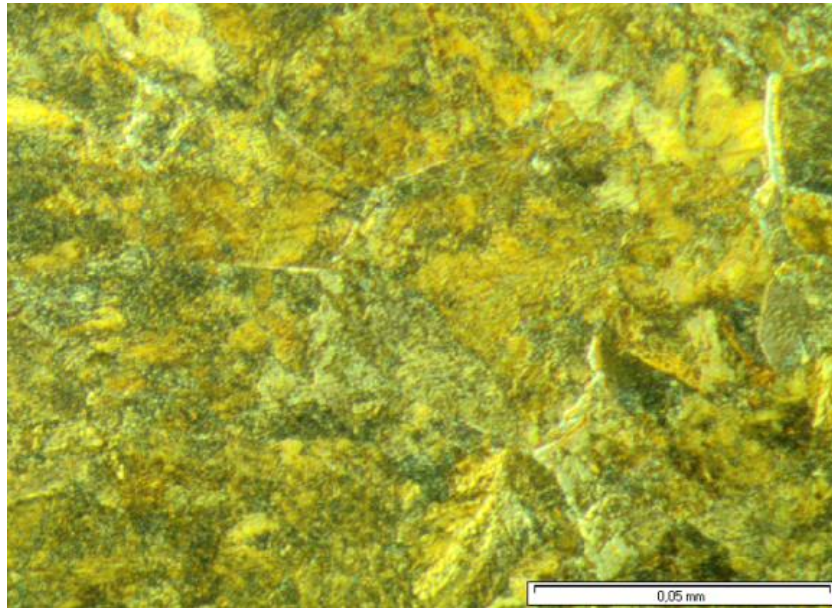


Figura 44: Fotomicrografia da amostra perlítica 1 com aumento de 500 vezes

Fonte: O autor

A Figura 45 mostra a microestrutura da perlita com aumento 1000 vezes:

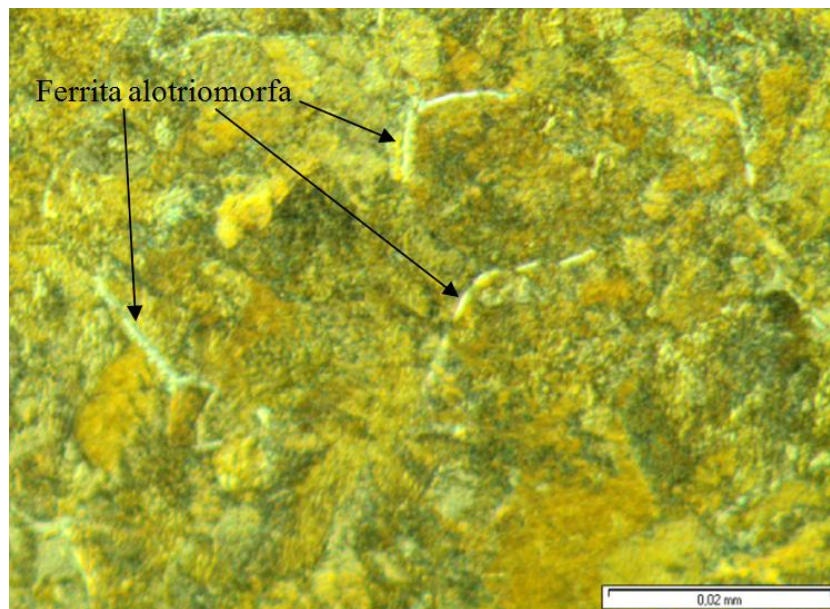


Figura 45: Fotomicrografia da amostra perlítica 1 com aumento de 1000 vezes

Fonte: O autor

ii. Corpo de prova 2: Amostra 2 - Perlita (sem tratamento térmico).

A Figura 46 mostra a microestrutura da perlita com aumento 100 vezes:

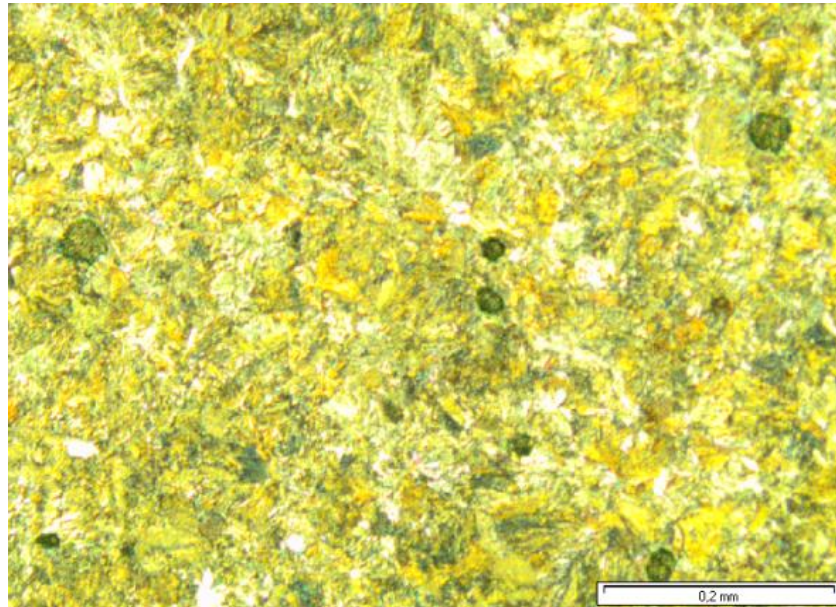


Figura 46: Fotomicrografia da amostra perlítica 2 com aumento de 100 vezes

Fonte: O autor

A Figura 47 mostra a microestrutura da perlita com aumento 200 vezes:

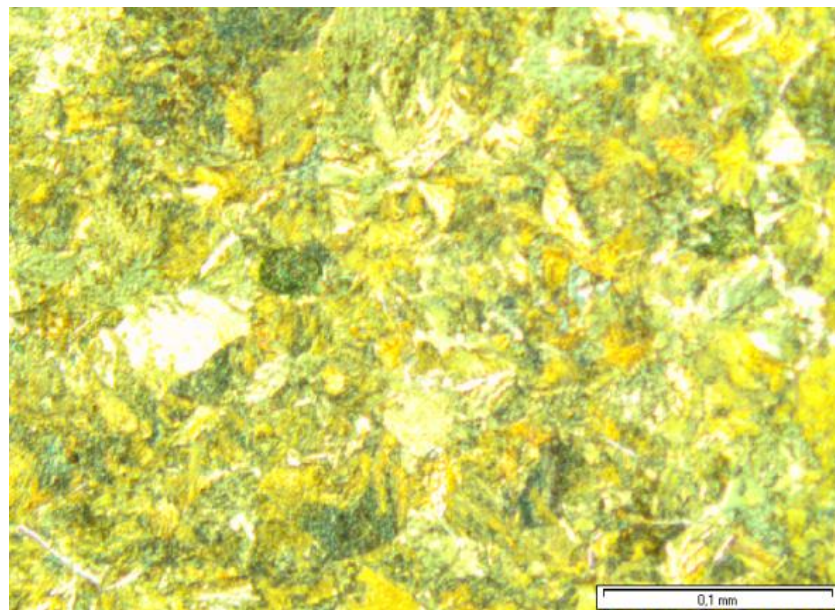


Figura 47: Fotomicrografia da amostra perlítica 2 com aumento de 200 vezes

Fonte: O autor

A Figura 48 mostra a microestrutura da perlita com aumento 500 vezes:

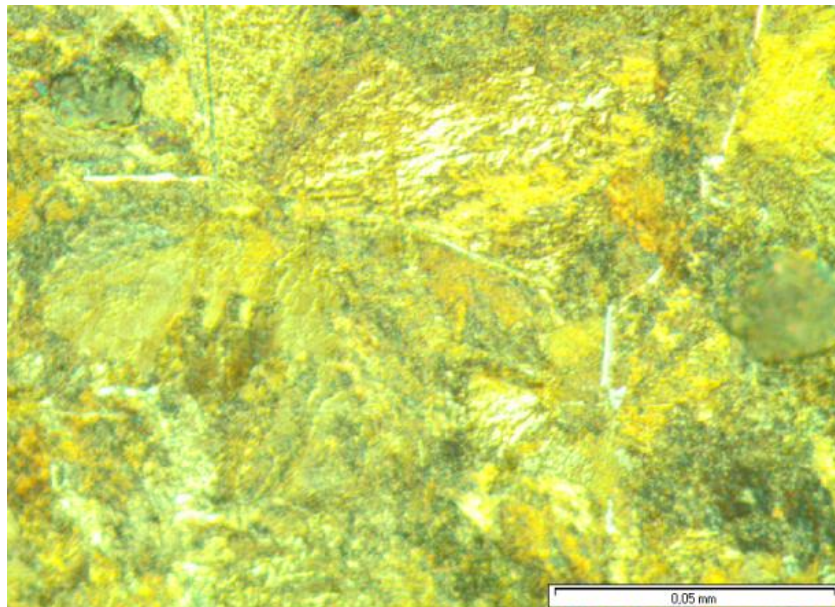


Figura 48: Fotomicrografia da amostra perlítica 2 com aumento de 500 vezes

Fonte: O autor

A Figura 49 mostra a microestrutura da perlita com aumento 1000 vezes:

