

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O TRATAMENTO DE TÊMPERA EM BANHO DE
SAL FUNDIDO E O TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE CARBONITRETAÇÃO
GASOSA EM AÇO FERRAMENTA AISI P20 APLICADOS EM POSTIÇOS DE
MOLDES DE INJEÇÃO PLÁSTICA**

CLÁUDIO MARCELINO DE TOLEDO

Itajubá, Abril de 2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Cláudio Marcelino de Toledo

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O TRATAMENTO DE TÊMPERA EM BANHO DE
SAL FUNDIDO E O TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE CARBONITRETAÇÃO
GASOSA EM AÇO FERRAMENTA AISI P20 APLICADOS EM POSTIÇOS DE
MOLDES DE INJEÇÃO PLÁSTICA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Metais

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo

Co-orientador: Prof^ª. Dr^ª. Renata Neves Penha.

Itajubá, Abril de 2019

DEDICATÓRIA

Dedico esta grande conquista à minha Querida Mãe, ao meu pai, meus exemplos e alicerces, ao meu filho William, a Deise, aos meus familiares e amigos que com muito carinho e paciência me incentivaram para que eu alcançasse mais este objetivo em minha vida.

AGRADECIMENTOS

A minha família pela parceria incondicional e compreensão nos momentos em que não pude estar presente na vida deles.

A minha orientadora, Prof^ª. Dr^ª. Mirian e a minha co-orientadora, Prof^ª. Dr^ª. Renata, por guiar-me durante o percurso deste trabalho.

A Chefia da IMBEL - Fábrica de Itajubá, em especial ao Chefe de Fábrica, o Cel. Délcio Monteiro Sapper, pela confiança depositada em meu trabalho, traduzida no livre acesso aos equipamentos e dedicação parcial de carga horária ao Mestrado.

Ao Engenheiro Adjunto, Cel. Caio de Melo Campos pelo apoio e orientação na realização das atividades técnicas.

Aos Técnicos do Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI, Claudemiro Luz Teodoro, Jonas Mendes, Marcos Cirilo dos Santos, pela paciência, competência e pela constante disponibilidade.

A todos os professores da UNIFEI, pelas disciplinas oferecidas no decorrer do Mestrado, o qual me proporcionou bases para a compreensão dos assuntos aqui discutidos.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para a conclusão deste trabalho.

"Assumir uma atitude responsável perante o futuro sem uma compreensão do passado é ter um objetivo sem conhecimento. Compreender o passado sem um comprometimento com o futuro é conhecimento sem objetivos."

(Ronald T. Laconte)

RESUMO

TOLEDO, C. M. ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O TRATAMENTO DE TÊMPERA EM BANHO DE SAL FUNDIDO E O TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE CARBONITRETAÇÃO GASOSA EM AÇO FERRAMENTA AISI P20 APLICADO EM POSTIÇOS DE MOLDES DE INJEÇÃO PLÁSTICA. 2019. 76p. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, 2019.

Aços ferramenta de médio carbono AISI P20 tratáveis termicamente são de grande importância para o setor industrial. Pesquisas envolvendo a inter-relação entre a liga (composição), e o processo de fabricação com adição de outros elementos de liga, propriedades e tratamentos de superfície são de interesse acadêmico e de aplicação industrial, pois visam os setores de engenharia, ou seja, a partir de suas propriedades pode-se prever os parâmetros e as condições possíveis que devem ser empregados na utilização dos mesmos. Dentro deste contexto, busca-se melhorar a qualidade dos produtos, a rapidez na execução dos serviços, redução das perdas e dos custos a fim de atender ao propósito da empresa. Este trabalho tem por objetivo apresentar um estudo comparativo de tratamento térmico de têmpera em banho de sal fundido e o tratamento de superfície (carbonitretação gasosa) realizado no aço ferramenta AISI P20, com o propósito de avaliar as propriedades mecânicas de resistência ao impacto e desgaste no processo de injeção. A metodologia empregada nesta pesquisa é de caráter experimental. Após o tratamento térmico e o tratamento de superfície (carbonitretação), foram realizados ensaios de impacto Charpy, ensaio de abrasão, análise metalográfica, análise química, microscopia óptica, ensaio de dureza Rockwell e microdureza Vickers e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para as condições estudadas neste trabalho, pode-se concluir que o tratamento de superfície de carbonitretação gasosa aumenta a vida útil dos postiços utilizados nos moldes de injeção plástica em 30%, reduz as perdas e diminuir os custos de confecção e reparos cerca de 15%.

Palavras-chave: aço AISI P20, têmpera, tratamento de superfície, tribologia, rugosidade.

ABSTRACT

TOLEDO, C. M. **A COMPARATIVE STUDY BETWEEN THE TEMPERING TREATMENT IN A MOLTEN SALT BATH AND THERMOCHEMICAL TREATMENT OF CARBONITRIDING GAS IN AISI P20 TOOL STEEL APPLIED IN PLASTIC INJECTION MOLDINGS.** 2019. 76p. Dissertation (Master's Degree in Materials Engineering). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2019.

Thermally treatable AISI P20 medium carbon tool steels are of great importance to the industrial sector. Researches involving the interrelation between the alloy (composition) and the manufacturing process with the addition of other alloying elements, property and surface treatments are of academic interest and of industrial application, as they target the engineering sectors, that is, from their properties can be predicted the possible parameters and conditions that should be used in the use of the same. Within this context, the aim is to improve the quality of products, speed in the execution of services, reduction of losses and costs in order to meet the purpose of the company. The aim of this work is to present a comparative study of the thermal treatment of tempering in a molten salt bath and the surface treatment (carbonitriding gas) performed in the AISI P20 tool steel, in order to evaluate the mechanical properties of impact resistance and injection process. The methodology used in this research is experimental. After the heat treatment and the surface treatment (carbonitretation), some tests were carried out, like Charpy impact tests, abrasion test, metallographic analysis, chemical analysis, optical microscopy, Rockwell hardness test and Vickers microhardness and scanning electron microscopy (SEM). For the conditions studied in this work, it can be concluded that the surface treatment of carbonitriding gas increases the useful life of the inserts used in the plastic injection molds by 30%, reduces the losses and reduces the costs of making and repairing about 15%.

Keywords: AISI P20 steel, tempering, surface treatment, tribology, roughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Componente de um molde (postiço).....	22
Figura 3.2 - Curva de transformação em resfriamento contínuo do aço AISI P20.	23
Figura 3.3 - Gráfico da espessura da camada nitretada no aço AISI P20.....	26
Figura 3.4 - Exemplo genérico de sistema tribológico delimitado por uma fronteira. Através dessas ocorrem trocas, entradas e saídas, com o exterior.....	28
Figura 3.5 - Representação esquemática dos principais mecanismos de desgaste.	30
Figura 3.6 - Rugosidades R_a e R_t em um perfil de superfície $P(x)$	33
Figura 4.1 - Corpo de prova de aço AISI P20 para ensaio de impacto Charpy.....	35
Figura 4.2 - Corpo de prova de aço AISI P20 para ensaio de abrasão.	36
Figura 4.3 - Fluxograma do experimento.	37
Figura 4.4 - Esquema do procedimento experimental utilizado durante a austenitização em banho de sal.....	38
Figura 4.5 - Esquema do procedimento experimental utilizado durante a carbonitreção gasosa, têmpera e resfriamento em óleo para o aço AISI P20.	40
Figura 4.6 - Região utilizada nos corpos de prova no ensaio Charpy para obtenção das expansões laterais: (A) Região deformada.....	41
Figura 4.7 - Sentido de trabalho dos rebolos abrasivos e do corpo de prova.	42
Figura 4.8 - Corpo de prova ensaiado, desgaste nas duas faces (Região da Pista).	43
Figura 4.9 - Espectrômetro utilizado para análise química, modelo SPECTROMAX.	44
Figura 4.10 - Microscópio óptico marca ZEISS, modelo Jenavert, com câmera fotográfica Infinity 1, Software da Imaging System Co.	45
Figura 4.11 - Aço AISI P20 espessura de camada (X) carbonitretada, camada branca (A), corte transversal. Ataque Nital 2% 5s.....	46
Figura 4.12 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), marca Carl Zeiss, modelo EVO MA15.....	47
Figura 4.13 - Rugosímetro modelo SurfTest SJ-400, marca Mitutoyo.	48
Figura 5.1 - Microestrutura do aço AISI P20: (a) conforme recebido (CR); (b) temperado e revenido (T); (c) carbonitretado temperado e revenido (C + N), com corte longitudinal. Ataque Nital 2% 5s.....	50
Figura 5.2 - Microestrutura do aço AISI P20: (a) conforme recebido (CR); (b) temperado e revenido (T); (c) carbonitretado temperado e revenido (C + N), com corte transversal. Ataque Nital 2% 5s.....	51
Figura 5.3 - Espessura da camada carbonitretada no aço AISI P20, em relação ao tempo de exposição no forno de atmosfera controlada (15 min, 30 min, 60 min, 120 min e 180 min).	52
Figura 5.4 - Micrografia do aço AISI P20 carbonitretado, tempo de exposição no forno de atmosfera controlada (15 min, 30 min, 60 min, 120 min e 180 min), corte transversal. Ataque Nital 2% 5s.....	53
Figura 5.5 - Energia de impacto Charpy do aço AISI P20: conforme recebido (CR);.....	54
Figura 5.6 - Média da energia absorvida e desvio padrão após o ensaio de impacto Charpy e a dureza média no aço AISI P20: conforme recebido temperado e revenido (CR); temperado e revenido (T); carbonitretado, temperado e revenido (C + N).....	55
Figura 5.7 - Aspecto de fratura por impacto no aço AISI P20: (a) conforme recebido (CR) temperado e revenido; (b) temperado e revenido (T); (c) carbonitretado temperado e	

revenido (C + N). Microfotografia expansão lateral; análise em MEV por modo SE, sem ataque.....	56
Figura 5.8 - Análise de EDS (<i>line scan</i>) aço AISI P20 na condição: carbonitretado (C + N), espessura de camada.....	61
Figura 5.9 - Análise de EDS (<i>line scan</i>) aço AISI P20 na condição: conforme recebido (CR), mostrando o perfil de distribuição dos elementos: Fe, Cr, Mn, Mo e Si. Corte transversal, sem ataque.	62
Figura 5.10 - Análise de EDS (<i>line scan</i>) aço AISI P20 na condição: temperado e revenido (T), mostrando o perfil de distribuição dos elementos: Fe, Cr, Mn, Mo e Si. Corte transversal, sem ataque.	62
Figura 5.11 - Análise de EDS (<i>line scan</i>) aço AISI P20 na condição: carbonitretado (C + N), espessura de camada 0,1 mm, tempo de exposição de 120 minutos, mostrando o perfil de distribuição dos elementos: Fe, C, Cr, N, Mn, Si e Mo. Corte transversal, sem ataque.....	63
Figura 5.12 - Análise de EDS (<i>Point</i>) aço AISI P20 nas condições: conforme recebido (CR); temperado e revenido (T); carbonitretado (C + N), indicando o ponto no centro. Composição química. Corte transversal, sem ataque.	63
Figura 5.13 - Análise de EDS (<i>Point</i>) aço AISI P20 nas condições: conforme recebido (CR), temperado e revenido (T); carbonitretado (C + N) (fora da camada), indicando o ponto no centro das amostras. Composição química. Corte transversal, sem ataque.....	64
Figura 5.14 - Análise de EDS (<i>Point</i>) aço AISI P20 na condição: carbonitretado (C + N), indicando o ponto 0 e o ponto 1, composição química em % peso. Corte transversal, sem ataque.....	64
Figura 5.15- Análise em MEV - EDS (<i>point</i>) do aço AISI P20: carbonitretado (C + N) mostrando o ponto 0 (zero) na camada. Tempo de exposição 120 min. Corte transversal, sem ataque. .	65
Figura 5.16 - Análise em MEV - EDS (<i>point</i>) do aço AISI P20: carbonitretado (C + N) mostrando o ponto 1(um)	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Classificação simplificada dos aços ferramenta.....	18
Tabela 3.2 - Composição química do aço AISI P20 (% peso).....	19
Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas e físicas do aço AISI P20.....	20
Tabela 3.4 - Composição química típica de aços para moldes plásticos (% peso).....	21
Tabela 3.5 - Comprimento da amostragem (<i>Cut-off</i>).....	33
Tabela 4.1 - Composição química do aço AISI P20 nominal e obtida (% peso).....	34
Tabela 5.1 - Composição química por espectroscopia do aço AISI P20: conforme recebido (CR) temperado e revenido (T); carbonitretado, temperado e revenido (C + N). ASTM A 681. (% peso).....	49
Tabela 5.2 - Resultado do ensaio de impacto Charpy no aço AISI P20: conforme recebido (CR) temperado e revenido; temperado e revenido (T); carbonitretado temperado e revenido (C + N).....	57
Tabela 5.3 - Resultado do ensaio da abrasão no aço AISI P20: conforme recebido (CR) temperado e revenido; temperado e revenido (T); carbonitretado temperado e revenido (C + N).....	58
Tabela 5.4 - Resultado do ensaio de abrasão no aço AISI P20 mostrando o coeficiente de variação (v), a média e o desvio padrão: conforme recebido (CR), temperado e revenido; temperado e revenido (T); carbonitretado to e revenido (C + N).....	59
Tabela 5.5 - Medidas de dureza Rockwell "C" no aço AISI P20: conforme recebido (CR) temperado e revenido; temperado e revenido (T); carbonitretado temperado e revenido (C + N).....	60
Tabela 5.6 - Medidas de microdureza Vickers (HV) no aço AISI P20: conforme recebido (CR) temperado e revenido; temperado e revenido (T); carbonitretado, temperado e revenido (C + N).....	61
Tabela 5.7 - Média e desvio padrão de rugosidade do corpo de prova do aço AISI P20: conforme recebido (CR) temperado e revenido; temperado e revenido (T); carbonitretado temperado e revenido (C + N).....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Óxido de alumínio branco
ABM	Associação Brasileira de Metalurgia
AISI	<i>American Iron Steel Institute</i> (Instituto Americano de Aço e Ferro)
ASM	<i>American Society Materials</i> (Sociedade Americana de Materiais)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Testes)
BSE	<i>Back scattering electron</i> (Elétron retroespalhado)
CHF	<i>Cubic feet per hour</i> (Pés Cúbico por hora)
C + N	Carbonitretado
CP	Corpo de prova
CR	Conforme recebido (material)
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão de Padronização)
EDS	Espectrômetro de energia dispersiva
HRC	<i>Hardness Rockwell c</i> (Dureza Rockwell C)
HV	<i>Hardness Vickers</i> (Dureza Vickers)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização)
ITR	Instrução de trabalho
J	Joule
LCE	Laboratório de Caracterização Estrutural
LMM	Laboratório de Materiais e Metalurgia
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
mm	Milímetro
MO	Microscopia óptica
NBR	Norma Técnica (Brasileira)
NM	Número
PIB	Produto Interno Bruto
QT	<i>Quenched and tempered</i> (Temperado e revenido)
R _a	<i>Roughness Average</i> (Rugosidade média)
R _q	<i>Root Mean Square</i> (Raíz Média Quadrada)
R _t	Comprimento de amostragem (<i>Cut-off</i>)
SE	<i>Secondary electron</i> (Elétron secundário)
T	Temperado
CCT	Diagrama de transformação em resfriamento contínuo
WSA	<i>World Steel Association</i> (Associação Mundial do Aço)

LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Aluminio
BaCl ₂	Cloreto de bário
C	Carbono
C ₂ H ₅ OH	Álcool etílico
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
Cr	Cromo
Fe	Ferro
g	Silício
H ₂	Hidrogênio
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
N ₂	Nitrogênio (Substância)
S	Enxofre
Si	Silício
v	Coefficiente de variação
σ	Desvio padrão
μ	Mícron

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	OBJETIVO GERAL	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2.3	JUSTIFICATIVAS	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	AÇOS FERRAMENTA	18
3.1.1	Classificação dos aços ferramenta	18
3.1.1.1	Principais características da classe AISI-P	19
3.2	AÇO AISI P20	19
3.2.1	Aplicações do aço AISI P20	21
3.3	TRATAMENTO TÉRMICO	22
3.3.1	Tratamento térmico para o aço AISI P20	23
3.4	TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE	24
3.4.1	Tratamento por cementação	24
3.4.2	Tratamento por nitretação	25
3.4.3	Tratamento por carbonitretação	26
3.5	TRIBOLOGIA	27
3.5.1	Tipos de desgaste	29
3.5.2	Desgaste abrasivo	30
3.5.2.1	Mecanismos de desgaste por Abrasão	31
3.6	RUGOSIDADE	31
3.6.1	Parâmetros de rugosidade	32
3.6.2	Medição de rugosidade	33
4	MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1	MATERIAL	34
4.2	MÉTODOS	34
4.2.1	Corpo de prova para ensaio de impacto	34
4.2.2	Corpo de prova para ensaio de abrasão	35
4.2.3	Tratamento térmico	37
4.2.4	Carbonitretação Gasosa	39
4.2.5	Ensaio de Impacto Charpy	40
4.2.6	Ensaio de abrasão	41
4.2.7	Técnicas de caracterização	43
4.2.7.1	Metalografia	43
4.2.7.1.1	Preparação das amostras do aço AISI P20	43
4.2.7.1.2	Análise química do aço AISI P20	44
4.2.7.1.3	Microscopia óptica	45
4.2.7.1.4	Ensaio de dureza Rockwell e ensaio de microdureza Vickers	46
4.2.7.1.5	Microscopia eletrônica de varredura	47
4.2.7.1.6	Rugosidade	47

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	49
5.1.1	Aço AISI P20	49
5.2	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	49
5.2.1	Resultado da microscopia óptica	50
5.2.2	Resultado do ensaio de impacto Charpy	54
5.2.3	Resultado do ensaio de abrasão	58
5.2.4	Resultado dos ensaios de dureza e microdureza.....	59
5.2.4.1	Ensaio de dureza Rockwell.....	59
5.2.4.2	Ensaio de microdureza Vickers	60
5.2.5	Resultado do microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	61
5.2.6	Resultado do teste de rugosidade.....	66
6	CONCLUSÃO.....	68
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
8	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

A utilização de aços ferramenta aliada às tecnologias modernas de fabricação bem como o uso de técnicas de tratamentos térmicos corretos tem sido amplamente utilizada pelas indústrias no início do século XXI.

Os aços ferramenta representam uma importante fatia do segmento de aços especiais. Eles são produzidos e processados para atingir um alto grau de qualidade e os mesmos são empregados na fabricação de moldes, matrizes, ferramentas de corte, etc (SILVA & MEI, 2014).

De acordo com os dados apresentados pela WSA-*World Steel Association*, a produção mundial de aço bruto em 2018 foi estimada em 1,616 bilhões de toneladas de aço. Os valores apresentados incluem aços carbono, aços inoxidáveis e aços ferramenta. Não há dados numéricos relativos à produção de aços ferramenta exclusivamente (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2018).

A Villares Metals produz uma linha completa de aços ferramenta para moldes, que atende a maioria das necessidades das ferramentarias e modelações que hoje é composta de sete tipos de aços, abrangendo desde os aços AISI P20 convencionais até os martensíticos (MOURA, 2012).

O aço AISI P20 é um aço ferramenta que tem sua liga normatizada segundo a *American Society for Testing and Materials* (ASTM A 681, 2008). O mesmo possui excelente resistência ao desgaste, resistência à fadiga térmica e boa polibilidade podendo ser avaliado através das características tribológicas.

Atualmente tem sido objeto de pesquisa na produção mecânica, pelo aumento da busca no mundo inteiro de método de engenharia de superfície alternativo, que seja capaz de aumentar a resistência ao desgaste da superfície de dispositivos, peças e ferramentas em geral solicitados à abrasão (MONTEIRO *et al.*, 2010).

Os tratamentos de superfície realizados nos aços ferramenta para moldes são empregados visando tanto à melhoria de propriedades (durabilidade, resistência à corrosão, resistência ao desgaste e a fadiga térmica do mesmo) quanto à otimização do fluxo de calor, visto que o mesmo altera propriedades como a condutividade térmica do material (YOSHIDA, 1998, DAMIN, 2015).

No entanto, o presente trabalho promove a comparação entre o tratamento térmico de têmpera em banho de sal fundido e o tratamento termoquímico de carbonitretação em atmosfera

gasosa de NH_3 para beneficiamento de postiços/insertos de aço AISI P20, com o intuito de avaliar o desempenho, a vida útil, reduzir o tempo de processamento e o custo de fabricação. É importante destacar, ainda, que tal tratamento tem sido amplamente utilizado quando se deseja transformar materiais caracteristicamente dúcteis em resistente ao desgaste (MONTEIRO *et al.*, 2010).

As técnicas utilizadas para comparação e caracterização foram espectroscopia óptica para avaliar a composição química, ensaio de impacto Charpy, ensaio de abrasão, posteriormente, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por dispersão (EDS), e análise de rugosidade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Comparar os efeitos do tratamento térmico de têmpera em banho de sal fundido e o tratamento termoquímico de carbonitreção gasosa no aço AISI P20, com o propósito de melhorar as propriedades mecânicas de resistência ao desgaste e aumentar a vida útil dos postigos.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho constituem os seguintes itens:

- ✓ Determinação da influência da camada carbonitretada revenida e avaliação das propriedades metalográficas do aço AISI P20;
- ✓ Avaliação dos resultados de perda de massa por abrasão do material conforme recebido e após a realização dos tratamentos de têmpera em banho de sal fundido revenida e o tratamento de carbonitreção gasosa revenida;

2.3 Justificativas

Devido à grande demanda de peças provenientes de injeção plástica e aos custos de fabricação de insumos faz-se necessário a busca de novas alternativas para redução de custos final dos produtos, melhorando a situação em relação as suas concorrentes.

De acordo com Rodrigues (2015) diversas organizações buscam investir continuamente em inovação, evidenciando seu compromisso com as melhores práticas comerciais (redução de custos, eficiência e aceleração no processo produtivo, por exemplo), pretendendo ficar diferente da concorrência e conseqüentemente alcançar uma fatia maior no mercado consumidor.

Assim, procurou-se propor com esse trabalho buscar a melhor alternativa usando os recursos existentes na Empresa X com a finalidade de reduzir as perdas frequentes (de insumos e mão de obra), aumentar a vida útil dos postigos fabricados de aço AISI P20.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aços ferramenta

Os aços ferramenta são uma classe de aços que possuem alta qualidade, sua composição química e suas propriedades são diferenciadas em relação aos aços carbono comum ou baixa liga comercialmente existente. Esses aços são normalmente utilizados na fabricação de ferramentas de corte, estampagem, injeção de ligas não-ferrosas, etc (ASM, 1998; PAZ, 2016).

A complexidade dos aços ferramenta inicia na sua obtenção, principalmente em função da quantidade de elementos de liga utilizados como tungstênio, cromo, molibdênio, etc, que requerem um controle preciso no processo de obtenção do mesmo na siderurgia, com o objetivo de se atingir teores corretos da liga, bem como minimizar ao máximo os teores de impurezas no material, dentro dos limites especificados em normas (ROBERTS *et al.*, 1998).

3.1.1 Classificação dos aços ferramenta

Os aços ferramenta convencionais são classificados de acordo com a AISI- *American Iron Steel Institute* em função de suas aplicações comerciais mais comuns no mercado. Algumas aplicações são genéricas, podendo o aço ferramenta ser usado em outra aplicação de forma eficiente (PAZ, 2016). A Tabela 3.1 mostra a classificação de aços ferramenta mais comuns do mercado (MACIEL, 2004).

Tabela 3.1 - Classificação simplificada dos aços ferramenta.

Classe AISI	Definição	Classes comuns	Aplicações
W	Temperáveis em água	W2, W360, W390	Matrizes de cunhagem
S	Resistente ao choque	S1, S2, S3, S6, S7	Facas para cortes de chapas grossas a frio
P	Aços para moldes plásticos	P20, P420, P50	Aço para fabricação de moldes
H	Aços para trabalho à quente	H11, H12, H13, H20	Matrizes para trabalho à quente: forjamento
D	Aços para trabalho à frio	D2, D3, D5, D6, D7	Conformação mecânica de aços à frio e corte
O	Aços temperáveis ao óleo	O1, O2, O3, O6	Ferramentas de corte e dobra de chapas
A	Aços temperáveis ao ar	A1, A2, A3, A6	Conformação de chapas corte e repuxo

Fonte: Adaptado de Maciel (2004).

3.1.1.1 Principais características da classe AISI-P

O rápido crescimento e a importância adquirida pela indústria de plásticos nos anos recentes causaram uma expansão considerável no número de aços para moldes. O uso destes aços estende-se, também, à fundição em moldes permanentes ou por injeção de chumbo, estanho e ligas de zinco (ALMEIDA FILHO, 1999).

Dentre as diversas propriedades requeridas de um aço para moldes, podemos citar: baixa dureza no estado recozido (para facilitar o processo de usinagem, o forjamento de cavidades de fresagem na matriz e até mesmo a prensagem), alta resistência ao desgaste, ao impacto e resistência mecânica no núcleo, alta polibilidade e usinabilidade (LOPES *et al.*, 2016).

A classe P pode ser utilizada cementada ou simplesmente temperada e revenida, o aço P20 para os moldes plásticos podem ser cementados e tratados após a usinagem de cavidades (ALMEIDA FILHO, 1999).

3.2 Aço AISI P20

O aço ferramenta AISI P20 é amplamente utilizado na indústria para a confecção de moldes de injeção de termoplásticos dos mais variados tipos (CORAZZA, 2012). É fornecido no estado beneficiado, temperado e revenido, com dureza de 28-32 HRC (286 HV-320 HV).

Possui excelentes propriedades mecânicas, dentre as quais se destacam boa usinabilidade e soldabilidade, tanto no estado recozido quanto beneficiado, excelente polibilidade, boa uniformidade de dureza (SANT'ANNA, 2009; WANDER *et al.*, 2007; FAVORIT SPECIAL STEELS, 2018).

A AISI classifica os aços ferramenta para moldes com o símbolo "P". A composição química nominal do aço P20, de acordo com a AISI que tem sua liga normatizada segundo a ASTM A 681, é mostrada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Composição química do aço AISI P20 (% peso).

Elementos	C	Si	Mn	Cr	Mo
Mín.	0,28	0,20	0,60	1,40	0,30
Máx.	0,40	0,80	1,00	2,00	0,55

Fonte: Adaptado de ASTM A 681 (2008).

Cada elemento químico dos aços tem diferentes funções. No caso do aço AISI P20 as principais funções dos seus elementos são (COSTA, 2008):

O cromo aumenta a resistência à corrosão, ao calor e ao desgaste, e é normalmente adicionado no dobro da quantidade do níquel.

O manganês atua como agente dessulfurante e desoxidante. Aumenta também a dureza e a resistência e baixa a temperatura de transformação da martensita. Quando adicionado em percentual mais elevado (entre 11 a 14%) aumenta a resistência ao desgaste das ferramentas.

O molibdênio que atua como refinador de grão melhora também a resistência à corrosão e abrasão. Quando submetido às temperaturas mais elevadas aumenta a dureza e ainda tem o papel de contrabalançar a tendência da fragilidade de revenido.

O níquel é um elemento suplementar (P20 + Ni) que aumenta a resistência ao impacto, bem como a resistência à corrosão. É utilizado em componentes com espessura acima de 400 mm. Se for adicionado em grande quantidade pode obter uma liga com coeficiente de expansão térmica próximo de zero (VILLARES METALS, 2011).

Na Tabela 3.3 podem ser observadas algumas propriedades mecânicas e físicas do aço AISI P20. A Tabela 3.4 exemplifica outras similaridades do aço AISI P20.

Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas e físicas do aço AISI P20.

Propriedades mecânicas e físicas do aço P20		
Estruturas		Martensita
Estado		Temperado e Revenido
Densidade (kg/m³)		7,85X10³
Coefficiente de Expansão Térmica (10⁻⁶ m/(m.K))	a 100°C	11.6
	a 500 °C	14.3
Módulo de Young (GPa)	a 20°C	212
	a 500°C	175
Condutividade Térmica (W/mK)	a 20°C	34.0
Calor Específico (J/kg.k)	a 20°C	502
Coefficiente de Poisson		0.27-0.30
Dureza	HB 290-335	

Fonte: Buderus (2010); Meusburger (2013); Thyssenkrupp (2013).

Tabela 3.4 - Composição química típica de aços para moldes plásticos (% peso).

Elementos	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V
DIN 1.2311	0,40	0,30	1,45	1,95	0,20	-	-
DIN 1.2738	0,40	0,30	1,45	1,95	0,20	1,05	-
DIN 1.2711	0,55	0,25	0,70	0,70	0,30	1,65	0,1

Fonte: Adaptado de Bacalhau *et al.* (2012).

De acordo com Baretta *et al.* (2007) o aço AISI P20 apresenta os melhores resultados em relação às propriedades mecânicas e à resistência ao impacto do material injetado (da peça fabricada), em comparação aos demais materiais utilizados, como por exemplo: alumínio, aço H13, etc.

Este aço é o mais vendido para a fabricação de moldes no Brasil, chegando a mais de 80% dos casos, levando-se em conta sua qualidade e melhor relação custo/benefício no projeto de moldes de injeção (SANT'ANNA, 2009).

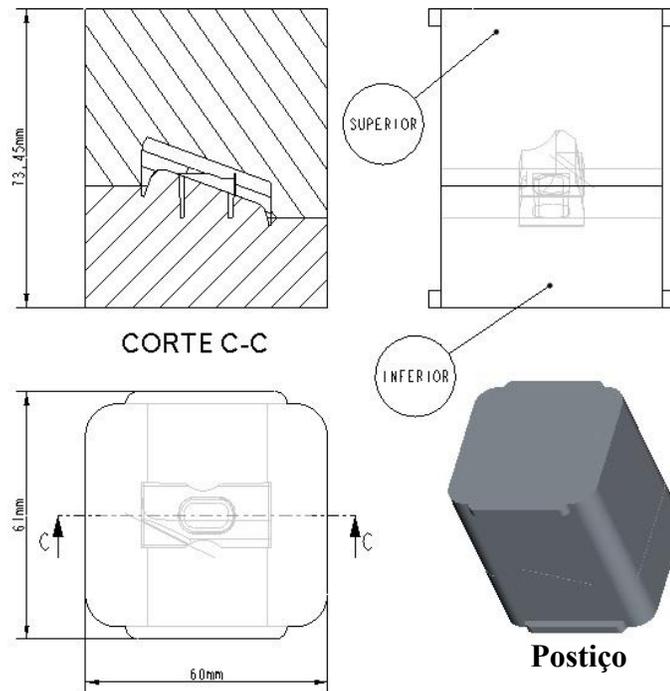
3.2.1 Aplicações do aço AISI P20

O aço AISI P20 é utilizado para fabricar componentes (postiços) de moldes de injeção. É necessário entender primeiramente o que é um postiço e qual sua função no sistema de injeção. Portanto, os postiços ou cavidades postiços ou machos são elementos que dão a forma interna ao produto, e são normalmente confeccionados de aço de boa qualidade. Apresentam as vantagens de poderem ser substituídos, quando houver avaria-nos mesmos, sem que haja alteração nos demais componentes do molde (KENNEDY, 2008; COSTA E SILVA, 2010, LOPES *et al.*, 2014).

Os postiços nos moldes barateiam o seu custo, e podem receber usinagens e tratamentos térmicos individualmente sem deformar o molde. As cavidades ou fêmeas, são elementos que dão a forma externa do produto de material plástico, são normalmente confeccionadas de aço de boa qualidade, e apresentam as mesmas características e vantagens dos postiços (machos) (KENNEDY, 2008).

A Figura 3.1 mostra um desenho do postiço utilizado em um molde de injeção plástica usado na realização do teste piloto na Empresa X.

Figura 3.1 - Componente de um molde (postiço).



Fonte: Próprio autor.

3.3 Tratamento Térmico

Tratamento térmico é um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços. O mesmo é realizado sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas (CHIAVERINI, 2003; COSTA e SILVA, 2010).

As propriedades dos aços dependem, em princípio, da sua estrutura. Os tratamentos térmicos modificam, em maior ou menor escala, a estrutura dos aços, resultando, em consequência, na alteração menos ou maior pronunciada de suas propriedades.

Segundo Chiaverini (2003), os principais objetivos dos tratamentos térmicos são:

- ✓ Aumento ou diminuição da dureza;
- ✓ Aumento da resistência mecânica;
- ✓ Remoção de tensões;
- ✓ Melhora da resistência ao desgaste;
- ✓ Melhora da usinabilidade;
- ✓ Modificação das propriedades elétricas e magnéticas.

3.3.1 Tratamento térmico para o aço AISI P20

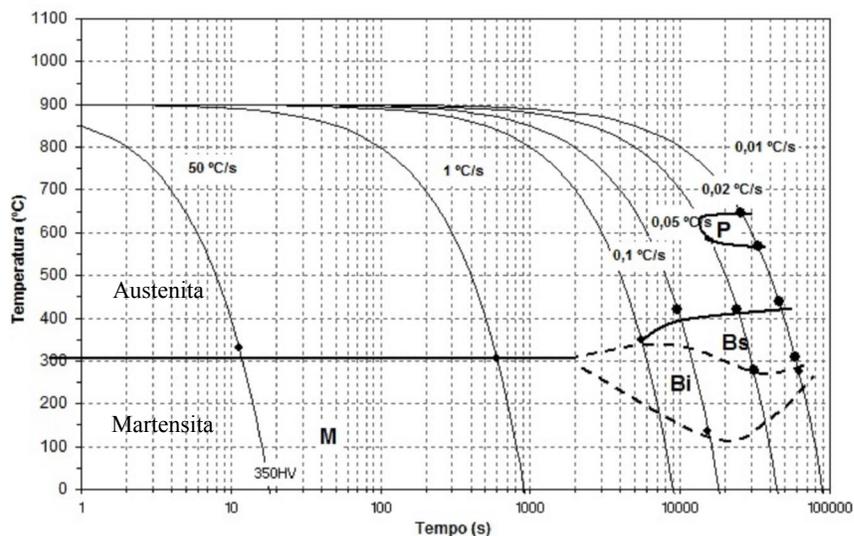
As operações de tratamentos térmicos são necessárias para atender aos requisitos de dureza de projeto, tenacidade e outras propriedades requeridas dos aços ferramenta (ASM, 1987).

Em relação ao aço AISI P20 os tratamentos térmicos a que este é submetido resumem-se aos recozidos pleno e de alívio de tensões, à têmpera e ao revenido. Em relação ao recozido pleno, é aplicada uma temperatura entre 720 a 740°C, e posteriormente realiza-se um resfriamento lento e controlado, de 10 a 20°C por hora, até cerca de 600°C dentro do forno e depois ao ar ambiente (SOARES, 2009).

O recozido de alívio de tensões é efetuado a cerca de 650°C, por um período de uma a duas horas após a homogeneização da temperatura atingir o núcleo da peça. A austenitização é realizada entre 840-860°C por um período de 15 a 30 minutos e posteriormente é resfriado no óleo. Após esta etapa, a dureza do aço fica em torno de 54 HRC (SOARES, 2009).

O aço AISI P20 apresenta o seguinte diagrama de transformação em resfriamento contínuo (CCT) conforme a Figura 3.2. Essas curvas CCT dos aços é uma forma de avaliar a temperabilidade de um determinado produto, e de predizer qual seria a dureza alcançada e a microestrutura formada no núcleo do material, após seu tratamento térmico (BACALHAU *et al.*, 2015).

Figura 3.2 - Curva de transformação em resfriamento contínuo do aço AISI P20.



Fonte: Adaptado da DIN 1.2311, Hippenstiel *et al.* (2004); Bacalhau (2015).

3.4 Tratamento de superfície

Os tratamentos térmicos são utilizados para alterar as propriedades físicas e mecânicas como: dureza, resistência mecânica, de toda a massa do aço. Nos casos em que se torna desnecessário estes procedimentos, utilizam-se os tratamentos de superfícies, que alteram apenas uma fina camada superficial não alterando a estrutura da peça e proporcionando à mesma um aumento da dureza superficial, resistência ao desgaste e à fadiga (WEN, 2009).

O tratamento de superfície é o complemento mais importante na linha de aços e deve ser selecionado de acordo com o tipo de material que será utilizado e dos parâmetros necessários para o processo de injeção (CORAZZA, 2012). Esse tratamento é realizado em três fases: aquecimento, manutenção na temperatura e resfriamento (MACHADO, 2006). Neste, a peça é aquecida juntamente numa atmosfera rica em elementos, como: carbono, nitrogênio ou boro. Os dois tipos mais utilizados industrialmente são o tratamento por cementação e nitretação, seguidos por carbonitretação, cianetação.

Esses tratamentos são essenciais em aços para moldes, que necessitam de um aumento significativo de resistência em sua superfície já que está sujeitos a severa solicitação mecânica e química, como por exemplo, desgaste superficial, corrosão, oxidação, resistência ao impacto etc., dependendo também, do polímero a ser injetado (COSTA E SILVA, 2010; LOPES, 2014).

3.4.1 Tratamento por cementação

A cementação é um tratamento termoquímico aplicado em peças/componentes em aços de baixo carbono. Consiste basicamente de enriquecimento superficial de carbono através de processos difusivos, seguido de têmpera para obtenção de superfícies significativamente duras e com núcleo tenazes, conferindo às peças/componentes elevada dureza superficial, resistência mecânica, resistência à fadiga e resistência ao desgaste entre outros (SILVA, 2016).

Atualmente a cementação gasosa é o processo termoquímico mais utilizado em escala industrial, onde um gás cementante é introduzido no forno por um gás veículo e sua função é promover as reações de cementação dando à atmosfera um determinado potencial de carbono (BOYER, 1987, SORS, 2002).

Segundo Boyer (1987), o gás veículo comercialmente mais utilizado é um gás endotérmico ou exotérmico purificado, que são compostos de CO, CO₂, H₂, CH₂, em diferentes proporções.

O processo de cementação pode ser classificado de acordo com o meio onde ocorre a difusão: cementação em caixa ou sólida, cementação com sais fundidos, cementação gasosa e cementação iônica ou por plasma (SILVA, 1997).

A cementação gasosa tem muitas vantagens sobre os outros métodos citados anteriormente (OGATA, 2003). Estas vantagens são:

- ✓ Possibilidade de se obter uma regulagem melhor do processo e de obtenção de uma profundidade de camada mais precisa;
- ✓ Menor tempo de preparação de cargas;
- ✓ Melhor segurança no processo, limpo e amigável com o meio ambiente, quando comparado com os meios cementantes sólidos à base de carbono ativado com cloretos e carbonetos, etc;
- ✓ A operação pode ser de fácil mecanização.

O uso dos aços cementados deverá ser evitado quando os componentes do molde tiverem nervuras finas ou cantos vivos de tal forma que podem ocorrer ruptura durante a têmpera (SORS, 2002; LOPES, 2014).

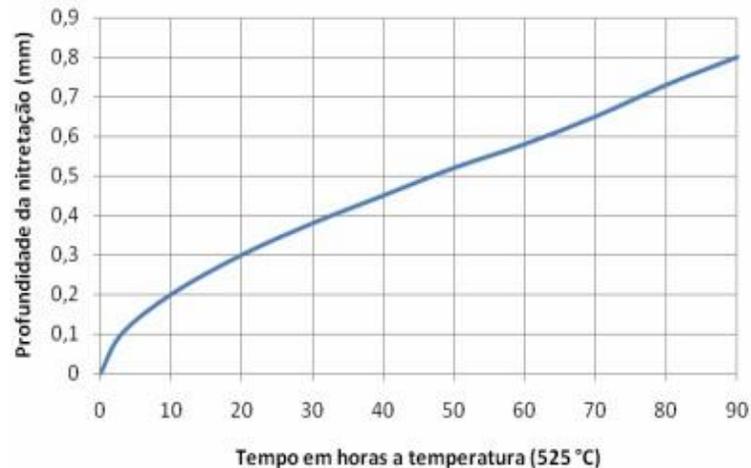
3.4.2 Tratamento por nitretação

A nitretação é um tratamento termoquímico de endurecimento superficial no qual se introduz nitrogênio superficialmente no aço, na forma atômica, por difusão, no interior do reticulado cristalino de ligas ferrosas e no campo de estabilidade da ferrita. Consequentemente, no processo de nitretação não ocorre nenhuma transformação de fase que não esteja relacionada com a precipitação de carbonetos e carbonitretos (THELNING, 1984; GONÇALVES, 2012).

Segundo os estudos realizados por Almeida (2009), baseados em análises microestruturais e no comportamento ao desgaste de aços ferramenta, comprovaram a melhoria nas propriedades do aço AISI P20 com o tratamento de superfície por nitretação. O tempo de exposição pode chegar até 72 horas, mas dificilmente ultrapassa a espessura de 0,80 mm de camada com dureza na ordem de 1000-1100 HV.

A Figura 3.3 apresenta o gráfico com a espessura de camada nitretada, em relação ao tempo de exposição, com temperatura de 525°C, destacando-se que quanto maior o tempo de processo maior será a formação da camada de nitretos.

Figura 3.3 - Gráfico da espessura da camada nitretada no aço AISI P20.



Fonte: Chiaverini (2008).

O processo de nitretação eleva a dureza superficial, aumenta a resistência ao desgaste e à fadiga, melhora a resistência à corrosão e a resistência superficial ao calor. Em consequência, as peças submetidas à nitretação são menos suscetíveis a empenamento ou distorção (CHIAVERINI, 2008).

Os benefícios que a nitretação oferece ao aço AISI P20 são:

- ✓ Por não promover deformações, não requer usinagem posterior e pode ser soldado;
- ✓ Aplicada em moldes de injeção plástica facilita a extração das peças injetadas;
- ✓ Melhora o escoamento do material a ser injetado. Em ferramentas de repuxo, diminui sensivelmente a necessidade de lubrificação.