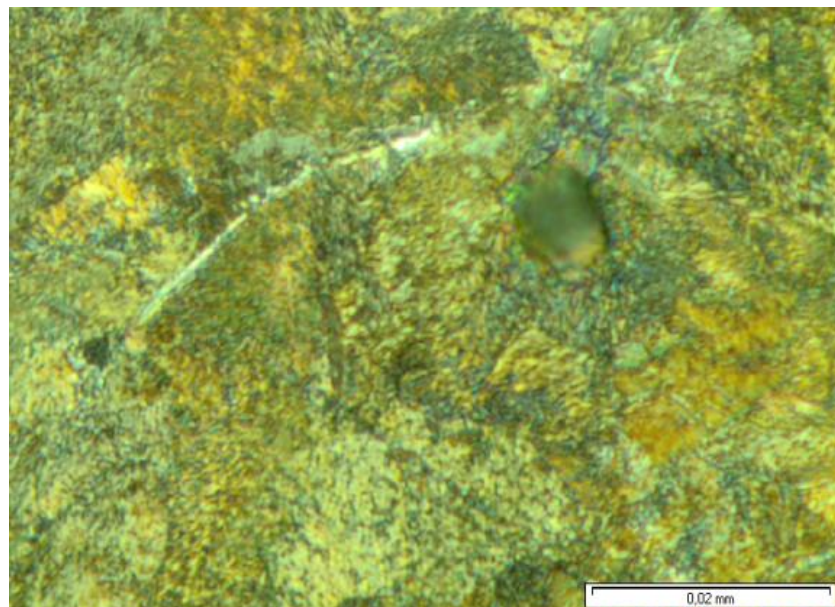


Figura 49: Fotomicrografia da amostra perlítica 2 com aumento de 1000 vezes

Fonte: O autor

iii. Corpo de prova 3: Amostra 1 - Bainita (com tratamento térmico - austêmpera).

A Figura 50 mostra a microestrutura da bainita com aumento 100 vezes:

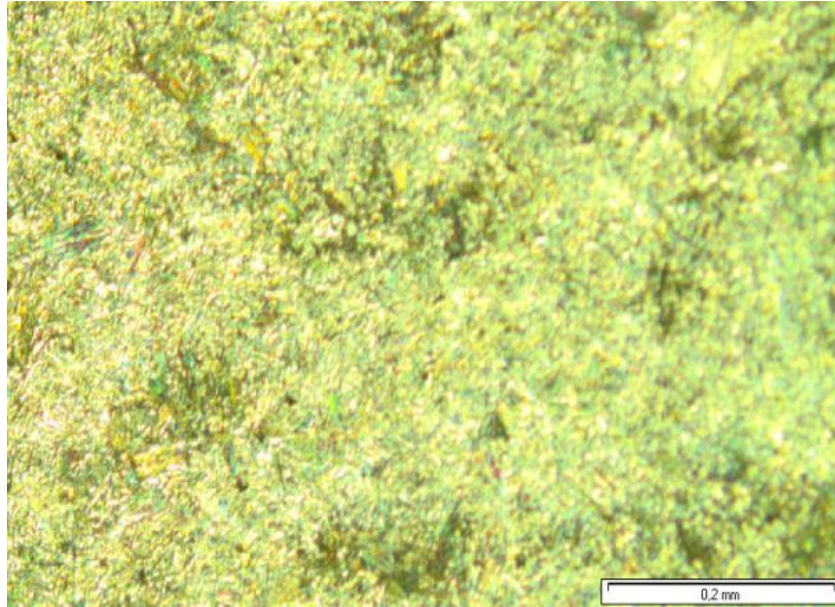


Figura 50: Fotomicrografia da amostra bainítica 1 com aumento de 100 vezes

Fonte: O autor

A Figura 51 mostra a microestrutura da bainita com aumento 200 vezes:

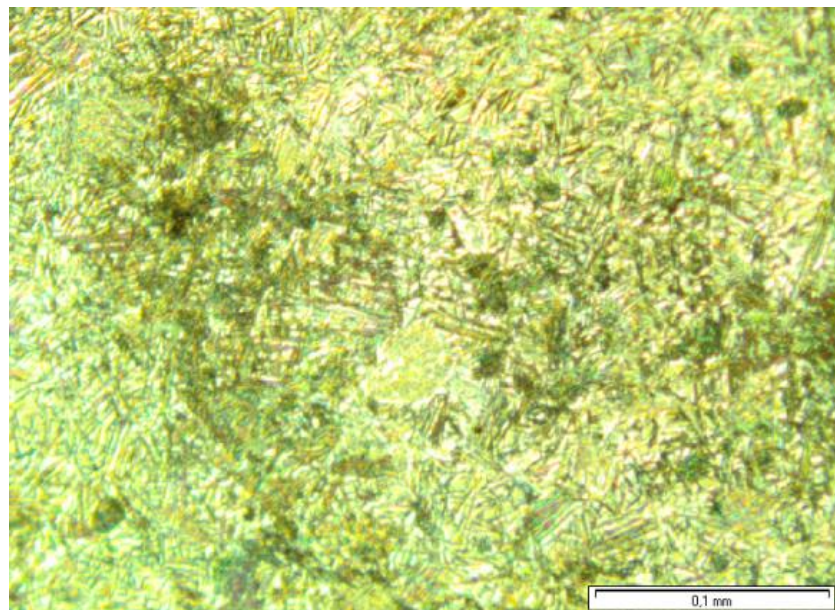


Figura 51: Fotomicrografia da amostra bainítica 1 com aumento de 200 vezes

Fonte: O autor

A Figura 52 mostra a microestrutura da bainita com aumento 500 vezes:

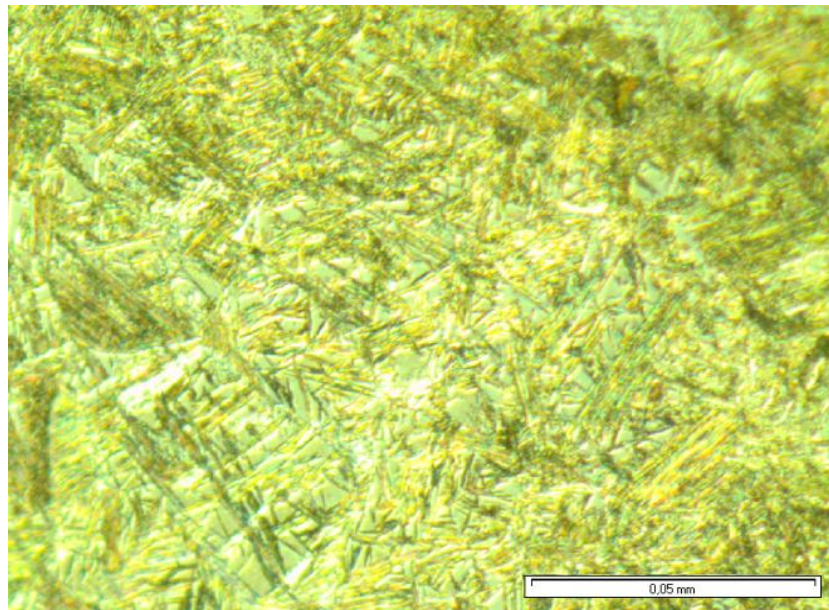


Figura 52: Fotomicrografia da amostra bainítica 1 com aumento de 500 vezes

Fonte: O autor

A Figura 53 mostra a microestrutura da bainita com aumento 1000 vezes:

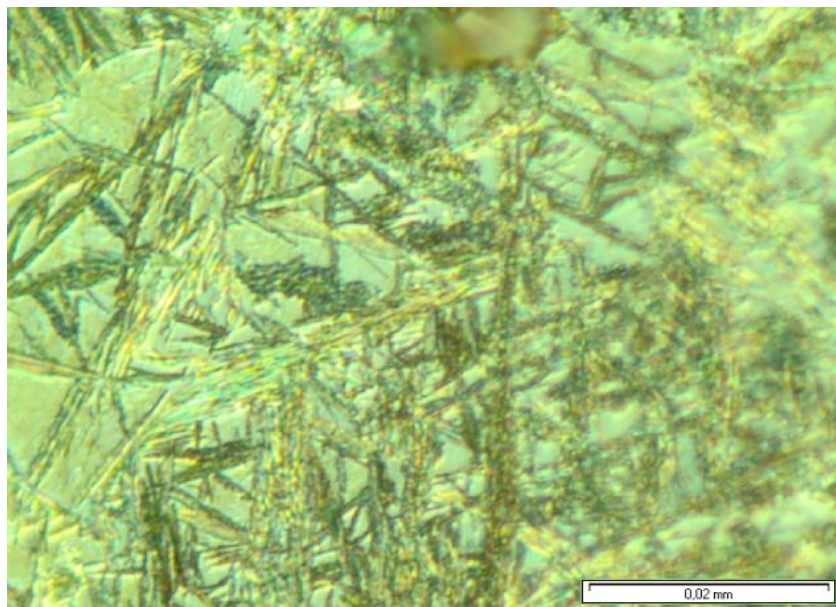


Figura 53: Fotomicrografia da amostra bainítica 1 com aumento de 1000 vezes

Fonte: O autor

iv. Corpo de prova 4: Amostra 2 - Bainita (com tratamento térmico).