As espessuras de camada e as condições resultantes do processo de nitretação são em função da temperatura, da composição do material e do tempo de tratamento (WEN, 2009).

3.4.3 Tratamento por carbonitretação

O tratamento por carbonitretação visa aumentar a dureza superficial de componentes metálicos e, assim melhorar as propriedades mecânicas superficiais destes componentes.

Atualmente existem inúmeros processos com essa finalidade como, por exemplo: cementação, cianetação, nitretação e a carbonitretação, etc (MONTEIRO *et al.*, 2010; ZAGONEL, 2011).

Segundo Chiaverini (2008), a carbonitretação é um tratamento que consiste no aquecimento do aço a uma temperatura elevada, geralmente acima da temperatura de transformação de fase, em uma atmosfera gasosa que fornece carbono e nitrogênio, simultaneamente, que são absorvidos pela superfície do metal (aço).

A atmosfera carbonitretante é composta pelos constituintes:

- ✓ Gás endotérmico, produzido pela decomposição (em gerador endotérmico) de gás natural ou outro hidrocarboneto, a qual é uma mistura de CH₄, C₂H₆ e CO, em porções de metano, oxigênio, vapor de água e CO₂.
- ✓ Gás natural, propano ou butano, amônia anidra (99% de pureza, no mínimo).

O objetivo principal da carbonitretação é conferir ao aço uma camada dura e resistente ao desgaste. Esta camada pode variar de 0,07 - 0,70 mm de espessura. As temperaturas utilizadas nesse processo variam de 705°C a 900°C.

As normas de tratamento térmico para a carbonitretação são regulamentadas pela ABNT NBR NM 136 (2000) - em seu parágrafo 8.2.4.4. Segue abaixo a denominação de compostos entre 5 µm e 20 µm de alta resistência à abrasão da fase épsilon dúctil e a diferença de fase gama primeiramente formada no nitreto gasoso:

- ✓ Uma camada do nitreto precipitado entre 0,2 mm e 0,4 mm, denominada de camada de difusão ampliada consideravelmente da resistência à fadiga;
- ✓ Uma camada de óxido de ferro superficial entre 1,0 µm e 3,0 µm durante etapas de pós-oxidação, para aumentar a resistência à oxidação;
- ✓ A duração do processo padrão é de 2h a 3h efetivas e entre 15h e 18h para nitrocarbonetação profundo.

3.5 Tribologia

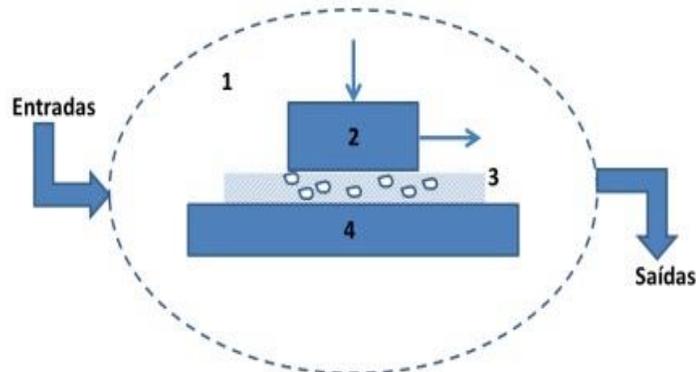
O significado da palavra Tribologia é derivado de duas palavras gregas, TRIBOS que significa atrito e LOGOS que significa estudo, no que se refere o significado de "Estudo de Atrito" ou a ciência que estuda o atrito. A tribologia é definida como a ciência e tecnologia das superfícies que interagem entre si mediante um movimento relativo, e abrange o estudo de atrito,

desgaste e lubrificação relacionando com seus aspectos físicos, mecânicos, metalúrgicos e químicos. Estes fenômenos sempre estiveram presentes na vida do ser humano há mais de 4000 anos (SINATORA, 2005; ; ANTÔNIO, 2016; SANTOS, 2016; FARIAS, 2017; AGUDELO, 2018).

Para estudar o atrito e o desgaste é necessário especificar um sistema bem definido de modo a delimitar o campo de validade das propriedades tribológicas. Atribuímos a esse sistema o nome de "Tribossistema" ou "Sistema Tribológico".

Segundo Andrade *apud* Horst Czichos (2017), criador da proposta de tribossistema, a estrutura do mesmo é constituída por quatro elementos: [1] ambiente, [2] corpo, [3] meio interfacial e [4] contrapeça como mostra a Figura 3.4.

Figura 3.4 - Exemplo genérico de sistema tribológico delimitado por uma fronteira. Através dessas ocorrem trocas, entradas e saídas, com o exterior.



Fonte: Adaptado de Czichos (1992).

As entradas para o sistema são: movimentos impostos, força, velocidade. Resultando em saídas úteis como movimento, ou gerando perdas como produtos de desgaste, calor, vibrações, entre outros. Os quatro elementos do tribossistema afetam diretamente as saídas, no entanto, nem todos eles precisam necessariamente estar presentes simultaneamente.

O desgaste em geral se constitui como um indicador de desempenho nos sistemas de engenharia, sendo responsável pela geração de folgas e de redução da eficiência (ZHANG & SCHLARB, 2009).

A grande importância da tribologia na indústria é estimar o tempo de vida útil das máquinas e/ou componentes de sistema de produção. Buscando evitar falhas mecânicas, geradas pelo atrito e pelo desgaste, impedindo assim quedas na produção e no faturamento de empresas.

Também se pode destacar, a relevância da tribologia em diminuir acidentes que coloquem em risco a vida de pessoas (HOLMBERG *et al.*, 2000; DUARTE, 2014).

É de extrema relevância se caracterizar de que forma completa os componentes após funcionamento em termos de parâmetros como rugosidade, topografia real do desgaste em MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura), além da determinação mais precisa possível do carregamento mecânico tribológico imposto pela aplicação (ZHANG & SCHLARB, 2009).

Os modos de falha por desgaste na indústria mundial somam um prejuízo de cerca de 4 bilhões de dólares anuais, sem contar as perdas com qualidade, disponibilidade de máquinas e penalidades por não cumprir os prazos de entrega (MONTEIRO, 2013). Ele ressalta que outras fontes de pesquisa retratam que esta falha chega a afetar em 2% do PIB industriais mundiais.

3.5.1 Tipos de desgaste

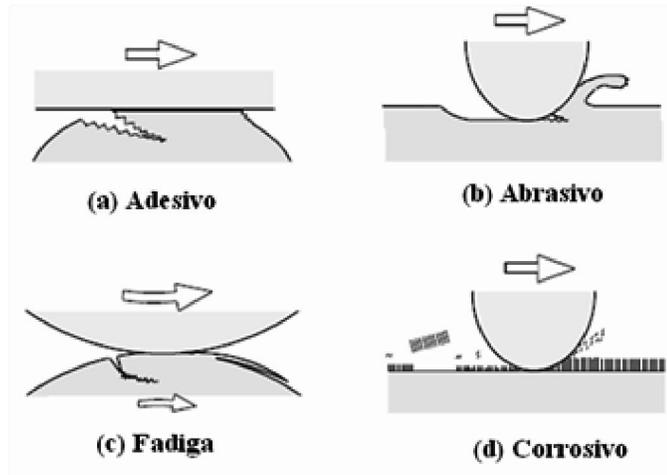
Na literatura encontram-se diversos termos que descrevem os processos de desgaste. Geralmente, a classificação desses processos é feita pelo mecanismo de desgaste predominante. Assim, desgaste é um processo complexo, resultado de diferentes processos que podem ocorrer independentemente ou em combinações (STOETERAU, 2004; SOUZA, 2016).

De acordo com a norma ASTM G40-96 (2017), existem vários tipos de desgaste, sendo os principais mecanismos de desgaste:

- ✓ Adesão: ocorre a formação e a quebra de ligações adesivas interfaciais, como nas junções soldadas a frio. Componentes como cames, engrenagens e mancais podem sofrer esse tipo de desgaste;
- ✓ Abrasão: ocorre a remoção de material devido ao riscamento, destacamento, sulcamento e etc. Calhas e extrusoras são alguns exemplos onde a abrasão pode ocorrer;
- ✓ Fadiga Superficial (de contato): ocorrem fadiga e formação de trincas nas regiões superficiais, devido a ciclos de tensão tribológicos que resultam na separação de material. Pode ocorrer em engrenagens, rolamentos, etc;
- ✓ Reação Triboquímica: ocorre a formação de produtos de reação química como resultado das interações químicas entre os elementos de um tribossistema. Podem ocorrer em correntes, molas, pistões, etc.

A Figura 3.5 fornece um panorama geral dos quatro tipos de desgaste citados anteriormente.

Figura 3.5 - Representação esquemática dos principais mecanismos de desgaste.



Fonte: Kato (2001).

3.5.2 Desgaste abrasivo

A resistência ao desgaste é um relevante fator na seleção de materiais nos projetos de tribologia aplicada e, conseqüentemente, testes de laboratório foram desenvolvidos com o objetivo de medir a resistência ao desgaste sob condições controladas semelhantes às condições de serviço. Através desse ensaio, podem-se investigar os mecanismos de desgaste e classificar os materiais para determinadas aplicações (HUTCHINGS, 1995).

A abrasão é o mecanismo de desgaste mais comum no meio industrial e é responsável por mais de 50% dos casos de desgaste, estando presente em diversos segmentos industriais (WOOD, 2010; MASSOLA, 2015).

Outra definição importante é apresentada pela ASTM G40-01 (2001) a qual apresenta o desgaste abrasivo como sendo "a perda de massa resultante da interação entre partículas ou asperezas duras que são forçadas contra uma superfície ao longo da qual se move". E, segundo a Norma Brasileira NBR 12042, "desgaste é a degradação superficial e remoção de partículas de um determinado tipo de material submetida à força de atrito" (ABNT NBR 12042, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2015).

Existe uma série de classificações diferentes para desgaste. O mesmo pode ocorrer como perda de material ou dano superficial (LUDEMA, 1981; BREGANON, 2015).

Nos metais o fenômeno de desgaste pode ocorrer pelo contato com outros metais, sólidos não metálicos, líquidos em movimento, ou ainda partículas sólidas ou partículas de líquido transportadas em um fluxo gasoso (RAMALHO, 1997; RIBEIRO, 2004).

Entretanto para cada tipo de desgaste, tem-se uma definição específica. O desgaste abrasivo é o tipo de desgaste focado nesta dissertação.

3.5.2.1 *Mecanismos de desgaste por Abrasão*

O mecanismo básico de desgaste por abrasão foi proposto por Khrushchov e Babichev (1971). Existem dois processos agindo quando o abrasivo entra em contato com a superfície: o primeiro seria a formação de um sulco devido à deformação plástica, porém sem remoção de material e o segundo, a remoção do material da superfície na forma de pequenos cavacos (ANTÔNIO, 2016). Estudos posteriores mostraram que aproximadamente 40% do material é removido por cavacos e o restante por deformação plástica (cisalhamento).

Os principais mecanismos de desgaste por abrasão são (NOBLE, 1984; RIBEIRO, 2004):

- ✓ Para metais dúcteis: usinagem, onde as partículas abrasivas removem cavacos da superfície do material (processo similar à conformação). **Sulcagem:** que promove deformação plástica localizada e encruamento, isto porque, o sulcamento contínuo introduz efeito à fadiga, facilitando o arrancamento do material.
- ✓ Para metais mais duros (frágeis): **lascamento** é o mecanismo dominante, ele ocorre quando trincas sub-superficiais laterais e verticais se interceptam.

3.6 Rugosidade

O estudo do acabamento superficial torna-se importante nos casos em que se exige uma precisão no ajuste entre componentes. A rugosidade superficial é definida como "conjunto de desvios microgeométricos, caracterizado pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície (PIRATELLI FILHO, 2011; ROSA *et al.*, 2014).

Dependendo da aplicação, as deformações advindas da rugosidade são desejadas ou não, devendo se adequar ao tipo de função que o componente exerce. Por exemplo, os materiais com maior grau de rugosidade são mais propensos a sofrer corrosão e efeitos de fadiga, mas esse fator também auxilia no ajuste de peças mecânicas. Tal fato é evidenciado em um estudo que relaciona a corrosão com a rugosidade (GRAVALHOS *et al.*, 2010).

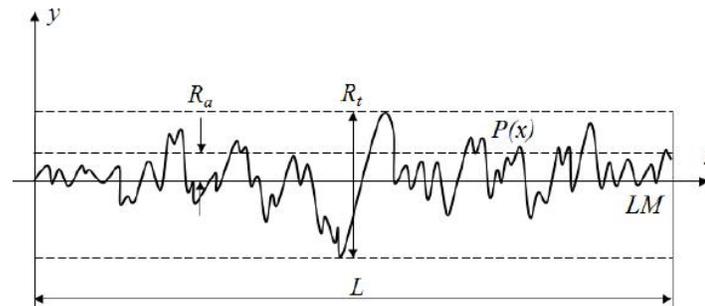
3.6.1 Parâmetros de rugosidade

Os parâmetros de rugosidade são diferentes e aplicáveis a diversas situações. A sua escolha depende da aplicação da superfície, sendo recomendado o uso de mais de um parâmetro para identificar particularidades desejáveis. O parâmetro de rugosidade média (ou desvio médio aritmético) " R_a " (do inglês *Roughness Average*) é um parâmetro bem conhecido e utilizado por engenheiros há décadas, servindo basicamente, como modelo de medida. Ele reflete um parâmetro conhecido e comprovado experimentalmente, assim, sua utilização fornece solução confiável (KOVAKS *et al.*, 2012; MELLO *et al.*, 2012; DELAVALD, 2017).

O parâmetro R_a é o mais usado em âmbito internacional em usinagens (MESQUITA, 1992; ISO 4287, 2002; DEVERAS, 2016). O mesmo consiste da média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo (medido) em relação à linha média em um comprimento de amostragem (AGOSTINHO *et al.*, 1990; PEREIRA, 2006). Outros parâmetros utilizados são o R_q (do inglês *Root Mean Square* ou RMS) que tem as mesmas utilizações e fornece ao usuário, de maneira essencial, a mesma informação, já que ambas são médias; contudo, amplifica os valores que se distanciam. E por último o parâmetro R_t , denominado altura total do perfil, é uma medida mais simples e não exige cálculos. O R_t representa a maior distância de pico ao vale em cada comprimento de amostragem, denominado *Cut-off* "i", dentro do comprimento de avaliação, é empregado quando é desejável (ou necessário) especificar a altura máxima da rugosidade, pois é diretamente influenciado por qualquer defeito ou irregularidade na superfície (MACHADO *et al.*, 2009).

A Figura 3.6 mostra a representação gráfica dos parâmetros de rugosidade R_a , R_t e L é a extensão da amostra, x é a abscissa da curva do perfil $P(x)$ e LM é a linha média.

Figura 3.6 - Rugosidades R_a e R_t em um perfil de superfície $P(x)$.



Fonte: Mello *et al.*, 2012).

3.6.2 Medição de rugosidade

Medição de rugosidade denomina-se um conjunto de fatores envolvidos em uma operação, abrange o meio de medição, o procedimento de medição, o agente que efetua a medição, o método de medição e a clara definição do mensurado (GONÇALVES JR. & SOUSA, 2008). Na medição de rugosidade, são recomendados valores para o comprimento da amostragem (*Cut-off*), conforme Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Comprimento da amostragem (*Cut-Off*).

Rugosidade R_a [μm]	Mínimo <i>Cut-off</i> [μm]
De 0 até 0,1	0,25
Maior que 0,1 até 2,0	0,80
Maior que 2,0 até 10,0	2,50
Maior que 10,0	8,0

Fonte: Gonçalves Jr.; Sousa (2008).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Material

O aço AISI P20 foi utilizado neste trabalho por se tratar do material mais utilizado para a fabricação de peças para moldes de injeção plástica (postiços/inserto), cerca de 80%, principalmente no setor automotivo (HIPPENSTIEL *et al.*, 2004; BACALHAU *et al.*, 2015). O aço AISI P20 provém de uma barra laminada (a quente), possui várias dimensões redondas, retangulares e quadradas até 400 mm, produzido pela Villares Metals.

A composição química do aço AISI P20 na condição conforme recebido (CR): temperado e revenido com dureza de 28-32 HRC é mostrada na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 - Composição química do aço AISI P20 nominal e obtida (% peso).

Elementos	C	Si	Mn	Cr	Mo
Nominal	0,28-0,40	0,20-0,80	0,60-1,00	1,40-2,00	0,30-0,55
Obtida	0,35	0,53	0,89	1,96	0,42

Fonte: Próprio autor.

4.2 Métodos

Os corpos de prova de aço AISI P20 foram confeccionados na Empresa X. Visando endurecimento, os corpos de prova foram posteriormente submetidos a dois processos de modificação de propriedades distintos, a saber:

- (a) tratamento térmico de têmpera e revenimento;
- (b) Tratamento termoquímico de carbonitreção gasosa.

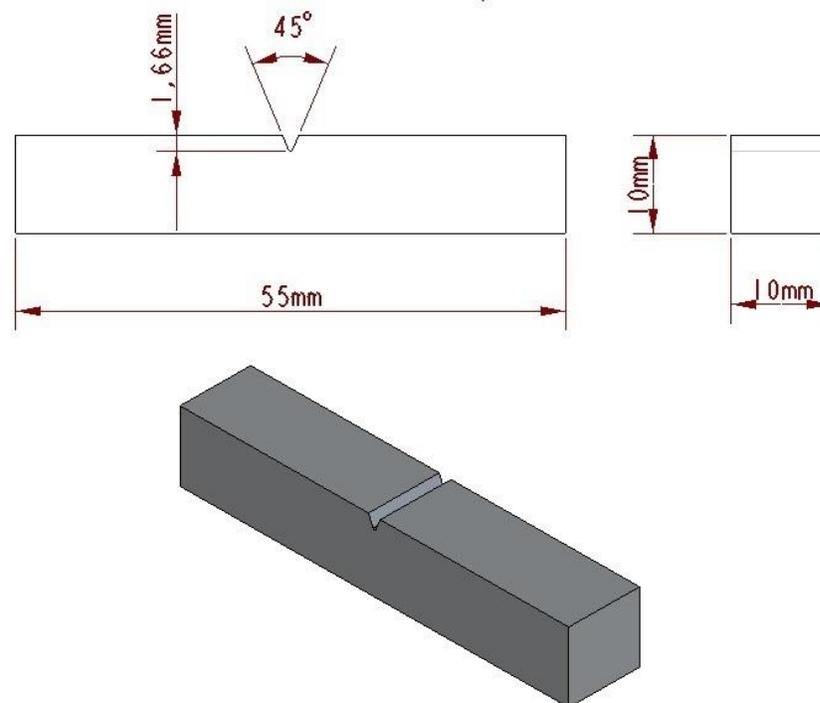
4.2.1 Corpo de prova para ensaio de impacto

Foram confeccionados 15 corpos de prova (CP) para o ensaio de impacto (Charpy) devido à quantidade de material disponível para a realização do experimento, sendo: cinco do material conforme recebido (CR), cinco foram submetidos ao tratamento térmico de têmpera em banho de sal e cinco foram carbonitretadas. Também foi realizados nos (CP's) ensaio de impacto, ensaio de

abrasão, análise química, microscopia óptica, ensaio de dureza e microdureza, MEV/SE/EDS para avaliar a topografia da fratura, seguido de análise química e rugosidade.

A geometria dos corpos de prova utilizados para o ensaio de impacto (Charpy) em materiais metálicos é determinada pela norma ASTM E 23-01 (2001), cujo entalhe é tipo A. De acordo com a norma, as amostras possuem formato retangular, com dimensões 10 x 10 x 55 mm, com um entalhe feito em uma das faces de maior dimensão, no ponto médio, contendo um perfil triangular igual a 2 mm, conforme desenho exibido na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Corpo de prova de aço AISI P20 para ensaio de impacto Charpy.



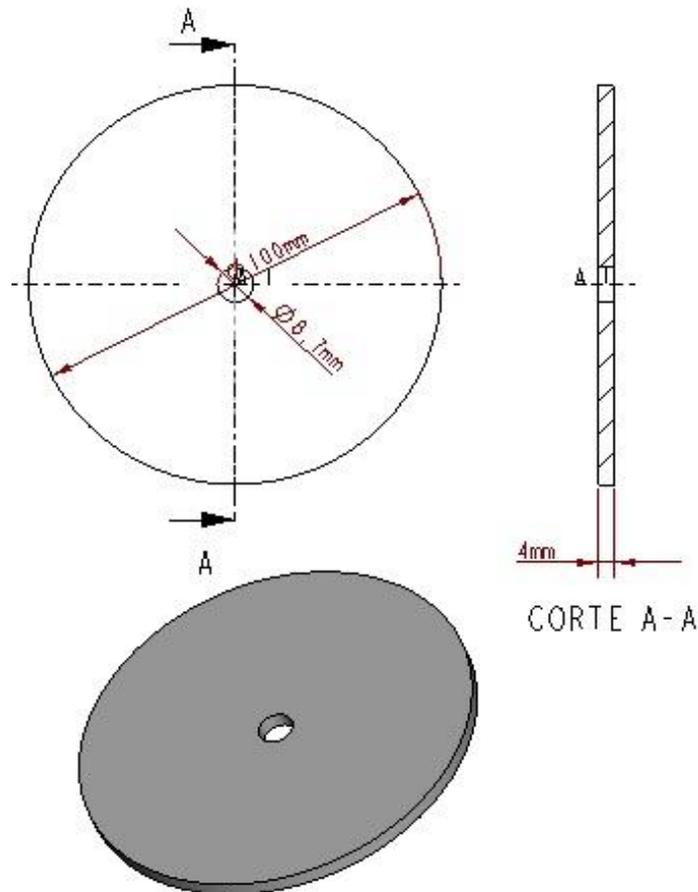
Fonte: ASTM E 23-01 (2001).