A Figura 54 mostra a microestrutura da bainita com aumento 100 vezes:

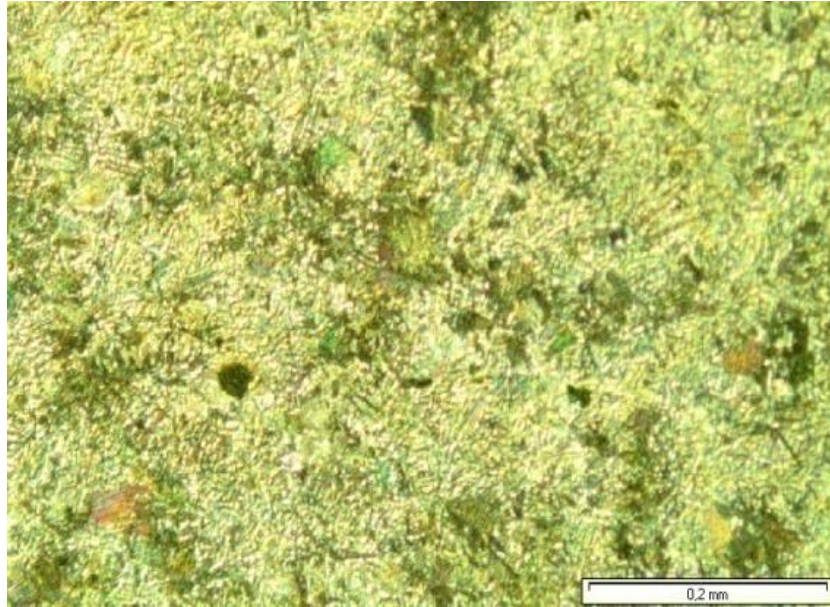


Figura 54: Fotomicrografia da amostra bainítica 2 com aumento de 100 vezes

Fonte: O autor

A Figura 55 mostra a microestrutura da bainita com aumento 200 vezes:

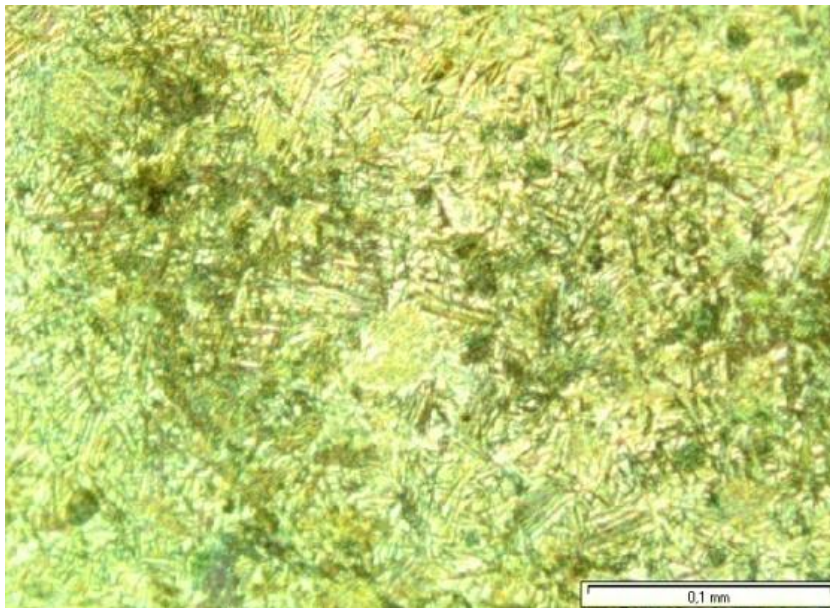


Figura 55: Fotomicrografia da amostra bainítica 2 com aumento de 200 vezes

Fonte: O autor

A Figura 56 mostra a microestrutura da bainita com aumento 500 vezes:

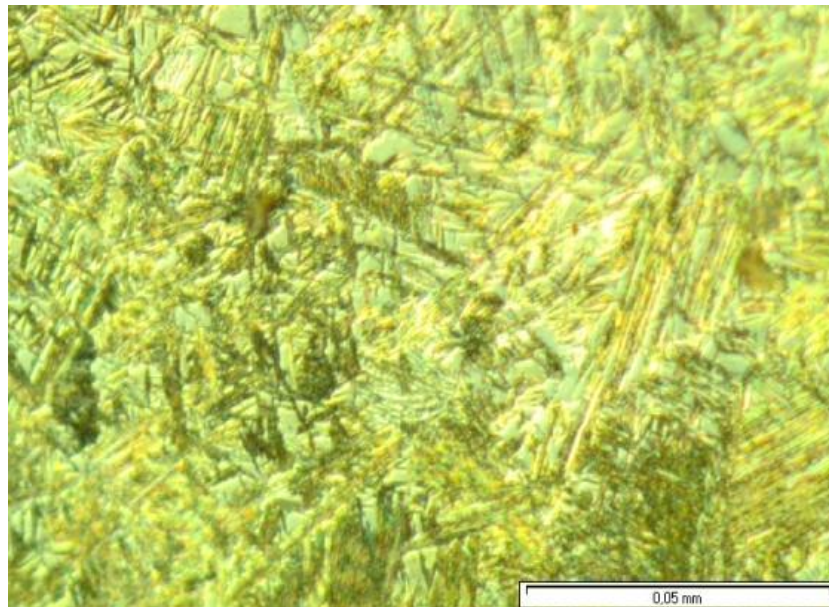


Figura 56: Fotomicrografia da amostra bainítica 2 com aumento de 500 vezes

Fonte: O autor

A Figura 57 mostra a microestrutura da bainita com aumento 1000 vezes:

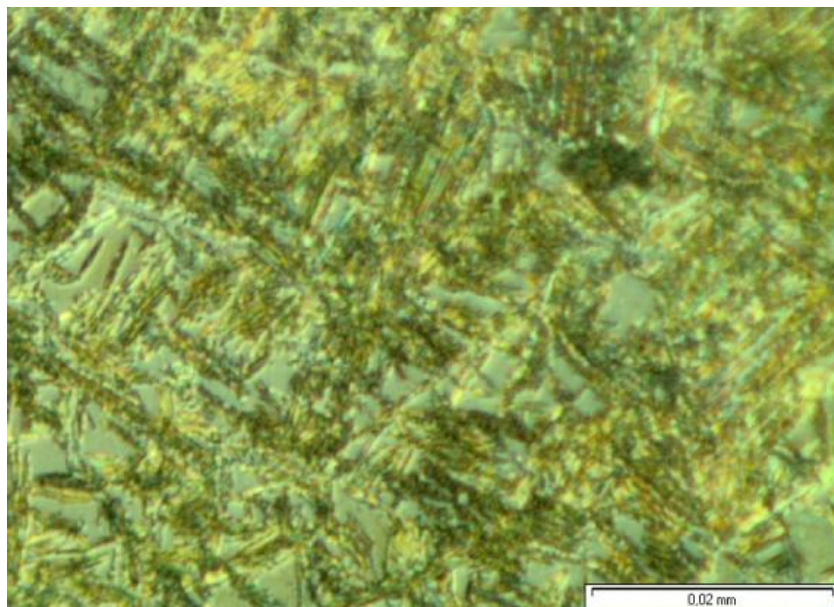


Figura 57: Fotomicrografia da amostra bainítica 2 com aumento de 1000 vezes

Fonte: O autor

3.2.2. ENSAIO DE DUREZA APÓS AUSTÊMPERA

De acordo com Rodrigues (2016), dureza é a propriedade mecânica mais utilizada na especificação de materiais, nos estudos e pesquisa mecânicas e metalúrgicas e na comparação de materiais diversos. Em Mecânica, dureza é a resistência à penetração de um material em outro. Em Usinagem, é a resistência ao corte. Em Mineralogia, é a resistência ao risco de um material sobre o outro. E em Metalurgia, é a resistência à deformação plástica permanente.

A maioria dos ensaios de dureza estáticos consiste na impressão de um pequena marca feita na superfície da peça, pela aplicação de pressão, com uma ponta de penetração. A medida de dureza do material é dada em função das características da marca de impressão e da carga aplicada.

Um dos principais objetivos dos Ensaio de Dureza, além de conhecer a resistência ao desgaste e através de correlações a resistência mecânica, é o controle de qualidade de tratamentos térmicos.