4.2.2 Corpo de prova para ensaio de abrasão

Para o ensaio de abrasão foram confeccionados 6 corpos de prova, essa quantidade é suficiente para a realização desse ensaio e foram divididos em: dois de conforme material recebido (CR), dois foram submetidos ao tratamento térmico de têmpera em banho de sal e dois foram carbonitretados. Também foi realizado nos (CP's) análise química, ensaios de dureza, microdureza, microscopia óptica e teste de rugosidade.

A geometria dos corpos de prova segue uma instrução de trabalho (ITR) elaborada pelo setor de normalização da Empresa X o qual, foi baseada na ASTM G195 - 13a (2013) (*Standard Guide for Conducting Wear Tests Using a Rotary Platform Abraser*), com as seguintes dimensões: diâmetro externo de 100 mm, espessura de 4 mm e com um furo no centro de 8,7 mm, de acordo com o desenho exibido na Figura 4.2.

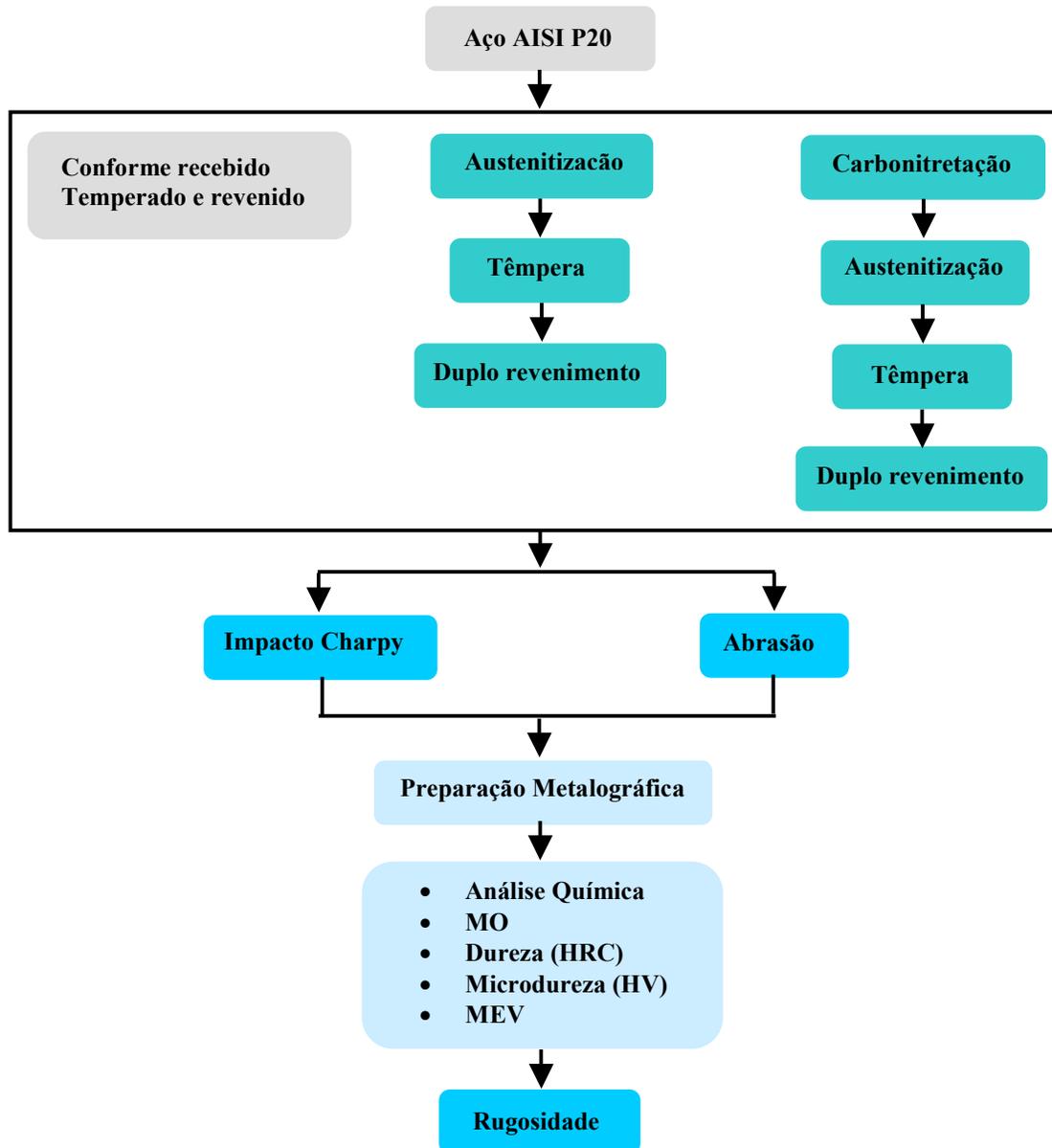
Figura 4.2 - Corpo de prova de aço AISI P20 para ensaio de abrasão.



Fonte: ASTM G195 - 13a (2013).

O procedimento experimental e as técnicas de caracterização utilizadas no desenvolvimento do trabalho serão detalhados de acordo com o fluxograma a seguir (Figura 4.3):

Figura 4.3 - Fluxograma do experimento.



Fonte: Próprio autor.

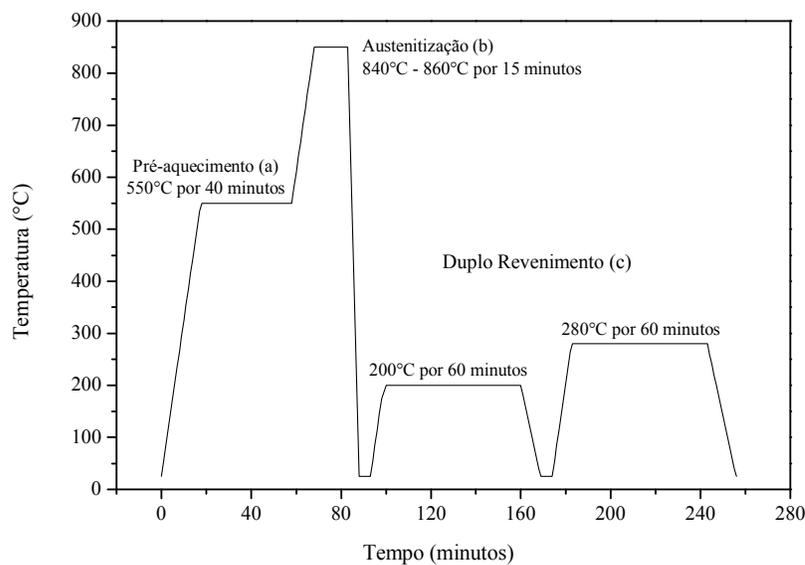
4.2.3 Tratamento térmico

Os tratamentos térmicos aplicados foram: têmpera e revenimento conforme a norma DIN 10269 (2014) (Figura 4.4), sendo adotados os parâmetros de QT - *Quenched and tempered*. Os corpos de prova, inicialmente, foram amarrados com arame recozido em feixes de 5 unidades para evitar distorções dimensionais, e as etapas de tratamento térmico são descritas a seguir:

- ✓ Preaquecimento a 550°C durante 40 minutos num forno elétrico de poço marca Brasimet, modelo VK 60/80;
- ✓ Austenitização em banho de sal fundido GS 540 de Cloreto de Bário (BaCl_2) misturado com sal R2 de Cloreto de Bário (BaCl_2) para evitar descarbonetação, fornecido pela empresa Durferrit. Temperatura de austenitização deve ser mantida entre 840-860°C durante 15 minutos num forno elétrico de poço marca Brasimet, modelo TO 50/80, foi utilizada a taxa de aquecimento de 30°C/min;
- ✓ Têmpera em óleo marca Alkalisol TMP 30 fornecido pela empresa Alkallis na temperatura de 70°C sob agitação de acordo com o fabricante;
- ✓ Revenimento duplo conforme descrito abaixo realizado num forno elétrico de poço marca brasimet, modelo FCA 50/80, com resfriamento ao ar até a temperatura ambiente:
 - ✓ (I) a temperatura de 200°C durante 60 minutos;
 - ✓ (II) a temperatura de 280°C durante 60 minutos para aliviar as tensões internas e atingir a dureza especificada da peça.

Todas as etapas do tratamento termoquímico foram executadas na Empresa X.

Figura 4.4 - Esquema do procedimento experimental utilizado durante a austenitização em banho de sal e resfriamento em óleo seguido de duplo revenimento para o aço AISI P20.



Fonte: Próprio autor.

4.2.4 Carbonitreção Gasosa

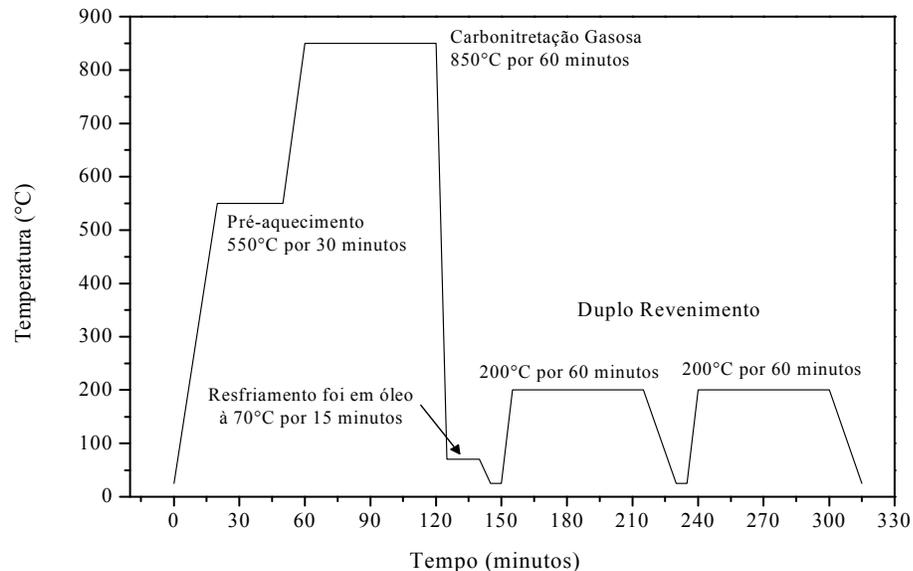
O tratamento termoquímico realizado foi a carbonitreção gasosa conforme a norma ABNT NBR NM 136 (2000) em seu parágrafo 8.2.4.4, seguido de têmpera e revenimento (Figura 4.5). Os corpos de prova foram colocados devidamente organizados em cestos apropriados com as faces de trabalho voltadas para cima (local que deverá adquirir a camada carbonitretada na espessura de 0,1 mm proposto para esse experimento) sem que houvesse obstrução da passagem de gás, e segundo as etapas a seguir:

- ✓ Preaquecimento foi de 550°C permanecendo sob esta temperatura por 30 minutos (mínimo) no forno elétrico marca Combustol, modelo Batch T-4E, Série F-1841 VEF-1260, conhecido por forno de atmosfera controlada (Figura 4.7);
- ✓ Carbonitreção a temperatura controlada de 850°C permanecendo sob esta temperatura por 60 min, com atmosfera do forno composta por:
 - ✓ Gás endotérmico 250 pés cúbico por hora (CHF);
 - ✓ Amônia 50 CHF;
 - ✓ Propano direto 0,5 CHF.
- ✓ O resfriamento foi em óleo Alkalisol TMP 30 sob a temperatura de 70°C permanecendo por 15 minutos e a seguir foi resfriado ao ar.
- ✓ Revenimento duplo conforme descrito abaixo, realizado num forno elétrico de poço marca Brasimet, modelo FCA 50/80, com resfriamento ao ar até a temperatura ambiente:
 - ✓ (I) a temperatura de 200°C durante 60 minutos;
 - ✓ (II) a temperatura de 200°C por 60 minutos para ajuste da dureza de camada (0,1mm).

Posteriormente foram reaproveitados os CP's do material CR e foi realizado outro tratamento de carbonitreção gasosa de acordo com os mesmos procedimentos citados anteriormente, alterando apenas o tempo de exposição no forno de 60 minutos para 15, 30, 90 e 120 minutos com o objetivo de avaliar a espessura da camada em relação ao tempo.

Todas as etapas do tratamento termoquímico foram executadas na Empresa X.

Figura 4.5 - Esquema do procedimento experimental utilizado durante a carbonitreção gasosa, têmpera e resfriamento em óleo para o aço AISI P20.



Fonte: Próprio autor.

Algumas observações importantes que devem e foram seguidas para a realização do tratamento termoquímico de carbonitreção gasosa:

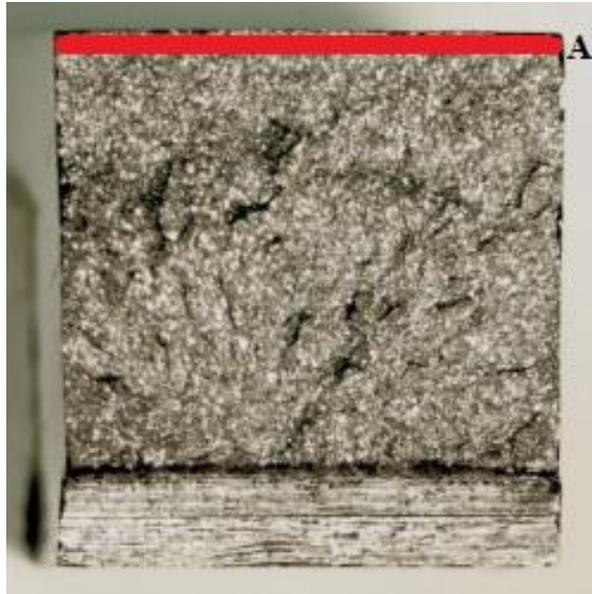
- 1) Condicionar o forno por 60 minutos antes de iniciar o tratamento;
- 2) Para operação com amônia:
 - ✓ Após a admissão de amônia, o forno deve permanecer no mínimo por 60 minutos em condicionamento;
 - ✓ Quando a temperatura estabilizar em 850°C, admitir amônia e diminuir o gás endotérmico para 250 CFH;
 - ✓ Devido à presença de hidrogênio proveniente da dissociação da amônia, abrir as portas do forno em dois estágios, dando o tempo necessário para a completa ignição da cortina de chama antes da abertura total das mesmas.

4.2.5 Ensaio de Impacto Charpy

O ensaio de impacto Charpy foi realizado de acordo com a norma ASTM E23-01 (2001). Os corpos de prova fraturados no ensaio de impacto Charpy tiveram suas superfícies de fraturas observadas no microscópio óptico (MO) e no microscópio eletrônico de varredura (MEV/SE).

As expansões laterais foram obtidas utilizando relógio comparador montado num traçador de altura, através da diferença entre a largura inicial do corpo de prova e a largura da região deformada (linha A), conforme a Figura 4.6.

Figura 4.6 - Região utilizada nos corpos de prova no ensaio Charpy para obtenção das expansões laterais: (A) Região deformada.



Fonte: Próprio autor.

4.2.6 Ensaio de abrasão

Para a realização do ensaio de abrasão nas amostras foram utilizadas as duas faces do corpo de prova. O ensaio utilizou os seguintes equipamentos: máquina de ensaio Abraser Model 503 Standard, balança Shimadzu BL320H com capacidade 320g, leitura 0,001g instalados na Empresa X, também foi utilizado rebolo abrasivo de óxido de alumínio branco (AA60), para ensaio de desgaste a seco.

Este ensaio é resultante do cálculo da diferença de massas conforme o processo a seguir:

- ✓ Primeiramente o corpo de prova deve ser limpo;
- ✓ Pesar e registrar o peso de mesmo utilizando uma balança de precisão;
- ✓ Posteriormente realizar o ensaio até atingir o número de 5000 ciclos;
- ✓ Usar uma carga de 500g por um período de uma hora e vinte minutos para este trabalho;

- ✓ Calcular a perda de volume e utilizar a densidade de $7,9 \text{ g/cm}^3$ para o aço;
- ✓ Calcular o coeficiente de variação;
- ✓ Calcular a média e o desvio padrão para todos os corpos de prova;

Os resultados de perda de massa obtidos devem ser convertidos em perda de volume conforme a equação 1:

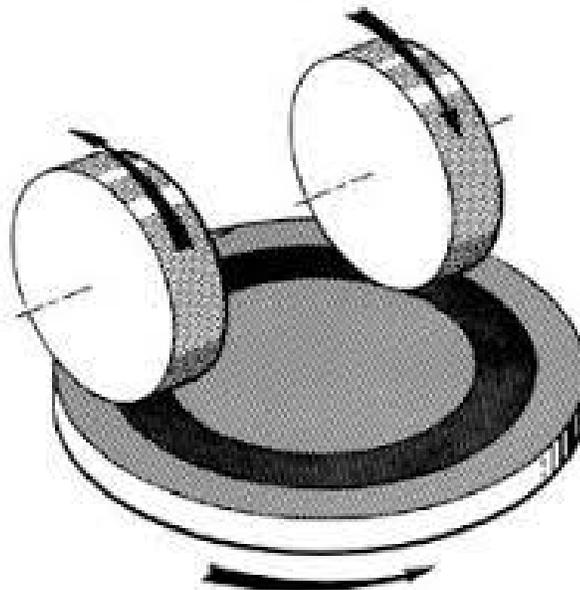
$$\text{Perda de Volume (mm}^3\text{)} = \frac{\text{Perda de massa (g)} \times 1000}{\text{Densidade (g/cm}^3\text{)}} \quad (1)$$

O coeficiente de variação deve ser calculado através da equação 2:

$$\text{Coeficiente de variação} = \frac{\text{Desvio padrão}}{\text{Média dos dados}} \times 1000 \quad (2)$$

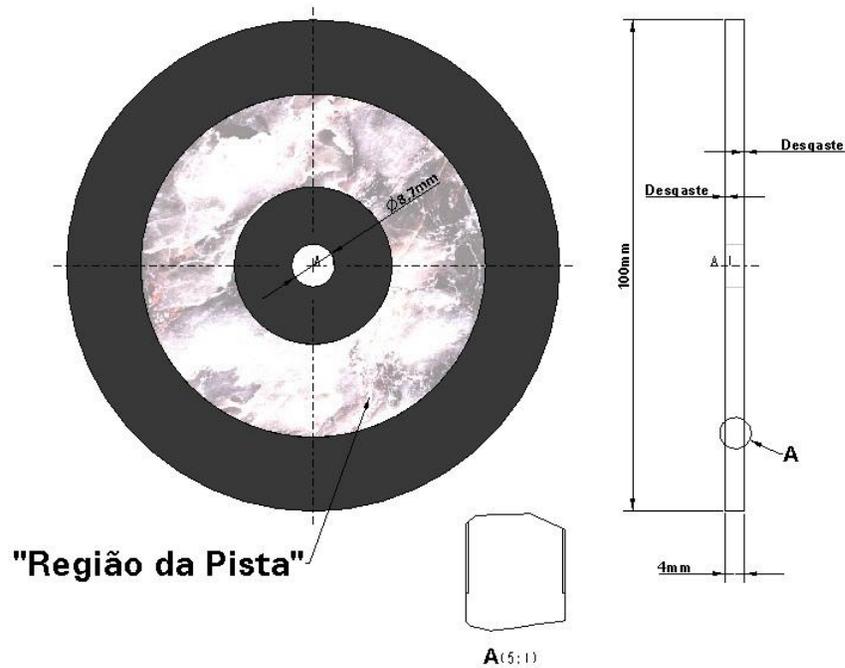
A figura 4.7 mostra o sentido de trabalho realizado pelos rebolos abrasivos e do corpo de prova e na Figura 4.8 a área brilhante mostra onde foi realizado o ensaio de abrasão e recebe o nome de "Região da Pista".

Figura 4.7 - Sentido de trabalho dos rebolos abrasivos e do corpo de prova.



Fonte: Empresa X.

Figura 4.8 - Corpo de prova ensaiado, desgaste nas duas faces (Região da Pista).



Fonte: Próprio autor.

4.2.7 Técnicas de caracterização

No presente trabalho foram utilizadas técnicas de caracterização microestrutural mecânica. Essas técnicas serão apresentadas a seguir.

4.2.7.1 Metalografia

4.2.7.1.1 Preparação das amostras do aço AISI P20

A preparação das amostras do aço AISI P20 conforme recebido (CR) temperado e revenido com dureza de (28-32) HRC; do material temperado (T) e revenido com dureza de (40-45) HRC e do material carbonitretado (C + N) temperado e revenido (espessura de camada 0,1 mm) com dureza de (54-56) HRC para a realização da análise metalográfica de acordo com a ABNT NBR 15454 (2007), envolver os seguintes procedimentos:

- ✓ Foram utilizados os próprios corpos de prova preparados para o ensaio de impacto Charpy e os corpos de prova do ensaio de abrasão;
- ✓ Todos os corpos de prova foram cortados e embutidos em baquelite;

- ✓ Lixamento das faces com lixas de granulação, #400, #600 e #1200, seguido de polimento manual com solução sílica (Alumina);
- ✓ Para a revelação da microestrutura, foi utilizado o reagente Nital 2% (ataque químico), a amostra ficou submersa durante um período de 5 segundos.

4.2.7.1.2 Análise química do aço AISI P20

Para obter as características composicionais quantitativas dos materiais conforme recebido (CR) temperado e revenido, do material temperado e revenido (T) e do material carbonitretado (C + N) temperado e revenido foi utilizado o espectrômetro marca *Spectro*, modelo SPECTROMAXX (Figura 4.9), cuja espectroscopia é de emissão óptica disponível nas instalações da Empresa X.

A amostra metálica não necessita de qualquer preparação além dos processos de corte, lixamento e limpeza, a qual será submetida à ação de um arco elétrico, tendo uma parte vaporizada e transformada em plasma. Os elétrons e íons excitados neste plasma têm suas emissões decompostas em componentes espectrais os quais são processados pelo equipamento.

Através das intensidades, o comprimento de ondas do espectro é possível identificar quais são os elementos químicos presentes no material, bem como suas porcentagens em massa (SPECTRO ANALYTICAL INSTRUMENTS GMBH, 2013).

Figura 4.9 - Espectrômetro utilizado para análise química, modelo SPECTROMAX.



Fonte: Próprio autor.

Todos os equipamentos de inspeção, ensaios e medição utilizados no recebimento de materiais da Empresa X são devidamente calibrados periodicamente, incluindo o espectrômetro utilizado neste trabalho. Tal fato garante a confiabilidade dos resultados obtidos na análise.

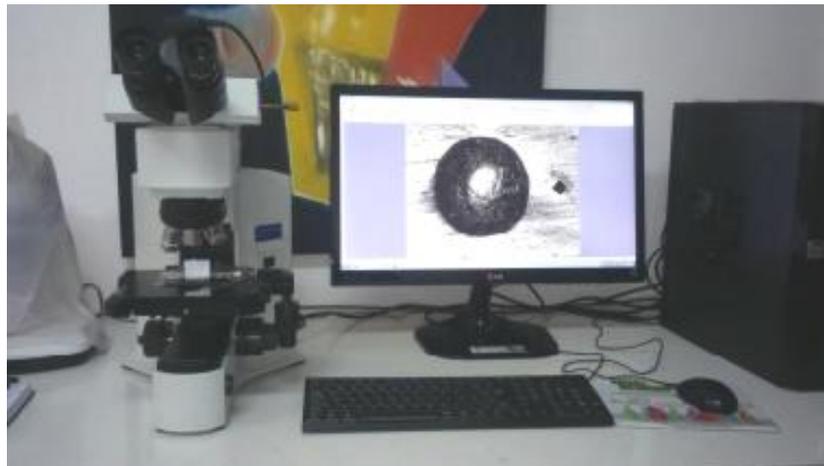
4.2.7.1.3 Microscopia óptica

Após a preparação metalográfica, com ataque, foi realizada a caracterização microestrutural das amostras no estado conforme recebido e após o tratamento térmico de têmpera e revenimento e do tratamento termoquímico de carbonitreção gasosa com o auxílio de técnicas de microscopia óptica (MO).

Para avaliação das características microestruturais presentes foi utilizado o microscópio óptico marca ZEISS, modelo Jenavert, com câmara fotográfica *Infinity 1*, Software analysSIS/DOCU da *Imaging System Co*.

Esse equipamento pertence ao Laboratório de Materiais e Metalurgia (LMM) da UNIFEI, conforme Figura 4.10.

Figura 4.10 - Microscópio óptico marca ZEISS, modelo Jenavert, com câmara fotográfica *Infinity 1*, Software da *Imaging System Co*.

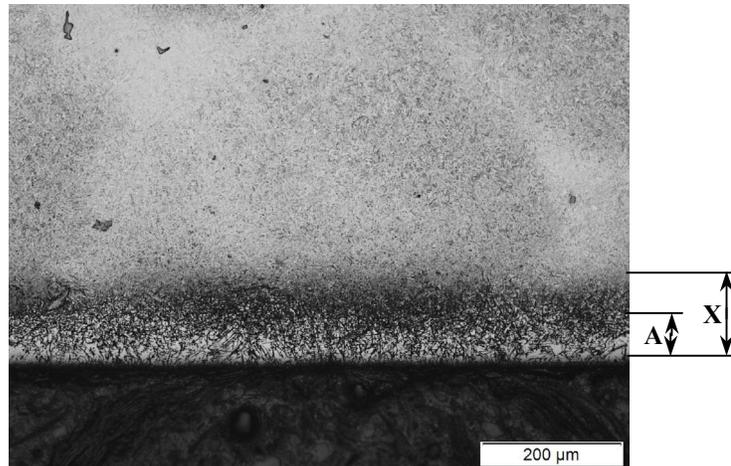


Fonte: Laboratório de materiais e metalurgia - LMM da UNIFEI.

A microscopia óptica também foi utilizada para determinar a espessura da camada carbonitretada (X) composta pela camada de difusão e camada branca (A) em um grupo de 5 amostras reaproveitadas dos CP's (CR), esse tratamento de carbonitreção foi realizado posteriormente ao que foi proposto no experimento com a finalidade de verificar a camada em

função do tempo de exposição no forno. Os tempos de exposição no forno utilizados foram de: 15 min, 30 min, 60 min, 120 Min e 180 min. A Figura 4.11 mostra a espessura da camada (X), corte transversal.

Figura 4.11 - Aço AISI P20 espessura de camada (X) carbonitretada, camada branca (A), corte transversal. Ataque Nital 2% 5s.



Fonte: Próprio autor.

4.2.7.1.4 Ensaio de dureza Rockwell e ensaio de microdureza Vickers

As amostras foram submetidas a ensaios de dureza Rockwell e de microdureza Vickers, visando avaliar a influência das alterações microestruturais nas propriedades mecânicas do aço AISI P20 em cada etapa do processamento, após a preparação metalográfica, mas sem ataque químico.

Para as medidas de dureza utilizou-se durômetro de bancada da marca Mitutoyo, modelo HR-400, com carga de 150 kg por 15 segundos, escala "C", conforme norma ABNT NBR NM ISO 6508 (2008). Cada amostra recebeu 5 endentações medidas em duas posições perpendiculares (na face horizontal e na transversal), este equipamento pertence à Empresa X.

Para as medidas de microdureza utilizou-se o microdurômetro de bancada da marca Digimess, modelo: HV-1000, e um penetrador com ponta de diamante com formato piramidal de base quadrada, com um ângulo de 136° entre as faces opostas e a escala aplicada foi HV 0,1, com carga de 0,5 Kg. Foram efetuadas 5 endentações, o tempo de 10 segundos para cada uma das duas posições perpendiculares (na face horizontal e na transversal), com o auxílio do sistema automatizado de metrologia visual marca Mitutoyo, modelo Quick Vision-ELF, de acordo com a

norma ASTM E92-16 (2016). Este equipamento pertence ao Laboratório de Materiais e Metalurgia (LMM) da UNIFEI.

4.2.7.1.5 *Microscopia eletrônica de varredura*

Para avaliação da fractografia das amostras após o ensaio de impacto Charpy foi feito MEV utilizando detectores de elétrons secundários (SE), microanálise química por dispersão de energia (EDS). O microscópio utilizado foi o da marca Carl Zeiss, modelo EVO MA15, instalado no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) da UNIFEI, conforme Figura 4.12.

Também foi utilizado o espectrômetro de energia dispersiva (EDS) da marca Brunker, modelo XFlash 6|10, acoplado ao MEV para determinação quantitativa das composições químicas das fases presentes nas amostras a fim de obter informações adicionais a respeito da distribuição dos elementos químicos.

Figura 4.12 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), marca Carl Zeiss, modelo EVO MA15.



Fonte: Laboratório de Caracterização Estrutural - LCE da UNIFEI.

4.2.7.1.6 *Rugosidade*

A rugosidade superficial foi avaliada logo após o ensaio de abrasão utilizando o rugosímetro Mitutoyo, modelo SurfTest SJ0400 (Figura 4.13), instalado no Laboratório de Metrologia da Divisão de Qualidade da Empresa X, de acordo com a norma ABNT NBR 4287

(2002). Em todas as amostras obteve-se o valor médio das leituras expressa em " R_a " (valor médio da rugosidade superficial) e a unidade de medida foi o micrômetro (μm).

Antes de iniciar a medição da rugosidade nas amostras, as mesmas foram limpas adequadamente para retirar os resíduos decorrentes do ensaio de abrasão.

Os valores obtidos na realização do teste de rugosidade foram realizados na "Região da Pista", obedecendo aos seguintes parâmetros de leitura utilizados na Empresa X:

- ✓ Tipo de leitura: valor médio da rugosidade superficial (R_a);
- ✓ Comprimento da amostragem (*Cut-off*): 0,8 mm;
- ✓ Raio de ação: 80 μm ;
- ✓ Desvio padrão do equipamento: 6%.

Figura 4.13 - Rugosímetro modelo Surftest SJ-400, marca Mitutoyo.



Fonte: Próprio Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises obtidas após os tratamentos térmico e termoquímico e posteriores ensaios mecânicos nos quais as amostras foram submetidas são discutidos neste capítulo.

5.1 Composição química

5.1.1 Aço AISI P20

O resultado da análise química em espectrômetro apresentados na Tabela 5.1 mostra que o único elemento que sofreu alteração foi o carbono (C) devido ao tratamento termoquímico de carbonitreção (C + N) que ultrapassou o limite da faixa de trabalho especificada pela norma ASTM A 681 (2008). Esse aumento ocorreu devido à inserção de carbono através do processo difusivo e conseqüentemente o mesmo proporciona um aumento na dureza da superfície.

Tabela 5.1 - Composição química por espectroscopia do aço AISI P20: conforme recebido (CR) temperado e revenido (T); carbonitretado, temperado e revenido (C + N). ASTM A 681. (% peso).

Elemento	CR	T	C + N	ASTM A 681	
				Min.	Máx.
	Concentração				
C	0,35	0,34	0,58	0,28	0,40
Si	0,53	0,53	0,53	0,20	0,80
Mn	0,89	0,89	0,89	0,60	1,00
Cr	1,96	1,96	1,96	1,40	2,00
Mo	0,42	0,42	0,42	0,30	0,55

Fonte: Próprio autor.

5.2 Caracterização do material

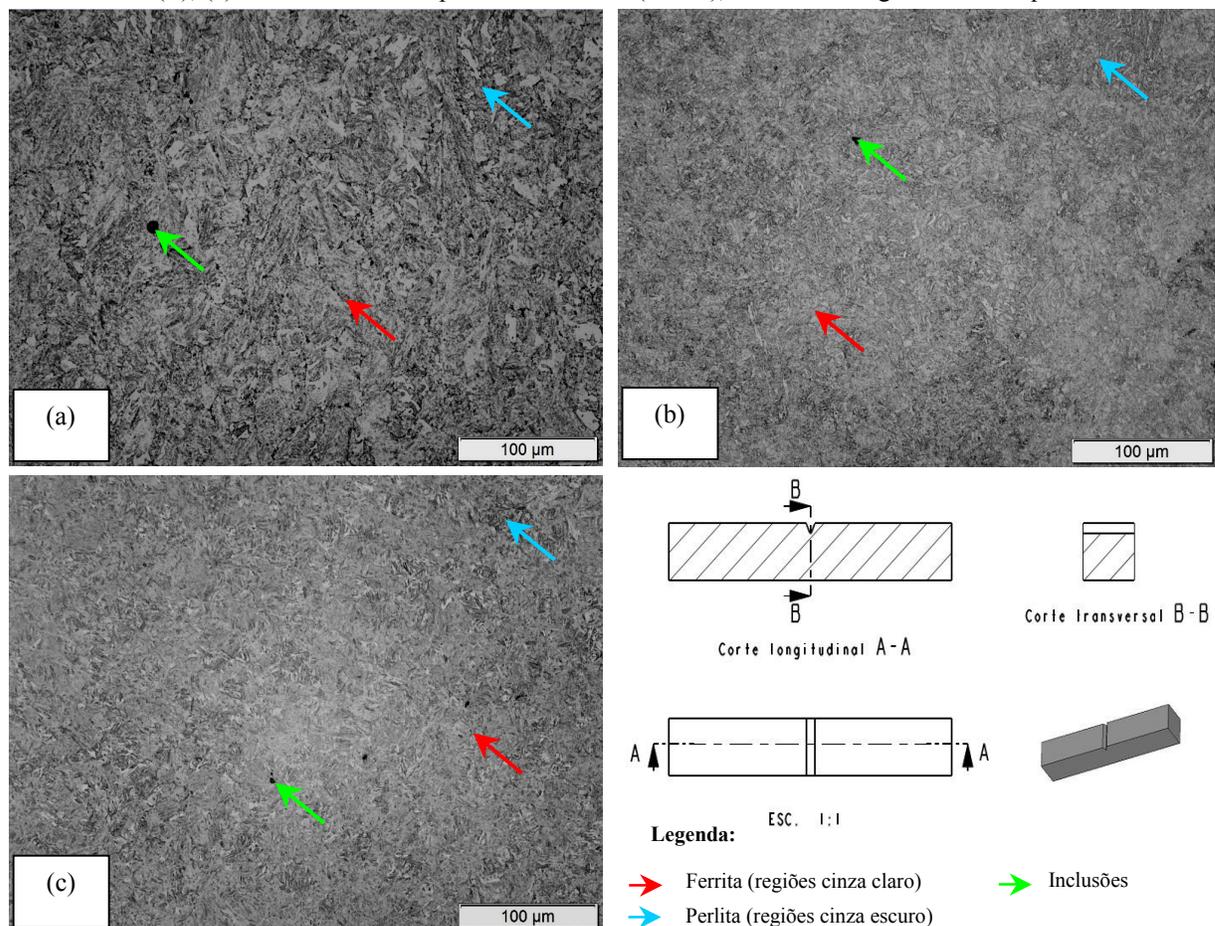
Após os seguintes tratamentos, têmpera em banho de sal fundido e carbonitreção gasosa, todas as amostras incluindo as do material conforme recebido (CR) foram submetidas aos

seguintes ensaios: de impacto Charpy, de abrasão, análise química, microscopia óptica para verificar a microestrutura, ensaio de dureza, microdureza, análise no MEV/EDS/SE para verificar a composição química e a topografia e ao teste de rugosidade

5.2.1 Resultado da microscopia óptica

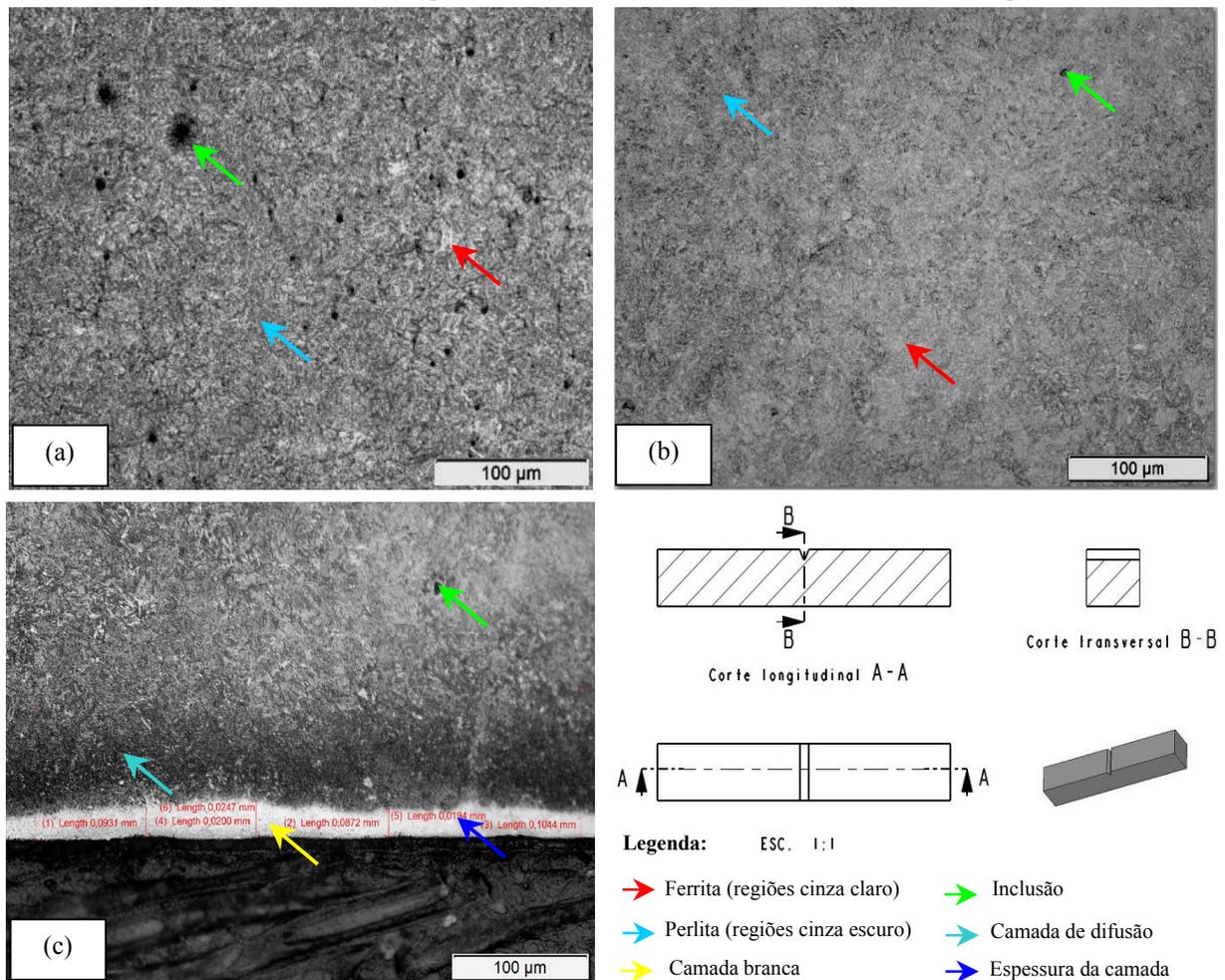
O resultado da microscopia óptica está representado na Figura 5.1 com corte longitudinal (A-A) e na Figura 5.2 com corte transversal (B-B), onde se pode observar ferrita (regiões cinza claro), perlita (regiões cinza escuro) e inclusões, e também pode-se observar na Figura 5.2 (c) a camada branca, a camada de difusão.

Figura 5.1 - Microestrutura do aço AISI P20: (a) conforme recebido (CR) temperado e revenido; (b) temperado e revenido (T); (c) carbonitretado temperado e revenido (C + N), com corte longitudinal. Ataque Nital2% 5s.



Fonte: Próprio autor

Figura 5.2 - Microestrutura do aço AISI P20: (a) conforme recebido (CR) temperado e revenido; (b) temperado e revenido (T); (c) carbonitretado temperado e revenido (C + N), com corte transversal. Ataque Nital 2% 5s.



Fonte: Próprio autor

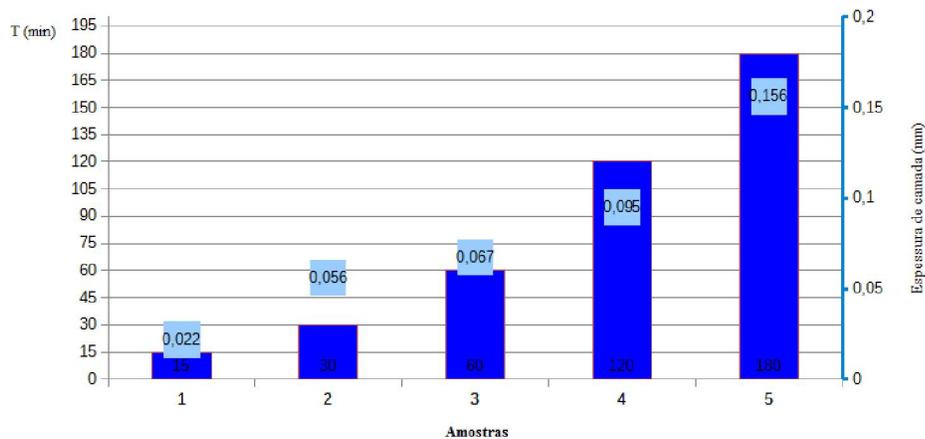
A análise da Figura 5.1 permite observar através das setas colocadas na microestrutura ferrita (regiões cinza claro), perlita (regiões cinza escuro), inclusões e a Figura 5.2 (a) e (b) apresenta o os mesmo e a Figura 5.2 (c) pode-se observar também que a mesma possui uma camada branca monofásica de martensita revenida com concentração de austenita retida diminuindo gradualmente na direção do material base (substrato), microporosidades dispersas e algumas inclusões de óxidos.