Para realizar o ensaio de dureza foi utilizado um durômetro Equilam, modelo EQTSM, cujos resultados são expostos em dureza Rockwell. Método este obtido por penetração e é considerado não destrutivo.

De acordo com Lopes et al (2008), Rockwell em 1922 elaborou um método de ensaio de dureza que utilizava um sistema de pré-carga. Este método ficou chamado de Ensaio de Dureza Rockwell. Neste método, a carga do ensaio é aplicada em etapas, ou seja, primeiro se aplica uma pré-carga para garantir um contato firme entre o penetrador e o material ensaiado, e depois, se aplica a carga do ensaio propriamente dita.

A leitura do grau de dureza é feita diretamente no mostrador acoplado à máquina de ensaio de acordo com uma escala pré determinada, adequada à faixa de dureza do material. Os penetradores utilizados na máquina de ensaio de dureza Rockwell podem ser do tipo esférico (esfera de aço temperada) ou cônico (cone de diamante com 120° de conicidade).

Inicialmente foi utilizada um penetrador cone de diamante e uma pré carga de 10kgf, tendo em vista a determinação da dureza Rockwell Normal. Sabendo que o material dos corpos de

prova trata-se de aço fundido, tem correspondência no campo de aplicação à uma dureza Rockwell C.

Após a aplicação da pré carga, com o mesmo penetrador cônico, aplica-se uma carga nominal de 150kgf. Depois de aproximadamente 15 segundos, a carga de 150 kgf é retirada. Neste momento, é realizada a leitura da dureza do material diretamente na máquina.

A Figura 58 mostra a vista frontal do durômetro utilizado, bem como a especificação da carga selecionada.



Figura 58: Fotos do durômetro Equilam EQTSM utilizado. (a) Vista geral; (b) Carga selecionada de 150kgf

Fonte: O autor

O resultado de dureza final nos corpos de prova de Perlita e de Bainita é a média de 8 pontos analisados na superfície da peça, cujos valores estão sintetizados na Tabela 12.

Tabela 12: Resultados do Ensaio de Dureza realizados após o tratamento térmico de austêmpera

Ensaio de dureza (depois da austêmpera)		
Medidas	Perlita (HRC)	Bainita (HRC)
1	39	45
2	38	46
3	39	45
4	42	46
5	39	45
6	37	45
7	39	46
8	41	46
Média	39	45

Fonte: O autor

3.2.3. TRATAMENTO TÉRMICO - REVENIMENTO

Tendo em vista o objetivo de comparar duas microestruturas distintas (perlita e bainita), foi fixado uma dureza entre as microestruturas para que seja realizado o ensaio de desgaste, pois conforme Archard (1957) apud Larsen e Basse (1992), a taxa de desgaste varia de forma inversamente proporcional à dureza do material. Para isso, realizou-se o tratamento térmico de revenimento que consiste em reaquecer o corpo de prova a uma temperatura muito inferior à da fase de austenitização.

Nesta etapa objetivou-se diminuir a dureza dos corpos de prova de bainita de 45 HRC para 39 HRC, considerando os valores médios. Para isso, foi utilizado um forno elétrico do Laboratório de Processo de Fabricação configurado para que a temperatura estabilizasse a 480° C. Após atingida a temperatura estabelecida, colocou-se 2 corpos de prova de bainita. Foi colocado no forno também 1 testemunho de perlita para que fosse estudado o comportamento do material durante o revenimento. Todos os materiais permaneceram no forno por 15 minutos e, logo em seguida, foram resfriados com água, para evitar a fragilização no revenido (SILVA; MEI, 1988).

3.2.4. ENSAIO DE DUREZA APÓS O REVENIMENTO

Logo em seguida ao tratamento térmico de revenimento, foi realizado o ensaio de dureza nos 2 corpos de prova de bainita e também no testemunho de perlita, conforme Tabela 13.

Tabela 13: Resultados do Ensaio de Dureza realizados após o tratamento térmico de revenimento

Ensaio de dureza (após o revenimento)		
Medidas	Testemunho Perlita (HRC)	Bainita (HRC)
1	38	39
2	39	39
3	40	40
4	37	38
5	40	39
6	40	37
7	37	39
8	39	40
Média	39	39

Fonte: O autor

Interessante observar que o testemunho de perlita não sofreu alteração em sua dureza, sugerindo que a perlita é mais estável em temperatura elevadas do que a bainita.

3.2.5. ENSAIO DE DUREZA - CONTRA CORPO (DISCO)

Foram realizados ensaios de dureza no contra corpo (disco), correspondente ao material do trilho, e medição de massa a cada 1h durante o ensaio de desgaste nos 4 corpos de prova.

Interessante observar que a cada nova medição da massa do corpo de prova, não houve alteração alguma no ensaio de dureza do disco, obtendo o mesmo resultado, conforme Tabela 14.

Tabela 14: Resultados do Ensaio de Dureza realizados no contra-corpo (disco)

Ensaio de dureza	
Medidas	Disco (HRC)
1	42
2	41
3	42
4	41
5	40
6	42
7	42
8	40
Média	42

Fonte: O autor

3.2.6. ENSAIO DE DESGASTE

O ensaio foi realizado utilizando o tribômetro fabricado na UFJF, possibilitando a simulação do desgaste de uma roda de trem no conjunto rolo contra disco. Nesse tribômetro, a aplicação da carga e fixação dos corpos de prova é realizada por meio de um braço fixado em uma travessa lateral com rosca sem fim. Essa travessa além de apoiar o braço, também permite o seu deslocamento no sentido transversal ao disco de apoio dos corpos de prova. A Figura 59 ilustra o equipamento e o braço de fixação (Tribômetro).



Figura 59: Sistema de fixação dos corpos de prova no tribômetro

Fonte: Alves, 2013

No braço, foi adaptado um pino, que servia tanto de apoio quanto guia para aplicação da carga. A Figura 60 mostra algumas especificações do tribômetro como: (a) o pino para apoio da carga e (b) a aplicação da carga. Para o carregamento empregou-se os pesos padrões calibrados de 1, 2 e 5 kg.

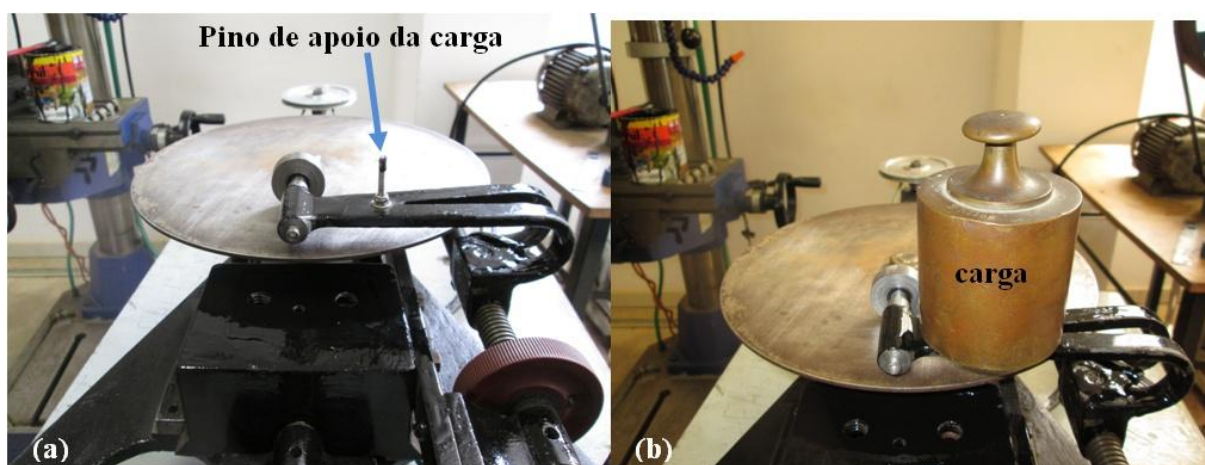


Figura 60: Especificações do tribômetro: (a) Braço com o pino para apoio da carga; (b) Aplicação da carga

Fonte: Alves, 2013

Para aferição da carga na região do contato empregou-se célula de carga e os procedimentos para tal aferição são:

- i. Posicionar e fixar a célula de carga na máquina;
- ii. Posicionar o peso especificado para o ensaio no suporte do corpo de prova;
- iii. Ligar a máquina por 10 segundos e aguardar o corpo de prova "acomodar" para o ensaio;
- iv. Inverter o corpo de prova e reposicionar o conjunto sobre a célula de carga;
- v. Fazer aferição conforme indicação no painel.