A variação na espessura da camada da Figura 5.2 (c) é resultante da circulação da atmosfera e distribuição de carga no forno, pois a não renovação da atmosfera junto a um determinado ponto na superfície da peça implica em fornecimento deficiente de C e N na região. Uma das dificuldades de controlar o processo de carbonitreção se deve ao fato que a difusão de

nitrogênio depende do teor de amônia livre e não do teor de amônia inserido no forno, pois não é possível monitorar o teor de amônia livre porque o forno de atmosfera controlada utilizado não dispõe um sensor instalado para fazer esse controle, já os equipamentos modernos possuem esse recurso. Pode-se concluir que os parâmetros utilizados durante o processo são fundamentais para obter uma camada mais homogênea e atingir a espessura desejada.

Na Figura 5.3 encontram-se o resultado exibido de forma gráfica dos valores encontrados da espessura de camada em função do tempo de exposição no forno de atmosfera controlada do grupo de 5 amostras carbonitretadas.

Figura 5.3 - Espessura da camada carbonitretada no aço AISI P20, em relação ao tempo de exposição no forno de atmosfera controlada de 15 min, 30 min, 60 min, 120 min e 180 min.



Fonte: Próprio autor.

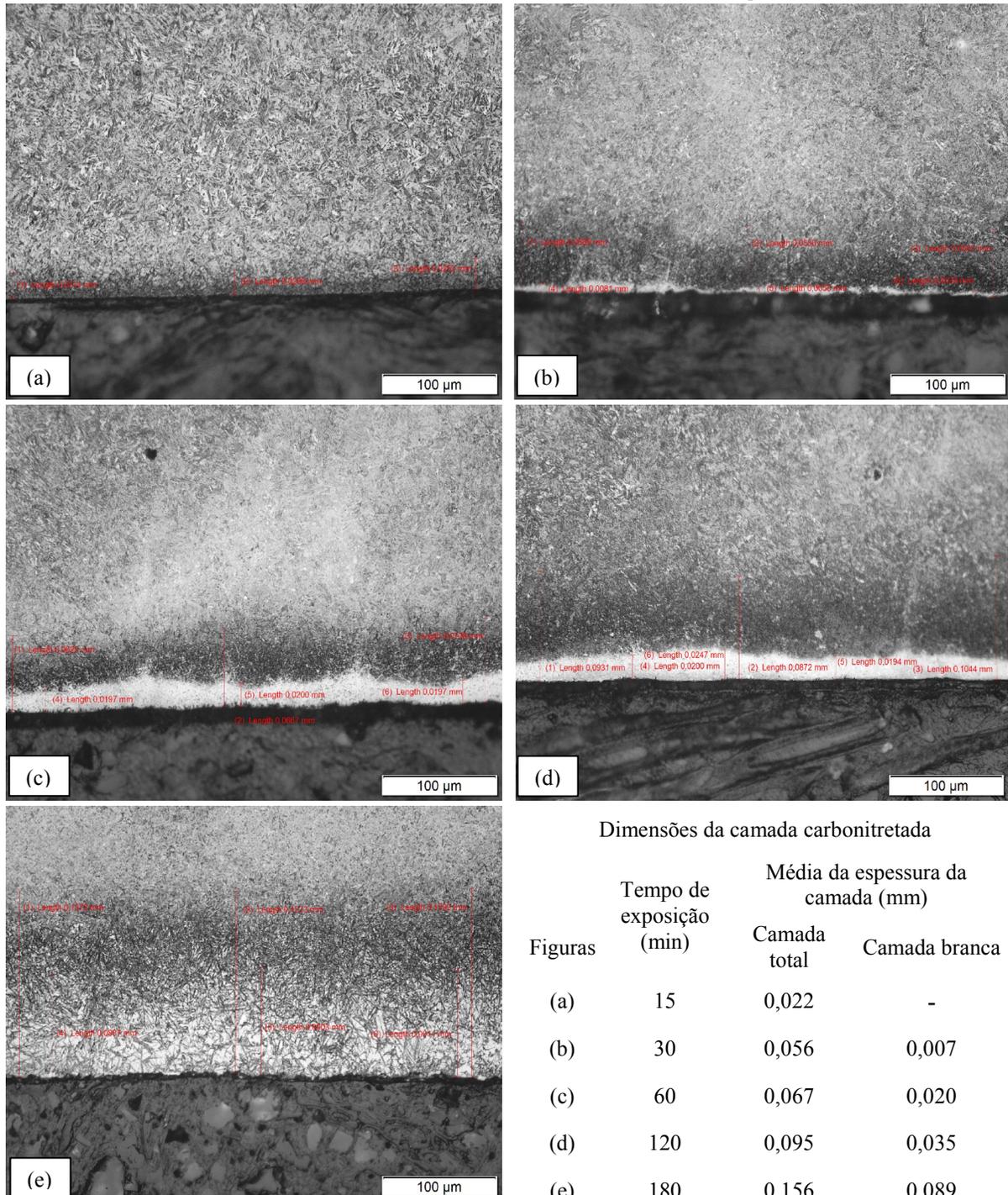
Pode-se observar na Figura 5.3 que na medida que vai aumentando o tempo de exposição a espessura da camada também aumenta mas não na mesma proporção.

A Figura 5.4 traz as dimensões da camada total e da camada branca, de acordo com os tempos de exposição de 15 min, 30 min, 60 min, 120 min e 180 min do material no forno de atmosfera controlada e pode-se observar que ocorreu um aumento na camada total e conseqüentemente um aumento da camada branca.

A Figura 5.4 (a) o qual o tempo de exposição foi de 15 minutos mostra apenas que houve o início de difusão na superfície, posteriormente na Figura 5.4 (b) pode-se observar um pequeno aumento na camada de difusão e o aparecimento da camada branca e na medida em que foi

aumentando o tempo de exposição no forms as demais Figuras 5.4 (c), (d) e (e) houve um progressivo aumento da espessura das camadas.

Figura 5.4 - Micrografia do aço AISI P20 carbonitretado, tempo de exposição no forno de atmosfera controlada de 15 min, 30 min, 60 min, 120 min e 180 min, corte transversal. Ataque Nital 2% 5s.



Fonte: Próprio autor.

A camada carbonitretada é composta por nitretos, carbetos e carbonitretos e dependem dos parâmetros de processamento (temperatura, material e composição da atmosfera do tratamento). A região da camada branca é resistente ao desgaste e a sua baixa rugosidade facilita a remoção das peças injetadas.

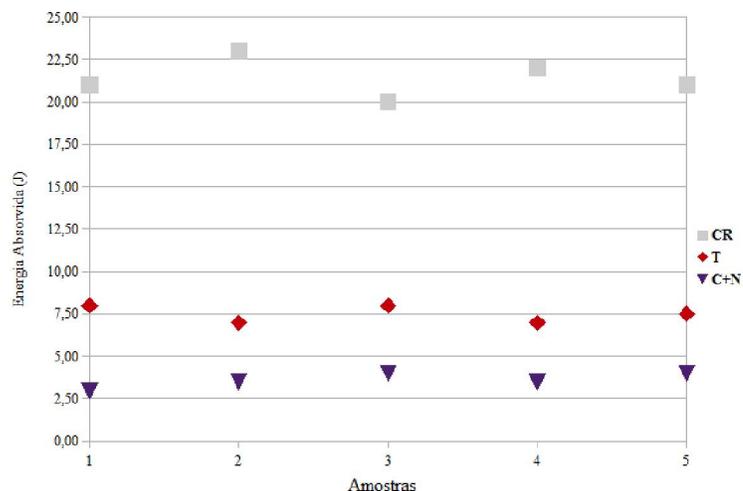
A espessura da camada escolhida após o experimento é que está representada pela letra (d) cujo o tempo de exposição foi de 120 minutos (camada total de 0,095 mm e camada branca de 0,035).

5.2.2 Resultado do ensaio de impacto Charpy

Foram testadas 15 amostras de aço AISI P20 divididas em três grupos contendo 5 amostras de cada: material conforme recebido (CR) temperado e revenido (28-32) HRC, material temperado e revenido (T) (40-45) HRC e material carbonitretado (C + N) temperado e revenido (54-58) HRC, com o tempo de exposição de 60 minutos.

Na Figura 5.5 encontram-se o resultado exibido de forma gráfica dos valores encontrados após o ensaio de impacto Charpy.

Figura 5.5 - Energia de impacto Charpy do aço AISI P20: conforme recebido (CR); temperado e revenido (T); carbonitretado, temperado de revenido (C + N).

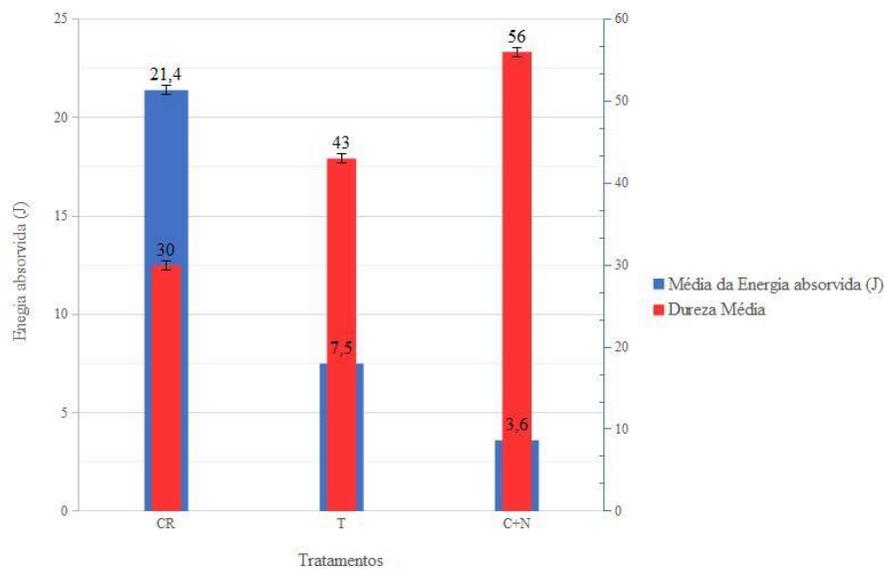


Fonte: Próprio autor

Pode-se observar que o grupo das amostras (CR) absorveu mais energia de impacto do que os grupos das amostras (T) e (C + N).

Na Figura 5.6 encontram-se os valores médios, associados a uma barra de erros que contempla os valores da energia absorvida e a dureza média em cada grupo de amostra. O eixo principal "y" apresenta a média da energia absorvida e o desvio padrão após o ensaio de impacto Charpy e o eixo secundário "y" apresenta os valores médios das durezas encontradas nas três condições (CR), (T) e (C + N).

Figura 5.6 - Média da energia absorvida e desvio padrão após o ensaio de impacto Charpy e a dureza média no aço AISI P20: conforme recebido temperado e revenido (CR); temperado e revenido (T); carbonitretado, temperado e revenido (C + N).



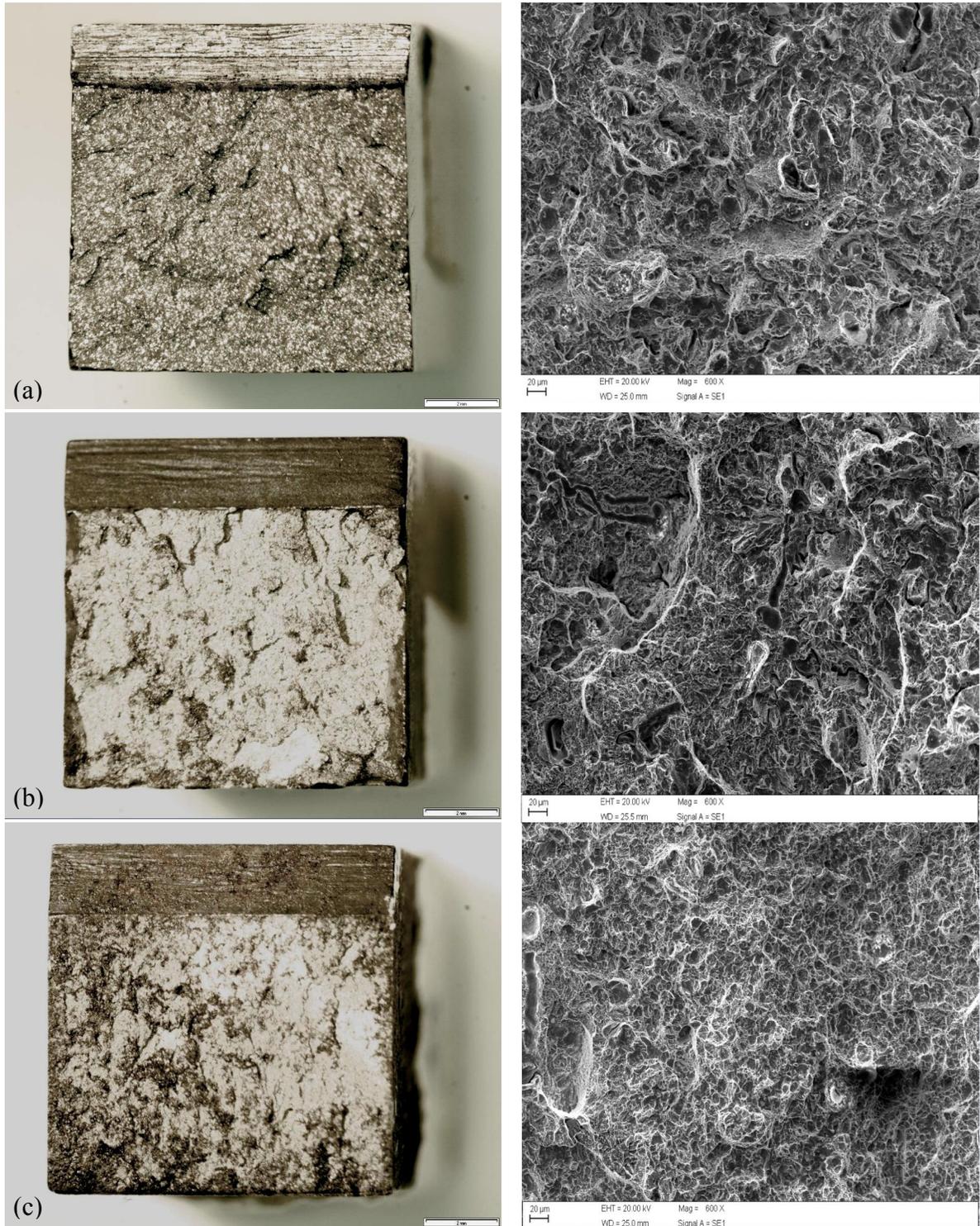
Fonte: Próprio autor

Grupo (CR) apresenta um valor médio de resistência ao impacto superior em relação aos demais grupos, por outro lado a dureza do grupo (C + N) é significativamente maior comparando com os outros grupos.

Os três grupos das amostras romperam de forma frágil de acordo com a baixa energia de impacto absorvida quando comparado com o valor de transição frágil/dúctil de aproximadamente 20 J (critério estabelecido para ensaio realizado a temperatura de 20° C).

A maior ductilidade do material (CR) fica evidente ao se comparar seu aspecto de fratura (Figura 5.7 (a)) com o do material carbonitretado (C + N) (Figura 5.7 (c)) observando as expansões laterais dos mesmos representados na Tabela 5.2. Os aspectos das fraturas dos corpos de prova do Grupo (CR) e Grupo (T) são similares entre si e apresentam uma pequena expansão lateral.

Figura 5.7 - Aspecto de fratura por impacto no aço AISI P20: (a) conforme recebido (CR) temperado e revenido; (b) temperado e revenido (T); (c) carbonitretado temperado e revenido (C + N). Microfotografia expansão lateral; análise em MEV por modo SE, sem ataque.



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 5.2 mostra a expansão lateral nas três condições tomando como base o lado oposto ao entalhe "V" da seção transversal e a energia absorvida. A expansão lateral está maior no material (CR) porque absorveu maior energia de impacto e conseqüentemente deformam com maior facilidade, os materiais (T) e os materiais (C + N) apresentaram menor deformação por ter menor ductilidade.

Tabela 5.2 - Resultado do ensaio de impacto Charpy no aço AISI P20: conforme recebido (CR) temperado e revenido; temperado e revenido (T); carbonitretado temperado e revenido (C + N).

Condição	Dimensão (mm)		Energia absorvida		Expansão lateral	
	Corpo de prova		Medida (J)	Média (J)	Obtida (mm)	Média (mm)
CR	1	10,04	21,0	21,4	0,16	0,14
	2	10,04	23,0		0,13	
	3	10,04	20,0		0,12	
	4	10,04	22,0		0,12	
	5	10,04	21,0		0,18	
T	1	10,02	8,0	7,5	0,04	0,05
	2	10,02	7,0		0,05	
	3	10,02	8,0		0,04	
	4	10,02	7,0		0,04	
	5	10,02	7,5		0,07	
C + N	1	10,03	3,0	3,6	0,02	0,03
	2	10,03	3,5		0,03	
	3	10,03	4,0		0,04	
	4	10,03	3,0		0,03	
	5	10,03	3,5		0,04	

Fonte: Próprio autor.

As dimensões dos CP's foram realizadas com micrômetro digital, marca Mitutoyo, série 293, resolução de 0,001mm, erro de $\pm 0,5 \mu\text{m}$ e os valores da expansão lateral foram obtidos com relógio apalpador digital, marca Mitutoyo com ponta de rubi, série 513, resolução de 0,01 mm, erro de $\pm 0,8 \mu\text{m}$.

5.2.3 Resultado do ensaio de abrasão

A Tabela 5.3 mostra os resultados obtidos na realização do ensaio de abrasão no aço AISI P20 nas três condições: conforme recebido (CR), nos temperado (T) e carbonitretados (C + N) conforme a norma ASTM G195-13a (2013). A Tabela 11 mostra o resultado da média e o desvio padrão das amostras em relação da perda de massa. Nota-se que no material conforme recebido (CR) ocorreu maior desgaste quando comparado com os demais.

Tabela 5.3 - Resultado do ensaio da abrasão no aço AISI P20: conforme recebido (CR) temperado e revenido; temperado e revenido (T); carbonitretado temperado e revenido (C + N).

Corpo de Prova	Superfície (Face)	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Volume (mm ³)	
CR	1	A	236,817	236,748	0,067	8,481
		B	236,748	236,683	0,065	8,228
	2	A	238,155	238,090	0,065	8,228
		B	238,090	238,028	0,062	7,848
T	1	A	239,847	239,797	0,050	6,329
		B	239,797	239,746	0,051	6,455
	2	A	242,125	242,072	0,053	6,708
		B	242,072	242,020	0,052	6,582
C + N	1	A	248,775	248,748	0,027	3,417
		B	248,748	248,719	0,029	3,670
	2	A	249,441	249,411	0,030	3,797
		B	249,411	249,380	0,031	3,924

Fonte: Próprio autor.

As perdas de volume foram obtidas pelo cálculo da perda de massa (g) dividida pela densidade (g/cm³) multiplicada por 1000. Pode-se observar que a condição (C + N) foi menor comparando com as demais condições, devido sua dureza superficial.

Na tabela 5.4 o coeficiente de variação mostra a extensão da variabilidade em relação à média da população e define a razão do desvio padrão pela média da perda de massa ocorrida nos CP's.

Tabela 5.4 - Resultado do ensaio de abrasão no aço AISI P20 mostrando o coeficiente de variação (v), a média e o desvio padrão: conforme recebido (CR), temperado e revenido; temperado e revenido (T); carbonitretado to e revenido (C + N).

Corpo de Prova		Média da perda de massa (g)	Desvio Padrão (σ)	Coeficiente de Variação (v)
CR	1	0,066	0,001	1,515
	2	0,064	0,001	1,562
T	1	0,050	0,001	2,000
	2	0,052	0,001	1,923
C + N	1	0,028	0,001	3,571
	2	0,030	0,001	3,333

Fonte: Próprio autor.

Pode-se observar que a média da perda de massa na condição conforme recebido (CR) é um pouco mais do dobro quando comparada com a condição carbonitretada (C + N) e consequentemente o coeficiente de variação medido na (CR) é praticamente a metade do (C + N). O desvio padrão em todas as condições manteve-se o mesmo quando comparado com a média da perda de massa dos CP's 1 e 2 de cada condição.

5.2.4 Resultado dos ensaios de dureza e microdureza

5.2.4.1 Ensaio de dureza Rockwell

A Tabela 5.5 mostra os resultados de dureza Rockwell realizado nas três condições: conforme recebido (CR), nos temperados (T) e nos carbonitretados (C + N) conforme a norma (NBR NM ISO 6508:2008). Foram verificadas as durezas na Região da pista, na Superfície e os valores médios das durezas encontrados nas amostras 1 e 2.