A Figura 61 mostra o processo de aferição da carga no tribômetro aplicada nos ensaios:

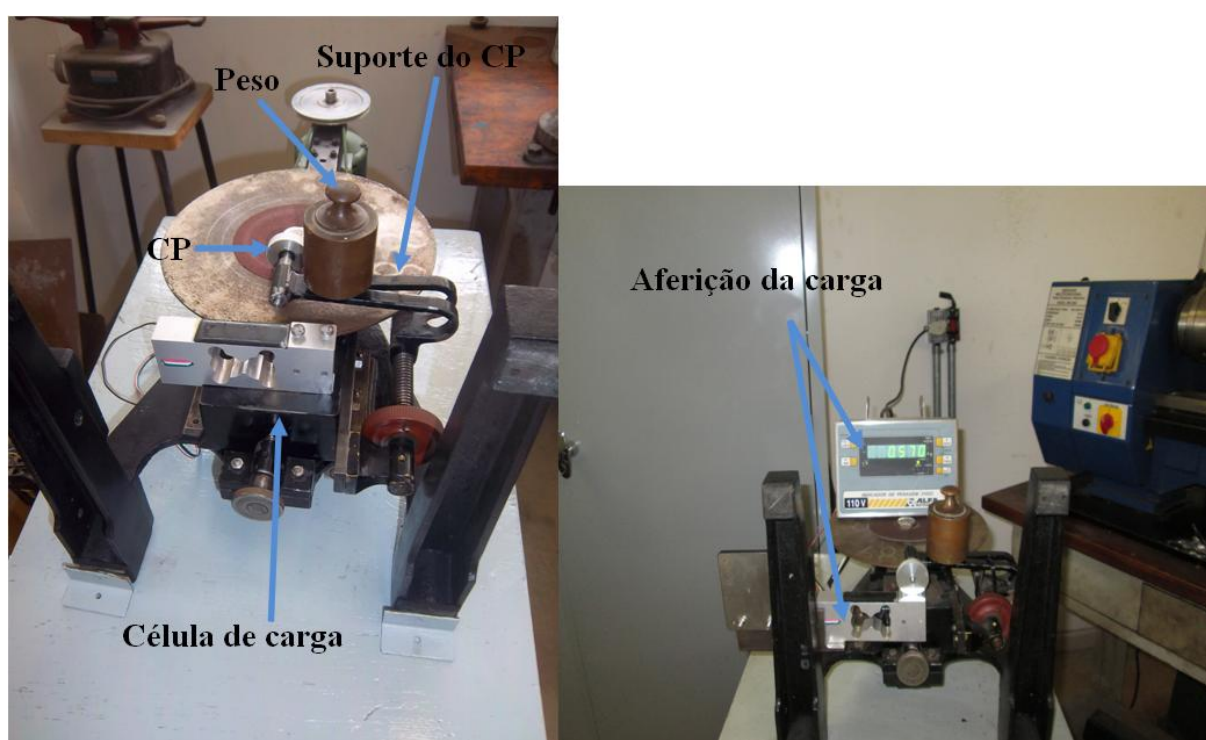


Figura 61: Sistema de aferição da carga para realização de ensaios no tribômetro

Fonte: Alves, 2013

A Figura 62 mostra a realização do ensaio de desgaste.



Figura 62: Realização do ensaio de desgaste

Fonte: O autor

O desgaste foi avaliado por perda de massa em função da distancia percorrida ou rolada, medida em metros, sendo os corpos de prova pesados em balança com precisão de 0,0001g. As avaliações por perda de massa foram medidas a cada 1h de ensaio e foram realizadas 3 medições por carga nos 4 corpos de prova. As cargas aplicadas foram 5,5N, 11N e 25,4N que correspondiam às cargas obtidas com os pesos padrões disponíveis no Laboratório de Metalografia.

4. RESULTADOS

4.1. RESULTADOS ALCANÇADOS

Os resultados dos ensaios de desgaste realizados estão dispostos nas Tabelas 15, 16, 17 e 18, onde são apresentados as Taxas de desgaste individuais e médias, assim como o desvio padrão para cada carga aplicada no ensaio. As Figuras 63, 64, 65 e 66 ilustram individualmente o comportamento da curva Carga (N) versus Taxa de Desgaste (g.h/m) para as duas amostras de cada microestrutura (bainita e perlita). Por fim, na Figura 67, de forma sintética e ilustrativa, é realizada a comparação entre todas as amostras através da mescla dos gráficos Carga (N) versus Taxa de Desgaste (g.h/m) de cada corpo de prova.

A Tabela 15 mostra os resultados encontrados para a Amostra 1 de Perlita.

Tabela 15: Dados sobre o ensaio de desgaste na Amostra 1 de Perlita

Carga (g)	Massa da amostra (g)	Perda de massa (g)	Taxa de Desgaste (g.h/m)	Taxa de desgaste média (g.h/m)	Desvio padrão (g.h/m) x E-8
-	60,5556	-	-	-	-
1000	60,5550	0,0006	3,046E-08	3,384E-08	0,293
	60,5543	0,0007	3,554E-08		
	60,5536	0,0007	3,554E-08		
2000	60,5527	0,0009	4,569E-08	4,992E-08	0,388
	60,5517	0,0010	5,077E-08		
	60,5507	0,0010	5,331E-08		
5000	60,5497	0,0009	4,823E-08	5,415E-08	0,639
	60,5485	0,0012	6,092E-08		
	60,5475	0,0010	5,331E-08		
TOTAL		0,0081			

Fonte: O autor

A Figura 63 mostra a perda de massa em função da carga para a Amostra 1 de Perlita.

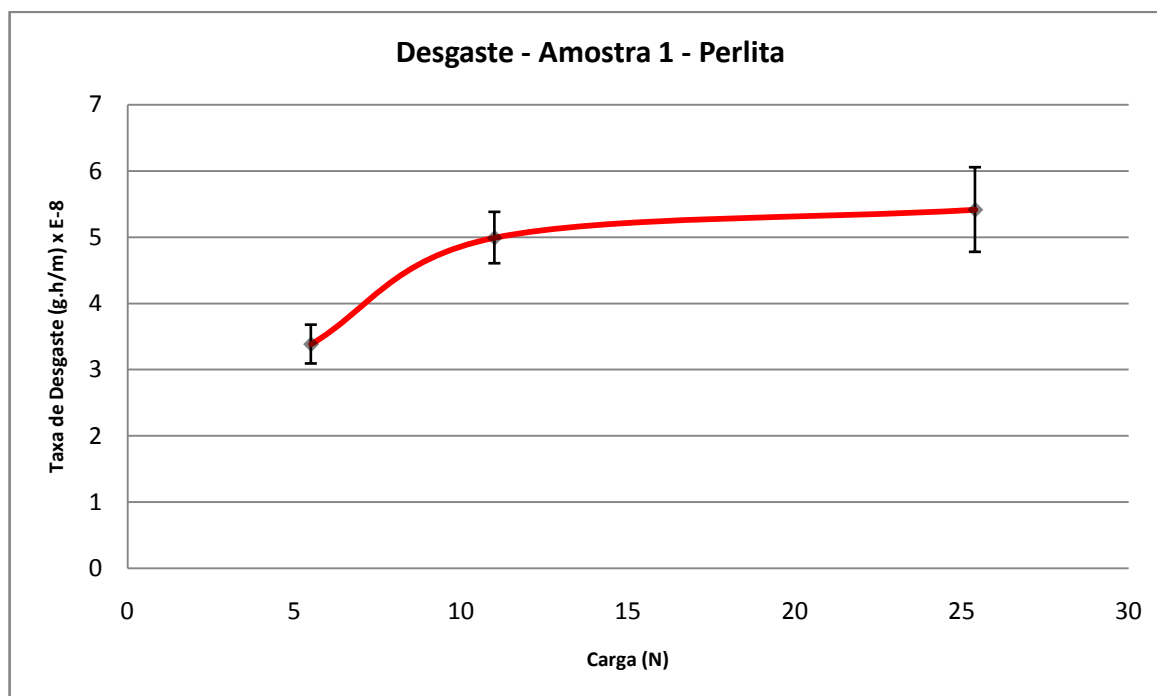


Figura 63: Gráfico Carga (N) versus Taxa de Desgaste (g.h/m) da amostra perlítica 1

Fonte: O autor

A Tabela 16 mostra os resultados encontrados para a Amostra 2 de Perlita.

Tabela 16: Dados sobre o ensaio de desgaste na Amostra 2 de Perlita

Carga (g)	Massa da amostra (g)	Perda de massa (g)	Taxa de Desgaste (g.h/m)	Taxa de Desgaste média (g.h/m)	Desvio Padrão (g.h/m) x E-8
-	62,0932	-	-	-	-
1000	62,0925	0,0007	3,554E-08	3,740E-08	0,322
	62,0918	0,0007	3,554E-08		
	62,0910	0,0008	4,112E-08		
2000	62,0898	0,0012	6,041E-08	5,567E-08	0,483
	62,0887	0,0011	5,584E-08		
	62,0877	0,0010	5,077E-08		
5000	62,0864	0,0013	6,600E-08	6,431E-08	0,775
	62,0850	0,0014	7,107E-08		
	62,0839	0,0011	5,584E-08		
TOTAL		0,0093			

Fonte: O autor

A Figura 64 mostra a perda de massa em função da carga para a Amostra 2 de Perlita.

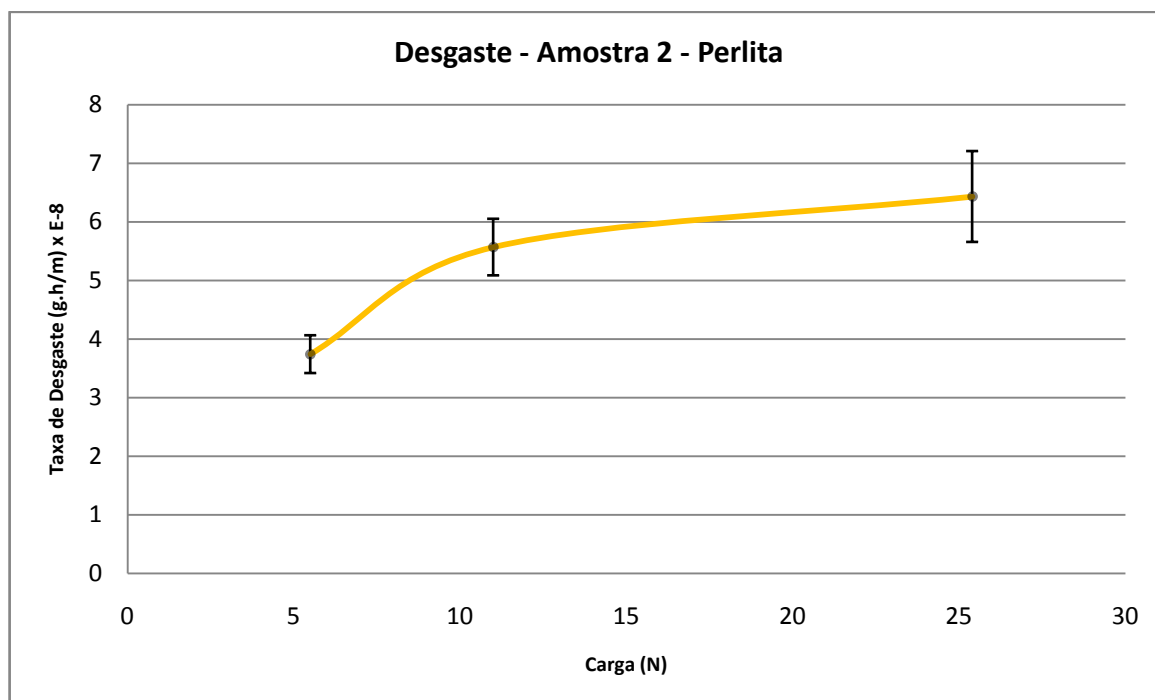


Figura 64: Gráfico Carga (N) versus Taxa de Desgaste (g.h/m) da amostra perlítica 2

Fonte: O autor

A Tabela 17 mostra os resultados encontrados para a Amostra 1 de Bainita.

Tabela 17: Dados sobre o ensaio de desgaste na Amostra 1 de Bainita

Carga (g)	Massa da amostra (g)	Perda de massa (g)	Taxa de Desgaste (g.h/m)	Taxa de Desgaste média (g.h/m)	Desvio Padrão (g.h/m) x E-8
-	60,0713	-	-	-	-
1000	60,0680	0,0033	1,675E-07	1,506E-07	1,551
	60,0653	0,0027	1,371E-07		
	60,0624	0,0029	1,472E-07		
2000	60,0589	0,0035	1,777E-07	1,912E-07	1,278
	60,0551	0,0038	1,929E-07		
	60,0511	0,0040	2,031E-07		
5000	60,0463	0,0048	2,437E-07	2,403E-07	1,057
	60,0418	0,0045	2,285E-07		
	60,0369	0,0049	2,488E-07		
TOTAL		0,0344			

Fonte: O autor

A Figura 65 mostra a perda de massa em função da carga para a Amostra 1 de Bainita.

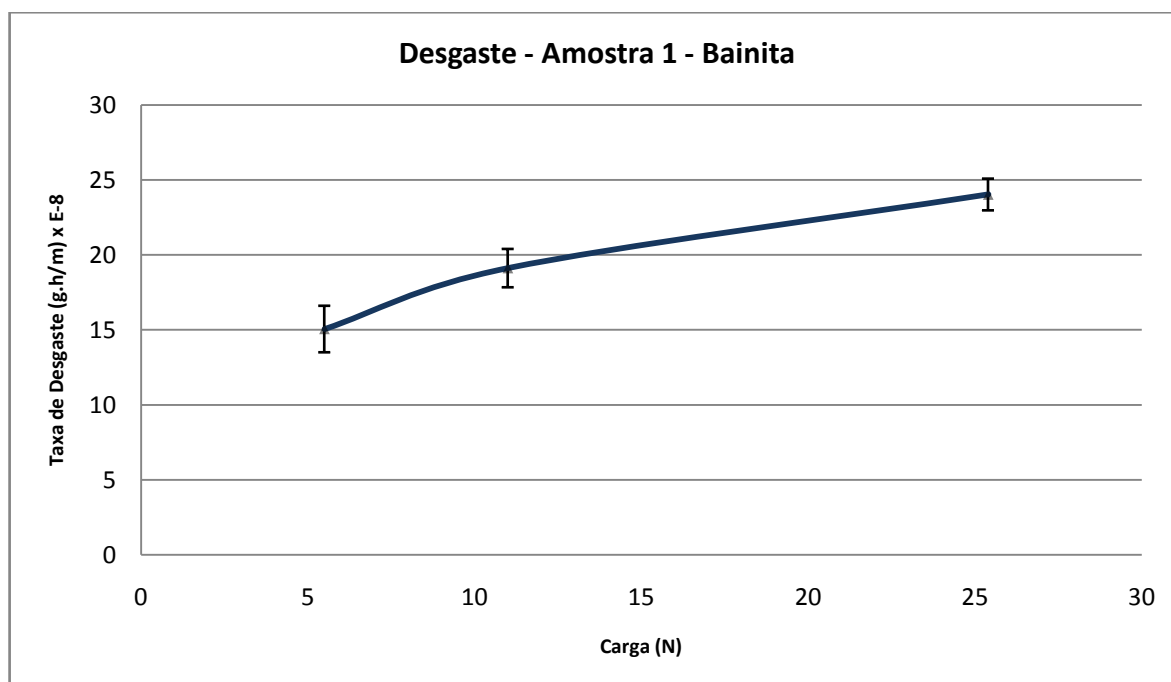


Figura 65: Gráfico Carga (N) versus Taxa de Desgaste (g.h/m) da amostra bainítica 1

Fonte: O autor

A Tabela 18 mostra os resultados encontrados para a Amostra 2 de Bainita.

Tabela 18: Dados sobre o ensaio de desgaste na Amostra 2 de Bainita

Carga (g)	Massa da amostra (g)	Perda de massa (g)	Taxa de Desgaste (g.h/m)	Taxa de Desgaste média (g.h/m)	Desvio Padrão (g.h/m) x E-8
-	61,2260	-	-	-	-
1000	61,2231	0,0029	1,472E-07	1,625E-07	1,830
	61,2195	0,0036	1,828E-07		
	61,2164	0,0031	1,574E-07		
2000	61,2126	0,0038	1,929E-07	1,997E-07	1,172
	61,2084	0,0042	2,132E-07		
	61,2046	0,0038	1,929E-07		
5000	61,1998	0,0048	2,437E-07	2,606E-07	1,466
	61,1945	0,0053	2,690E-07		
	61,1892	0,0053	2,691E-07		
TOTAL		0,0368			

Fonte: O autor

A Figura 66 mostra a perda de massa em função da carga para a Amostra 2 de Bainita.