Pode-se observar que a média das respectivas durezas encontradas na condição (C + N), tanto na região da pista quanto na superfície dos CP's mantém mais estável quando comparada com as outras condições (CR) e (T). Na condição (C + N) os CP's 1 e 2 o valor do desvio padrão apresentou pouca variação na região da pista e na superfície. Pode-se concluir que a dureza encontrada nos CP's (C + N) na região da pista manteve-se de acordo com a faixa (54 - 58)HRC

definida para este experimento, portanto a camada carbonitretada de 0,1 mm não foi removida completamente no ensaio de desgaste.

Tabela 5.5 - Medidas de dureza Rockwell "C" no aço AISI P20: conforme recebido (CR) temperado e revenido; temperado e revenido (T); carbonitretado temperado e revenido (C + N).

Corpo de Prova		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média (HRC) $\pm\sigma$	
CR	1	Região da pista	31,5	31,0	32,0	31,0	32,0	31,5 \pm 0,4
		Superfície	31,5	32,0	31,5	33,0	32,0	32,0 \pm 0,6
	2	Região da pista	29,5	32,0	30,0	31,5	32,0	31,0 \pm 1,0
		Superfície	31,0	30,5	32,0	32,0	31,5	31,5 \pm 0,6
T	1	Região da pista	43,0	45,0	42,0	44,0	45,0	43,5 \pm 1,2
		Superfície	44,0	45,0	45,0	44,5	45,5	44,5 \pm 0,6
	2	Região da pista	44,0	43,0	44,0	43,0	42,5	43,3 \pm 0,8
		Superfície	45,0	42,5	44,0	44,5	42,0	43,5 \pm 1,1
C + N	1	Região da pista	53,0	54,0	54,0	55,0	54,0	54,0 \pm 0,6
		Superfície	55,0	56,0	56,0	55,0	56,0	55,6 \pm 0,5
	2	Região da pista	54,0	54,0	53,0	54,0	55,0	54,0 \pm 0,6
		Superfície	55,0	55,0	55,0	56,0	56,0	55,4 \pm 0,5

Fonte: Próprio autor.

5.2.4.2 Ensaio de microdureza Vickers

A Tabela 5.6 mostra os resultados de microdureza Vickers realizado nas três condições: conforme recebido (CR), nos temperados (T) e nos carbonitretados (C + N) conforme a norma (NBR NM ISO 6507:2008). Foram verificadas as durezas na Região da pista, na Superfície e os valores médios das durezas encontrados nas amostras 1 e 2.

Pode-se observar que a média das respectivas microdureza encontradas nas três condições, comparando a Região da pista e a Superfície dos CP's estão de acordo com a baixa variação no desvio padrão encontrado. A análise é a mesma que o mencionado no ensaio de dureza Rockwell, porém só foi utilizado outro método para determinar a dureza.

Tabela 5.6 - Medidas de microdureza Vickers (HV) no aço AISI P20: conforme recebido (CR) temperado e revenido; temperado e revenido (T); carbonitretado, temperado e revenido (C + N).

Corpo de Prova		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média (HV) $\pm\sigma$	
CR	1	Região da pista	314,0	310,0	318,0	310,0	318,0	314,0 \pm 3,6
		Superfície	314,0	318,0	314,0	327,0	318,0	318,2 \pm 4,8
	2	Região da pista	298,0	318,0	302,0	314,0	318,0	310,0 \pm 8,4
		Superfície	310,0	306,0	318,0	318,0	314,0	313,2 \pm 4,7
T	1	Região da pista	423,0	446,0	412,0	434,0	446,0	432,2 \pm 13,2
		Superfície	434,0	446,0	446,0	440,0	452,0	443,6 \pm 5,9
	2	Região da pista	434,0	423,0	434,0	423,0	418,0	426,4 \pm 6,5
		Superfície	446,0	418,0	434,0	440,0	412,0	430,0 \pm 12,9
C + N	1	Região da pista	560,0	577,0	577,0	595,0	577,0	577,2 \pm 11,1
		Superfície	595,0	613,0	613,0	595,0	613,0	605,8 \pm 8,8
	2	Região da pista	577,0	577,0	560,0	577,0	595,0	577,2 \pm 10,1
		Superfície	577,0	577,0	595,0	577,0	613,0	587,5 \pm 14,4

Fonte: Próprio autor.

5.2.5 Resultado do microscópio eletrônico de varredura (MEV)

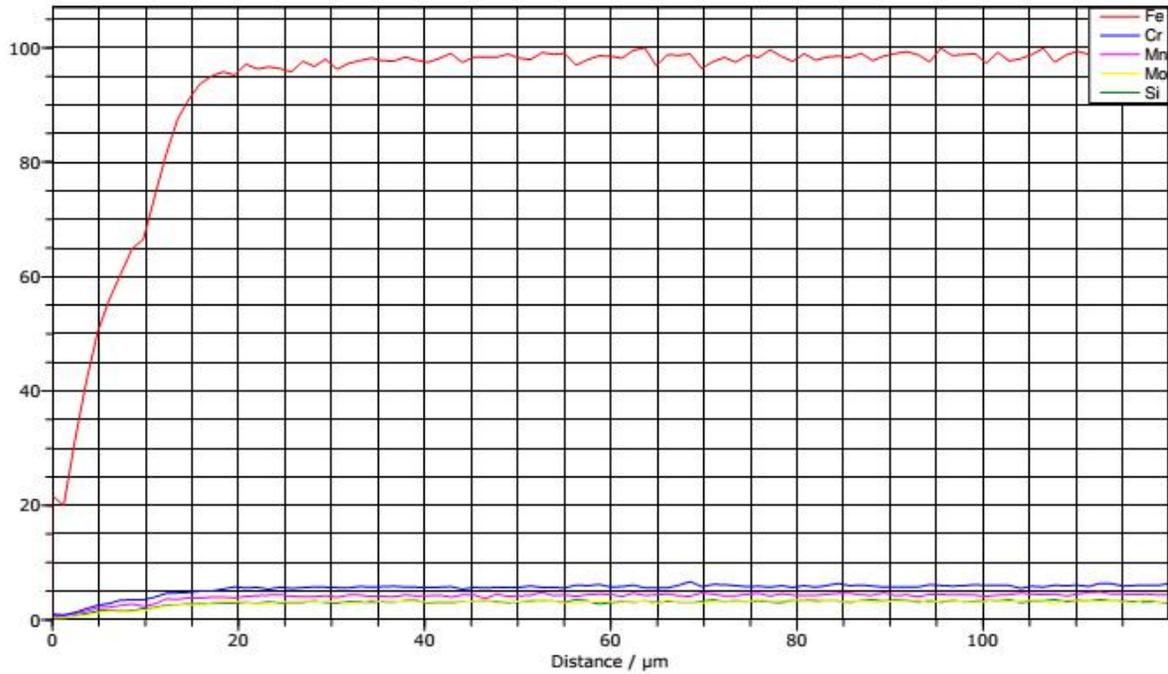
Os resultados obtidos por microscopia eletrônica de varredura EDS tipo *line scan* do aço AISI P20 Figura 5.8 nas três condições: conforme recebido (CR), nos temperados (T) e nos carbonitretados (C + N), corte transversal, sem ataque. Nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 pode-se observar a análise composicional e o perfil de distribuição dos elementos encontrados: ferro, cromo, manganês, molibdênio, silício nas condições (CR) e (T) e na condição (C + N) foram identificados além dos elementos citados anteriormente: carbono e nitrogênio.

Figura 5.8 - Análise de EDS (*line scan*) aço AISI P20 na condição: carbonitretado (C + N), espessura de camada de 0,1 mm, tempo de exposição de 120 minutos. Corte transversal, sem ataque.



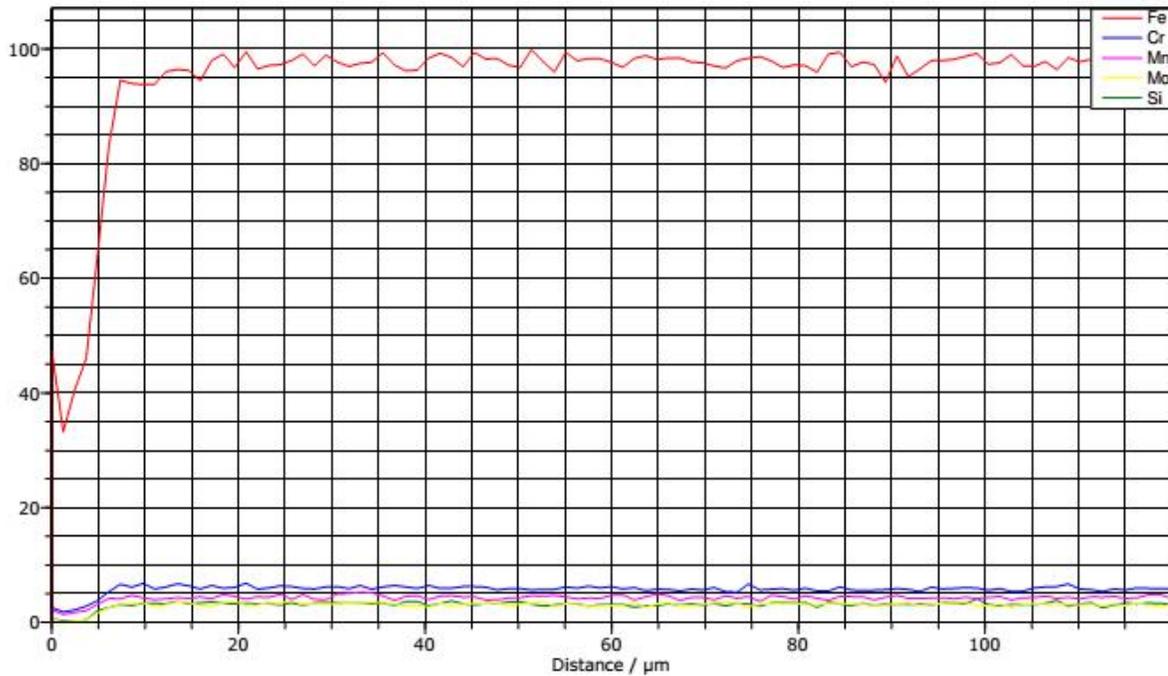
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.9 - Análise de EDS (*line scan*) aço AISI P20 na condição: conforme recebido (CR), mostrando o perfil de distribuição dos elementos: Fe, Cr, Mn, Mo e Si. Corte transversal, sem ataque.



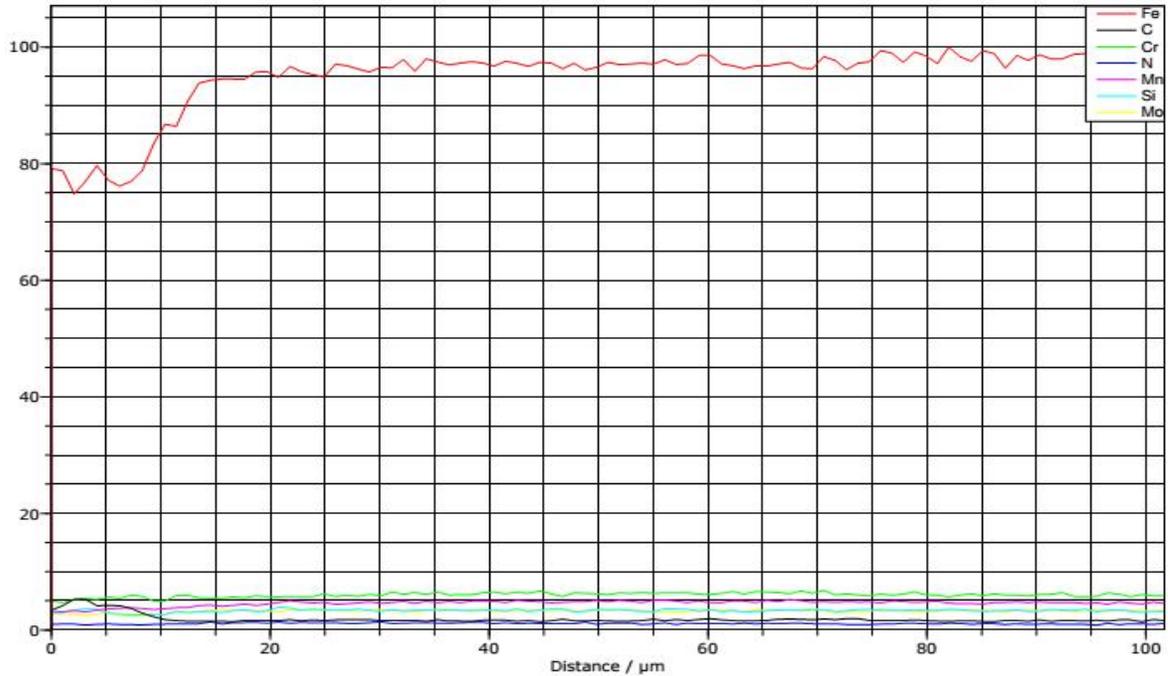
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.10 - Análise de EDS (*line scan*) aço AISI P20 na condição: temperado e revenido (T), mostrando o perfil de distribuição dos elementos: Fe, Cr, Mn, Mo e Si. Corte transversal, sem ataque.



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.11 - Análise de EDS (*line scan*) aço AISI P20 na condição: carbonitretado (C + N), espessura de camada 0,1 mm, tempo de exposição de 120 minutos, mostrando o perfil de distribuição dos elementos: Fe, C, Cr, N, Mn, Si e Mo. Corte transversal, sem ataque.



Fonte: Próprio autor.

A análise composicional da Figura 5.11 realizada por EDS tipo *line scan* apresenta o ponto de partida do Fe em relação a camada carbonitretada com 0,1 mm de espessura e os demais elementos encontrados na mesma. O objetivo foi verificar o aumento da porcentagem de carbono "C" e comparar com seu estado inicial na Figura 5.9, que possuía aproximadamente 95% Fe na distância de 20 μm na condição (CR) e na Figura 5.10 era de aproximadamente 97% Fe na distância de 20 μm na condição (T).

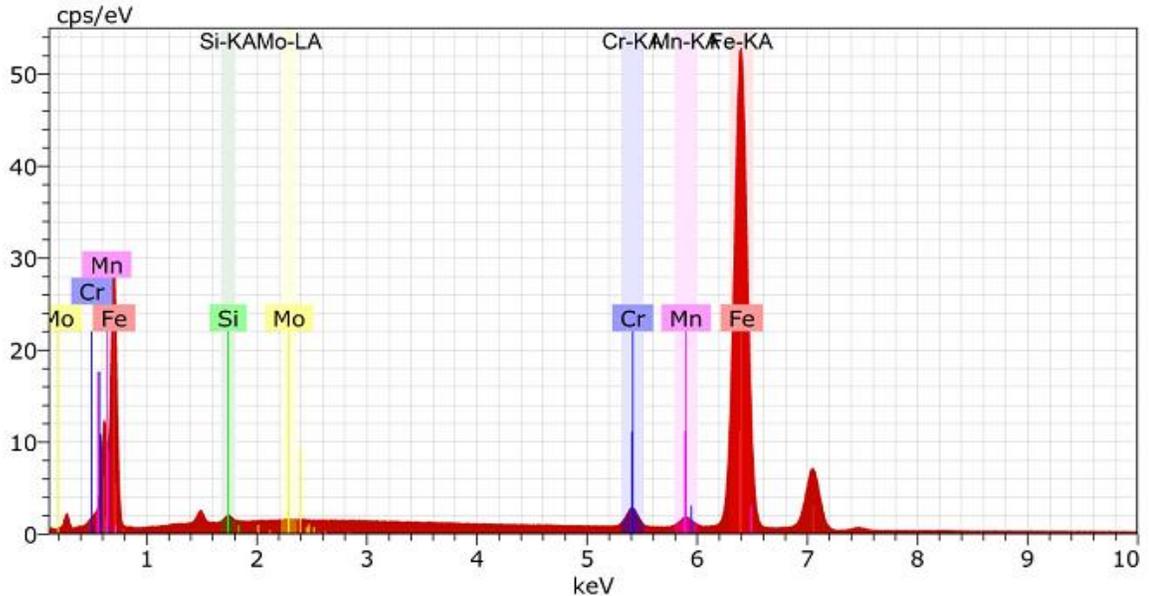
As Figuras 5.12 e 5.13 apresentam o EDS tipo *Point* indicando um ponto no centro das amostras nas condições (CR), (T) e (C + N) para verificar a composição química (elementos).

Figura 5.12 - Análise de EDS (*Point*) aço AISI P20 nas condições: conforme recebido (CR); temperado e revenido (T); carbonitretado (C + N), indicando o ponto no centro. Composição química. Corte transversal, sem



Fonte: Próprio autor.

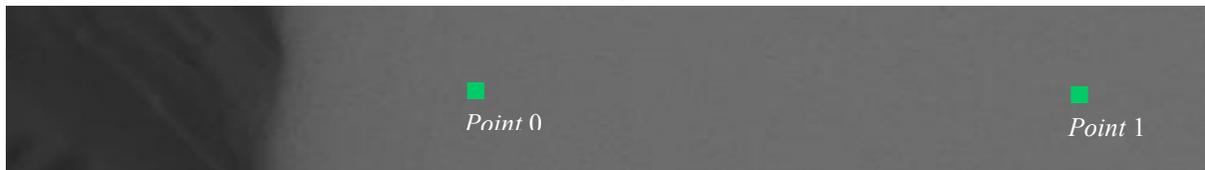
Figura 5.13 - Análise de EDS (*Point*) aço AISI P20 nas condições: conforme recebido (CR), temperado e revenido (T); carbonitretado (C + N) fora da camada, indicando o ponto no centro das amostras. Composição química. Corte transversal, sem ataque.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 5.14 apresenta o EDS tipo *Point* indicando o ponto 0 (zero) e o ponto 1 medido na camada carbonitretada para verificar a composição química em % peso.

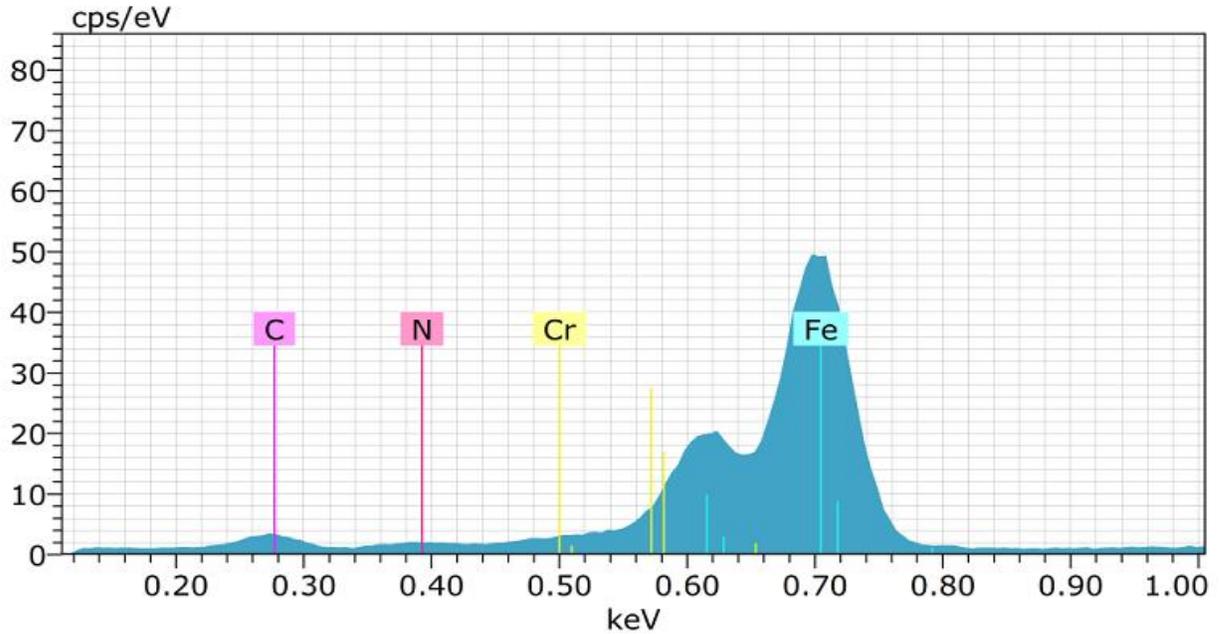
Figura 5.14 - Análise de EDS (*Point*) aço AISI P20 na condição: carbonitretado (C + N), indicando o ponto 0 e o ponto 1, composição química em % peso. Corte transversal, sem ataque.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 5.15 apresenta a distribuição dos elementos no ponto 0 (zero) medido na camada. O tempo de exposição no forno de atmosfera controlada para essa condição foi de 120 minutos e foram encontrados os seguintes elementos: carbono, nitrogênio, cromo e ferro.