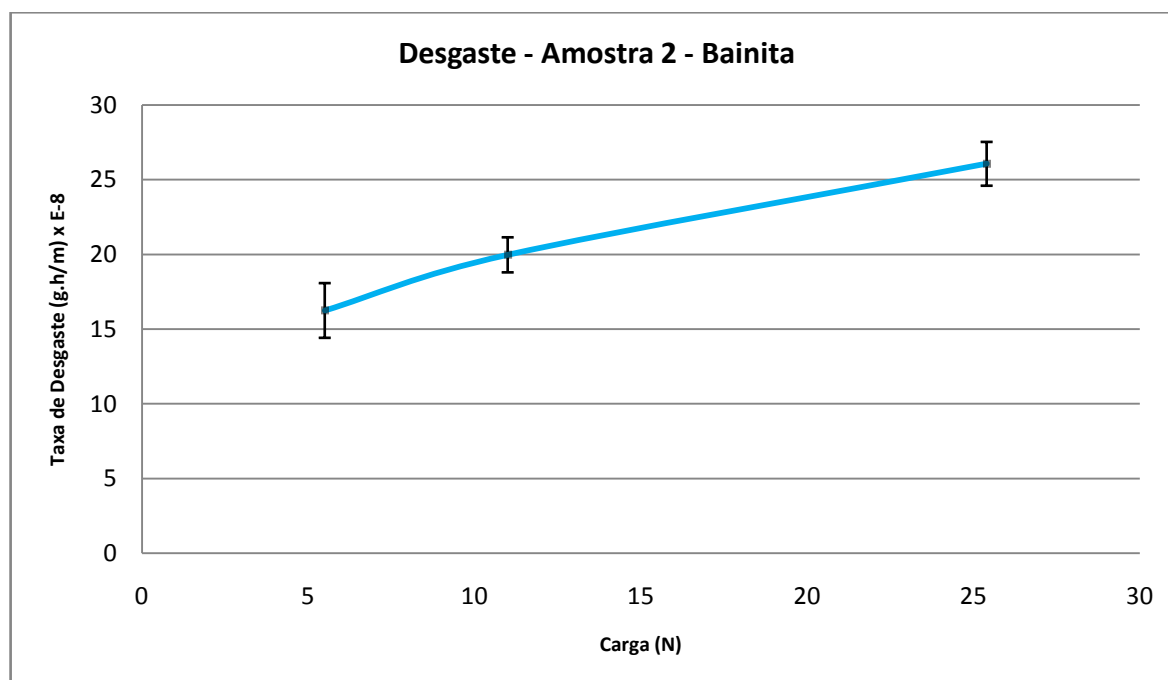


Figura 66: Gráfico Carga (N) versus Taxa de Desgaste (g.h/m) da amostra bainítica 1

Fonte: O autor

A Figura 67 compara a perda de massa em função da carga de todas as amostras.

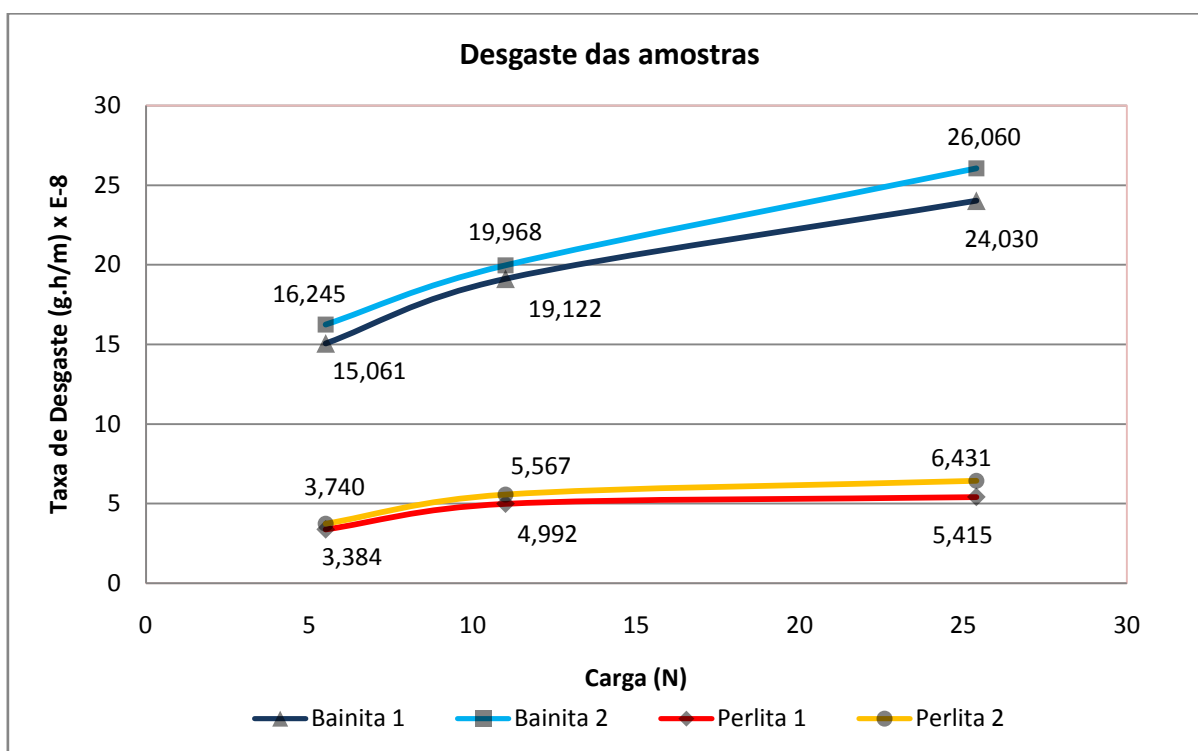


Figura 67: Gráfico Carga (N) versus Taxa de Desgaste (g.h/m) das amostras

Fonte: O autor

4.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.2.1. COMPORTAMENTO DE CURVAS

Para analisar o comportamento das curvas, considerando as mesmas formadas idealmente por duas retas, foram calculados os seus coeficientes angulares e posteriormente os seus ângulos.

As curvas das amostra foram divididas em dois trechos, o primeiro trecho compreendido entre a primeira carga de 5,5N e a segunda carga de 11N e o segundo trecho compreendido entre a segunda carga de 11N e a terceira carga de 25,4N.

A Tabela 19 mostra os ângulos de cada trecho das curvas Carga (N) versus Taxa de Desgaste (g.h/m) das amostras.

Tabela 19: Ângulos de cada trecho das curvas Carga (N) versus Taxa de Desgaste (g.h/m) das amostras

Microestrutura \ Ângulos (°)		Trechos	
		1	2
Perlita	1	16,30	1,68
	2	18,38	3,43
Bainita	1	36,44	18,82
	2	34,09	22,93

Fonte: O autor

A análise dos gráficos Carga (N) versus Taxa de Desgaste (g.h/m) das amostras de perlíticas, ilustrados nas Figuras 63 e 64, corroborados pela Tabela 19, mostram inclinações das curvas no trecho 1 de 16,30° e 18,38°, respectivamente das amostras de perlita 1 e 2. Entretanto no trecho 2, as curvas analisadas possuem inclinações de 1,68° e 3,43°, respectivamente para as amostras de perlita 1 e 2, ou seja, se aproximam de retas horizontais, pois os valores das Taxas de desgaste médias crescem minimamente.

A análise dos gráficos Carga (N) versus Taxa de Desgaste (g.h/m) das amostras bainíticas, ilustrados na Figuras 65 e 66, corroborados pela Tabela 19, mostram acentuadas inclinações das curvas no trecho 1 de 36,44° e 34,09°, respectivamente das amostras de bainita 1 e 2. Entretanto no trecho 2, as curvas analisadas possuem inclinações de 18,82° e 22,93°, respectivamente para as amostras de bainita 1 e 2, ou seja, diminuem suas inclinações, porém o desgaste permanece nitidamente crescente.

4.2.2. PROPORÇÃO ENTRE TAXAS DE DESGASTE

Com o propósito de comparar as curvas das amostras estudadas, foram relacionados os valores das Taxas de desgaste entre todas as amostras para as diferentes cargas no tribômetro (5,5N, 11N e 25,4N), cujas Tabelas são 20, 21 e 22.

A Tabela 20 mostra as relações entre Taxas de desgaste para a carga de 5,5N.

Tabela 20: Relação entre as Taxas de desgaste para o carregamento de 5,5N

Relação entre Taxas de Desgaste - 5,5N					
Amostras		Bainita		Perlita	
		1	2	1	2
Bainita	1	1,00	1,08	0,22	0,25
	2	0,93	1,00	0,21	0,23
Perlita	1	4,45	4,80	1,00	1,11
	2	4,03	4,34	0,90	1,00

Fonte: O autor

A Tabela 21 mostra as relações entre Taxas de desgaste para a carga de 11N.

Tabela 21: Relação entre as Taxas de desgaste para o carregamento de 11N

Relação entre Taxas de Desgaste - 11N					
Amostras		Bainita		Perlita	
		1	2	1	2
Bainita	1	1,00	1,04	0,26	0,29
	2	0,96	1,00	0,25	0,28
Perlita	1	3,83	4,00	1,00	1,12
	2	3,43	3,59	0,90	1,00

Fonte: O autor

A Tabela 22 mostra as relações entre Taxas de desgaste para a carga de 25,4N.

Tabela 22: Relação entre as Taxas de desgaste para o carregamento de 25,4N

Relação entre Taxas de Desgaste - 25,4N					
Amostras		Bainita		Perlita	
		1	2	1	2
Bainita	1	1,00	1,08	0,23	0,27
	2	0,92	1,00	0,21	0,25
Perlita	1	4,44	4,81	1,00	1,19
	2	3,74	4,05	0,84	1,00

Fonte: O autor

Podemos deprender, pela análise das Tabelas 20, 21 e 22, que os valores das Taxas de desgaste das amostras 1 e 2 de bainita são, em todos os carregamentos, maiores do que as Taxas de desgaste das amostras 1 e 2 de perlita em no mínimo 3,43 vezes e no máximo 4,81 vezes.

Alem disso, a medida que aumenta a carga, aumenta a taxa de desgaste. Maiores cargas correspondem à maiores relações entre o desgaste da bainita e da perlita. Isso sugere que com maiores carregamentos, o material bainítico apresentará uma performance muito pior que a perlita. Resultados similares foram obtidos por Rigney e Glaeser (1985) em ensaios por abrasão com bolas de moinho, onde os aços perlíticos obtiveram desempenho superior aos martensíticos e bainíticos para uma mesma dureza.

4.2.3. ANÁLISE MICROGRÁFICA APÓS ENSAIO DE DESGASTE

A Figura 68 apresenta as fotomicrografias em diferentes escalas de um corpo de prova perlítico ensaiado na região do contato (entre o rolo e o disco). Verifica-se uma pequena compactação dos grãos no sentido do movimento do rolo em relação ao disco. Também verifica-se uma superfície irregular, típica de desgaste com formação e destacamento de partículas encruadas.

A Figura 68 mostra as fotomicrografias de um corpo de prova perlítico após o ensaio de desgaste.

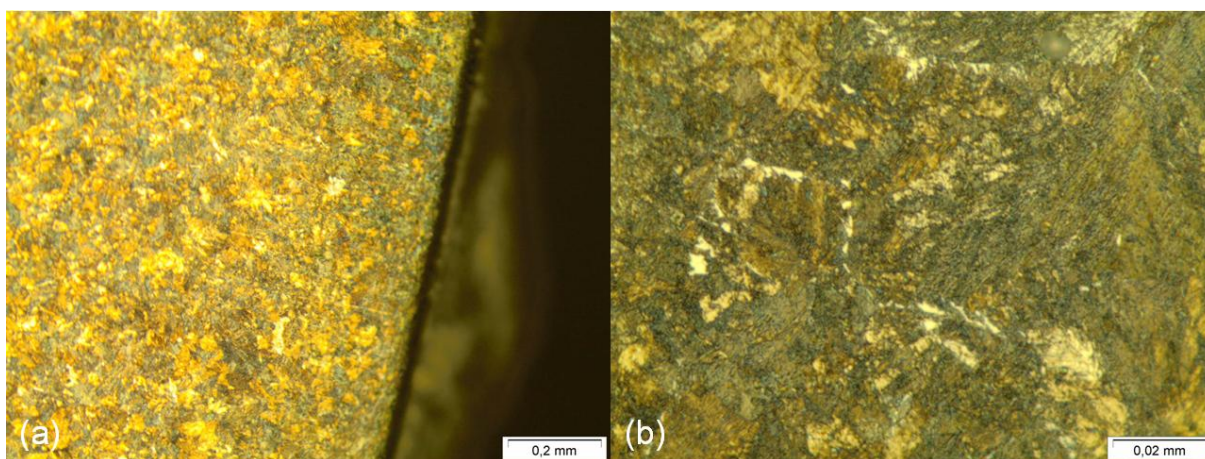


Figura 68: Fotomicrografias de corpo de prova perlítico. (a) aumento de 100x. (b) aumento de 1000x.

Fonte: O autor

A Figura 69 apresenta as fotomicrografias em diferentes escalas de um corpo de prova bainítico. Tal como um corpo de prova perlítico, verifica-se uma compactação dos grãos na superfície e uma pequena deformação no sentido do movimento.

A Figura 69 mostra as fotomicrografias de um corpo de prova bainítico após o ensaio de desgaste.

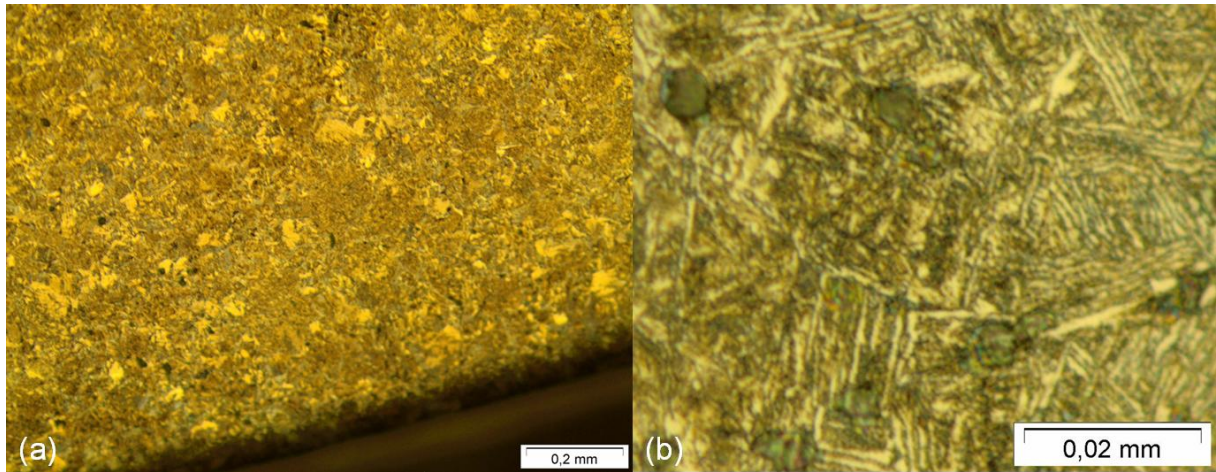


Figura 69: Fotomicrografias de corpo de prova bainítico. (a) aumento de 100x. (b) aumento de 1000x.

Fonte: O autor

5. CONCLUSÃO

Para as condições experimentais empregadas nesse trabalho, pode-se concluir que:

- i. A dureza da perlita não diminui com o revenimento. Já a da bainita diminui de 45 HRC para 39 HRC. Isso sugere que a perlita foi mais estável em temperaturas elevadas do que a bainita.
- ii. O desgaste da bainita foi, em no mínimo 3,43 vezes e no máximo 4,81 vezes, maior do que o desgaste da perlita.
- iii. Em ambas as microestruturas houve a compactação dos grãos, ou seja, deformação plástica no sentido do movimento.
- iv. Apesar do tribômetro não ser um equipamento padronizado para ensaios de desgaste, os resultados obtidos, tal como o melhor desempenho da perlita se comparado com o da bainita para a mesma dureza, estão de acordo com a literatura.
- v. Tal como o modelo de Archard previu, a Taxa de desgaste aumentou com a carga, sendo esta fato mais pronunciado na bainita.

REFERÊNCIAS

- ALVES, L. H. D. (2000), “Mecanismos de Desgaste de Rodas Ferroviárias”. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil.
- ALVES, L. H. D. (2015), Notas de Aula. Gestão de Manutenção. Engenharia de Produção Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil.
- ALVES, L. H. D. (2013), “Contexto e prática em Engenharia Mecânica na UFJF: Uma maneira eficaz de melhorar o desempenho da relação ensino-aprendizagem”. Artigo XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Gramado/RS, Brasil.
- ASSUNÇÃO, F. C. R. (1988), "Seleção de emprego de aços" Curso Associação Brasileira de Metais. 1ª edição.
- BERTRANDA, L. (2014), "Apostila Tecnologia Mecânica - Diagrama e Transformações de Fases. Faculdade Multivix, Vitória, Espírito Santo, Brasil.
- BOYER, H. (1977), "Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams" American Society for Metals.
- CAMPOS, A. J. V. (1994), “Determinação geométrica do filme lubrificante da distribuição de pressão e das tensões de corte num contacto Elastohidrodinâmico. Aplicação a rolamentos de rolos” Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal.
- CANALE, L. (2016) "Apostila Transformações de fases em metais e microestruturas". Engenharia e Ciência dos Materiais I, Universidade de São Paulo, SP, Brasil.
- COLPAERT, H. (2008), "Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns" Editora Blucher. 4ª edição.
- LARSEN-BASSE J. Basic theory of solid friction. ASM Handbook, v. 18, 1992.
- LOPES F. J., MICHEL G. (2008), "Curso Técnico em Eletromecânica" Sistema Nacional de Aprendizagem Industrial. Ceará, Brasil.
- MIGUEL, P. A. C., “metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações” Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- RADI, P. A., SANTOS, L. V., BONETTI, L. F., AIROLDI, V. J. T. (2007), “Tribologia, Conceitos e Aplicações”. Anais do 13º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XIII ENCITA / 2007. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil.
- RIGNEY, D. A.; GLAESER, W. A. Metals Handbook. Ninth Edition. American Society for Metals. 1985.
- RODRIGUES, L. E. M. J. (2016) "Apostila Ensaios Mecânicos de Materiais". Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, São Paulo.

SILVA, A.L.V.C.; MEI, P.R. Aços e Ligas Especiais. Eletrometal, 1988.

STOETERAU, R. L. (2004), Apostila de Tribologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, SC, Brasil.

TOTTEN, G. E.; BATES, C. E.; CLINTON, N. Handbook of quenchants and quenching technology. Ohio: ASM International, 1993.

VALE, A. R. M. (2011), Apostila de Tratamento Térmico do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Belém, PA, Brasil.