Figura 5.15- Análise em MEV - EDS (*point*) do aço AISI P20: carbonitretado (C + N) mostrando o ponto 0 (zero) na camada. Tempo de exposição 120 min. Corte transversal, sem ataque.

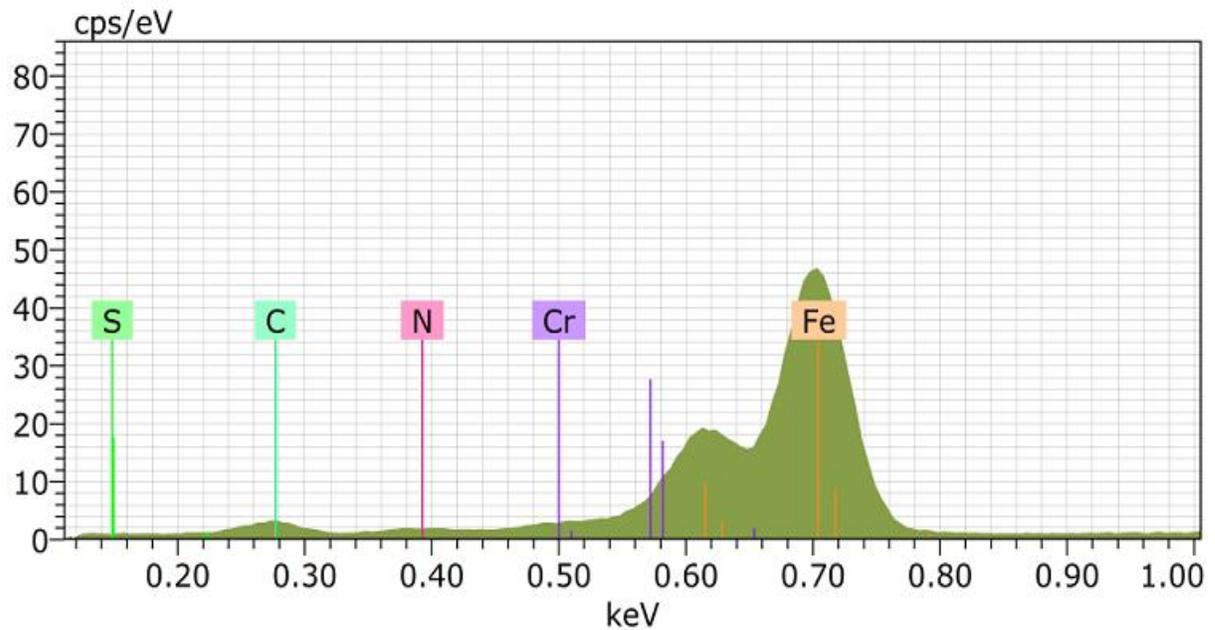


El AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Fe	26 K-series	85.16	91.66	74.35	2.28
C	6 K-series	4.42	4.76	17.94	0.71
N	7 K-series	1.81	1.94	6.28	0.35
Cr	24 K-series	1.52	1.64	1.43	0.07
Total:		92.91	100.00		100.00

Fonte: Próprio autor.

A Figura 5.16 apresenta a distribuição dos elementos no ponto 1 (μm) medido na camada. O tempo de exposição no forno de atmosfera controlada para essa condição foi de 120 minutos e foi encontrados os seguintes elementos: ferro, carbono, cromo, nitrogênio, silício, alumínio e enxofre objetivo via análise qualitativa de EDS do tipo *line-scan*. Nota-se que a distribuição do Fe ao longo da microestrutura Figura 5.15 está igual a distribuição do Fe na Figura 5.16 e se compararmos a composição química das mesmas pode-se observar que a porcentagem de peso dos elementos Fe, C e o N estão bem próximas.

Figura 5.16 - Análise em MEV - EDS (*point*) do aço AISI P20: carbonitretado (C + N) mostrando o ponto 1(um) na camada. Tempo de exposição de 120 min. Corte transversal, sem ataque.



El AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Fe	26 K-series	85.38	91.40	74.95	2.29
C	6 K- series	4.12	4.41	16.83	0.67
Cr	24 K-series	1.95	2.08	1.84	0.08
N	7 K-serie	1.69	1.81	5.90	0.33
Si	14 K-series	0.21	0.23	0.37	0.04
Al	13 K-series	0.04	0.04	0.07	0.03
S	16 K-series	0.03	0.03	0.04	0.03
Total:		93.42	100.00		100.00

Fonte: Próprio autor.

5.2.6 Resultado do teste de rugosidade

Os resultados obtidos no teste de rugosidade dos corpos de prova (CP) 1 e 2 utilizados no ensaio de abrasão nas condições: conforme recebido (CR), temperado (T) e no carbonitretado (C + N) estão dispostos nas Tabelas 5.7.

Tabela 5.7 - Média e desvio padrão de rugosidade do corpo de prova do aço AISI P20: conforme recebido (CR) temperado e revenido; temperado e revenido (T); carbonitretado temperado e revenido (C + N).

Rugosidade (μm)					
Corpo de prova			Média (R_a)	Média	Desvio padrão
CR	1	Face A	0,410	0,422	$\pm 0,008$
		Face B	0,430		
	2	Face A	0,420		
		Face B	0,430		
T	1	Face A	0,410	0,425	$\pm 0,009$
		Face B	0,430		
	2	Face A	0,420		
		Face B	0,430		
C + N	1	Face A	0,405	0,392	$\pm 0,009$
		Face B	0,390		
	2	Face A	0,380		
		Face B	0,395		

Fonte: Próprio autor.

Nota-se que os valores da rugosidade média (R_a) encontrada nas amostras (CR) e (T) não apresentou uma diferença significativa entre as mesmas. Quanto a amostra (C + N) a rugosidade média de 0,392 R_a teve uma redução significativa em relação as demais, pode-se definir que com o aumento da dureza a uma melhora no acabamento das superfícies. Na região da pista a rugosidade manteve próximo de 0,420 R_a devido ao fato do ensaio de abrasão ter sido executado com rebolo abrasivo e com refrigeração, porém não foi considerado neste trabalho porque após o tratamento térmico dos insertos, os mesmos passam somente por um processo de polimento com pasta diamantada para melhorar o acabamento superficial.

6 CONCLUSÃO

A comparação experimental dos efeitos do tratamento térmico de têmpera em banho de sal fundido e o tratamento termoquímico de carbonitreção gasosa no aço AISI P20, permitiu que:

- ✓ Quanto à dureza: a camada carbonitretada proporcionou um aumento de aproximadamente 30,23% na dureza dos insertos/postiços;
- ✓ Quanto à resistência ao desgaste: a camada carbonitretada proporcionou uma redução na perda de massa de 56%;
- ✓ Quanto ao acabamento: melhorou a superfície dos insertos e facilitou a extração das peças injetadas.

Após os experimentos em laboratório, o tratamento termoquímico de carbonitreção passou a ser aplicado no chão de fábrica, com um aumento de cerca de 30% na vida útil dos insertos/postiços, diminuindo os danos, as perdas no processo de fabricação.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseando-se nesta dissertação, uma proposta para trabalho futuro seria:

- ✓ Verificar qual a espessura de camada que melhor atende ao processo de injeção plástica;
- ✓ Utilizar o ensaio de microdureza Vickers para identificar a espessura de camada (ASM *Metals Handbook*, vol.4, *Heat Treating*. 10 ed., 1991);
- ✓ Verificar o comportamento da camada carbonitretada sob condições diferentes como em ensaio de pino-sobre-disco.

8 REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. "Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões", Edgard Blucher, São Paulo, 295 p., 1990.
- AGUDELO, P.; JUAN, I.; SINATORA, A. **Analysiss of the microstructure transformation (wel formation) in pearlitic steel used in relevant engineering wear systems**. 2018. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3151/tde-04092018-131559/>. php >. Acesso em: 18 de Dez. 2018.
- ALMEIDA, E. A. S. **Nitretação sólida, plasma e gasosa em aços ferramenta: análise microestrutural e experimental e comportamento ao desgaste**. 2009.101p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville. 2009.
- ALMEIDA FILHO, A. **Influência da Preparação prévia de amostras de aço AISIS H13 no comportamento à nitretação**. 1999. 9p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- ANDRADE, T. F. **Propriedades Tribológicas do Peek em ambiente lubrificado com óleo**. 2017. 26 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- ANTÔNIO, T. **Recobrimento com filme de carbono sobre rolos cilíndricos de rolamentos**. 2016. 28p. Dissertação (Mestrado em Processamento de Materiais e Catálise) - Universidade do Vale do Paraíba, São Paulo, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4287: "Especificações Geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, Definições e parâmetros da Rugosidade"**, 18p., 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12042:2012. "Materiais inorgânicos - determinação do desgaste por abrasão**, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 6507: "Materiais metálicos - Ensaio de dureza Vickers"**. Parte 1: método de ensaio - escalas (A, B, C, D, E, F, G, H, K). 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 6508: "Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell"**. Parte 1: método de ensaio - escalas (A, B, C, D, E, F, G, H, K). 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 136: Tratamento Térmico de Aço - Terminologia e definições**. 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15454: Metalografia das ligas de ferro-carbono - Terminologia**. 2007.
- ASM HANDBOOK – **Heat treating**. 10 ed. Ohio: ASM International. (1998).
- ASTM. E 23-01. **American Standard for Testing Materials. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials**. EUA: ASTM, 2001a.

ASTM. A 681. **American Standard for Testing Materials. Standard Specification for Tool Steels Alloy.** ASTM international, 2008.

ASTM. E92.-16. **American Standard for Testing Materials. Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic.** Ed. [s.l.] ASTM international, v. 82, 2016.

ASTM G40-01. **American Standard for Testing Materials. Standard Terminology Relating to Wear and Erosion.** Annual Book of Standards Volume 03.02: Wear and Erosion; Metal Corrosion. Philadelphia, USA, 2001.

ASTM G40-96. **Standard Terminology Relating to Wear and Erosion.** 2017. Disponível em: < <https://www.document-center.com/standards/show/ASTM-G40/history/2017%20EDITION>>. Acesso em: 21 de Mar. 2019.

ASTM G195-13a. **American Standard for Testing Materials. Standard Guide for Conducting Wear Tests Using a Rotary Platform Abraser.** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

BACALHAU, J. B.; BARBOSA, C. A.; OTUBO, J. **Avaliação da temperabilidade de aços com baixos teores de carbono.** In: 67º CONGRESSO ANUAL ABM INTERNACIONAL, ISSN 1516 - 392X, 2012.

BACALHAU, J. B.; OTUBO, J. **Aço para moldes plásticos de alto desempenho: Inovando para o aumento da competitividade da cadeia produtiva.** In: 70º CONGRESSO ANUAL ABM INTERNACIONAL, 15º ENEMET - Agosto, 2015.

BARETA, D. R.; COSTA, C. A.; ZATTERA, A. J.; POUZASA, A. S. **A influência de diferentes materiais aplicados em cavidades de ferramental rápido: efeito nas propriedades mecânicas de peças tubulares injetadas.** In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 8., 2007, Cusco. Anais do Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica. Cusco, 2007b.

BREGANON, R. **Comportamento Tribológico do aço Inoxidável martensíticos CA-6NM nitretado por plasma em ensaio de riscamento linear.** 2015, 38p. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

BOYER, H. E. **Case Hardening of steel.** ASM International - Committee on Case Hardness, p.1-70, 151-283, 1987.

BUDERUS - **Tool Steels for the Plastic Industry.** 2010. Disponível em: <<http://pdf.directindustry.com/pdf/buderus-edelstahl/tool-steels-plastics-industry/40859-31961.html>>. Acesso em: 25 de jan. 2019.

COSTA, E. M. **Classificação de Aços.** Departamento de Engenharia Mecânica. Pontifca Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2008. Pág.127.

COSTA E SILVA, A. L. V., P. R. **Aços e ligas especiais.** 3 ed., São Paulo: Blucher, 2010.

CHIAVERINI, V. **Tratamentos térmicos das ligas metálicas.** 1ª ed., Editora Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo-SP, 2003.

- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos.** 7 ed. ampl. rev. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.
- CORAZZA, E. J. **Influência do tratamento de Nitretação em cavidades de aço P20 de moldes de injeção de termoplásticos.** 2012. 17p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade da Região de Joinville - UNIVILLE, Santa Catarina, 2012.
- CZICHOS, H. Presentation of Friction and Wear Data. In: ASM International Handbook Committee. ASM Handbook, USA, 1992, v. 18: **Friction, lubrication and wear technology**, p. 489-492. Dissertação de Mestrado - Júlio César Sczancoski 125.
- DAMIN, K. V. S. **Tratamentos Termoquímicos sequenciais por plasma do aço AISI 1005.** Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- DELAVALD, A. A. **Investigação da rugosidade da superfície torneada do aço SAE 4140 utilizando ferramentas com geometrias WIPER e PRIME através do projeto de experimentos Box-Behnken.** 2017. 2p. Monografia (Engenheiro Mecânico) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PortoAlegre. 2017.
- DEVERAS, A. M. **Estudo da rugosidade superficial no torneamento do aço AISI 8640 com ferramentas alisadoras e convencional.** 2016. 28 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2016.
- DIN 10269. **Steels and nickel alloys for fasteners with specified elevated and/or low temperature properties.** DIN 10269 ed. [s.l.] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2014.
- DUARTE, M. C. S. **Transições no regime de desgaste por deslizamento do aço inoxidável austenítico AISI 316L processado a plasma.** Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Minas e de Materiais) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- FARIAS, M. C. **Tribologia.** Disponível em: <https://www.ucs.br/site/midia/arquivos/18_04_Palestras_Tribologia_Profa_MCristinaMFarias.pdf>. Acesso em: 19 de nov. 2017.
- FAVORIT SPECIAL STEELS. **AISI P20.** Available in: <http://www.favorit.com.br/produtos/acos-ferramenta/aco-aisi-p20/>. Access in 15/03/2018.
- GONÇALVES, C. S. **Efeito do processo de nitretação sob plasma no comportamento em fadiga térmica dos aços ferramenta para moldes para injeção de alumínio sob pressão.** 2012. 62p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica da Universidade de São, São Paulo, 2012.
- GONÇALVES JR., A. A.; SOUSA, A. R. **"Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial"**; Manole, Barueri, SP; 407p. 2008.
- GRAVALHOS, M. T. *et al.* **Influência da rugosidade na resistência à corrosão por pite em peças torneadas de aço inoxidável superaustenítico.** Revista Científica da América Latina, 2010.

- HIPPENSTIEL, F. *et al.* **Handbook of Plastic Mould Steels**. Wetzlar: Edelstahlwerke Buderus AG, 2004. 328p.
- HOLMBERG, K.; RNKAINEN, H.; MATTHEWS, A. **Tribology of thin coating**. *Ceramics International*, v. 26, p.787-795, 2000.
- HUTCHINGS, I. M. **Tribology - Friction and wear of engineering materials**. Edward Arnold, Great Britain, 273p. 1995.
- KATO, K.; ADACHI, K., 2001, “**Wear Mechanisms**”, **MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK**, Ed. CRC Press LLC Vol.2 Cap 22.
- KENNEDY, P. K. **Practical and scientific aspects of injection molding simulation**. 2008. 155 f. Thesis for doctor in Eindhoven University of Technology, Netherlands. 2008.
- KHRUSHCHOV, M. M.; BABICHEV, M. A. **Abrasive wear**. Defense Technical Information Center. MAR. 1971.
- KOVÁKS, B. P.; SIPOS, S.; CZIFRA, A. “**Interpretation on " $R_z = 4 \times R_A$ " and their roughness parameters in the evaluation of machined surfaces**”; 13th; International Conference on Tools, Proceeding, p. 237-244., 2012.
- LOPES, H. S. M. **Estudo da resistência ao desgaste de aço ferramenta P20 tratados superficialmente por cementação e nitretação**. Faculdade Técnica de Sorocaba, São Paulo, Setembro, 2014.
- LOPES, H. S. M. *et al.* **Micro Abrasive Wear Behavior Study os Carburization and Ion Plasma Nitriding of P20 Steel**. *Mat. Res.* vol.9, no.3. São Carlos. May/June. 2016.
- LOPES, H. S. M. *et al.* **Microwear Behavior Study of Carburization and Ion Plasma Nitriding of P20 Steel**. *Blucher Material Science Proceedings*. vol.1, no.1. Nov., 2014.
- LUDEMA, K. C. **Selecting material for Wear resistance**. *Wear of Materials* 1981.
- MACHADO, A. R., ABRÃO, A. M., COELHO, R. T., DA SILVA, M. B. “Teoria da Usinagem dos Materiais”, Edgard Blücher, São Paulo, 371 p., 2009.
- MACHADO, I. F. **Tratamentos térmicos e de superfície**: Introdução à manufatura mecânica. Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- MACIEL, J. C.; NAVES, G. L.; FRANÇA, L. C. **Aços Ferramenta e Tratamento Térmico**. Villares Metals. 2004.
- MASSOLA, C. P. **Abrasão-corrosão em corpos moedores na moagem de minério de ferro**. 2015. 42p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - São Paulo, 2015.
- MELLO, M. S.; SOUZA, A. J.; GEIER, M. "Determinação empírica dos parâmetros de rugosidade Ra e Rt aplicando ferramenta alisadora no torneamento a seco de acabamento do aço AISI 4140". In: 7º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. **Anais do 7º CONEM**. Jul/Agosto, São Luís, MA. 2012, 10p.
- MESQUITA, N. G. M. “**Avaliação e escolha de uma superfície segundo sua função e fabricação**”. Florianópolis, SC, 142p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1992.

- MEUSBURGER. **Aço AISI P20=Ni [Em linha], atual.** 2013. Disponível em WWW:<URL:http://www.meusburger.com/media/files/Materialqualitaeten_E.pdf>. Acesso em: 13 agosto 2018.
- MONTEIRO, A. C *et al.*. **Efeito da transformação da microestrutura do aço carbono obtido por processos termoquímicos a gás.** VI Conferência de Engenharia Mecânica, Elétrica e Industrial - CIMEI. 2010.
- MONTEIRO, M. P. **Inovação.** Revista informativa trimestral da Eutectic Castolin, nº02 2013. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/noticias/mercado/552-revista-informativa-trimestral-da-eutectic-castolin-02-2013>>. Acesso em: 15 de Fev. 2019.
- MOURA, R. R. **Fresamento de aço para matrizes VP20ISO com ferramentas reafiadas.** 2012. 36p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Materiais e processos) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2012.
- NOBLE, D. N. Factors Which Affect Abrasive Wear Resistance of Hardfacing Weld Deposits - A Review of the Literature. **The Welding Institute**, 26 p. Out. 1984.
- OLIVEIRA, C. G.; SILVA, I. P. P. **Os estudos tribológicos no ensino de Engenharia Mecânica.** Revista de Ensino de Engenharia, v.34, n.2, p.3-10, 2015.
- OGATA, H. T. S. **Determinação da influência das tensões residuais nas propriedades de fadiga em aço SAE 8620 processado com diferentes profundidades de camada de cementação.** 2003. 12-13p. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
- PAZ, V. F. **Estudo e caracterização metalográfica da resistência ao desgaste em aços ferramentas sinterizados, temperados a vácuo, utilizados em matrizes de estampagem.** 2016. 20-23p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- PEREIRA, J. C. C., 2006, “Determinação de modelos de vida de ferramenta e rugosidade no torneamento do aço ABNT 52100 endurecido utilizando a metodologia de superfície de resposta (DOE)”. 2006. 140p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, , Itajubá, 2006.
- PIRATELLI FILHO, A. **Rugosidade Superficial.** 3º Seminário de Metrologia da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2011.
- RAMALHO, J. P. Revestimento por soldagem. **Coleção Tecnologia SENAI - Soldagem.** p.315-336 - SENAI - SO, 1997.
- RIBEIRO, R. **Avaliação da resistência as desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo Fe-C-Cr utilizado na indústria sucroalcooleira.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.
- ROBERTS, G.; KRAUSS, G.; KENNEDY, R. **Tool Steels.** 5 ed., American Society for Metals, Metals Park, OH., 1998.
- RODRIGUES, R. R. F. **Inovação e vantagem competitiva entre empresas de hospitalidade.** 2015. 14p. Dissertação (Mestrado Profissional em Administração) - Universidade Potiguar, Natal, 2015.

- ROSA, G. C. *et al.* Análise das variáveis de entrada nos parâmetros de rugosidade em um processo de torneamento de acabamento a seco do aço AISI 420C. In: VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica de Uberlândia, Agosto, 2014. **Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, CONEM, Uberlândia, 2014.
- SANT'ANNA, J. P. **Aços Especiais**. Revista Plástico Moderno. São Paulo, n. 414, mar. 2009.
- SANTOS, E. A. Análise comparativa de desgaste tribológico da liga Al7075 e ligas ferrosas de baixo e médio carbono. In: 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais. **Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais**. 06 a 10 de Nov., Natal, RN, Brasil, 2016.
- SILVA, J. J. O. **Efeito do processo de Shot Peening com diferentes condições de deflexão de Almem nos perfis de tensão residual e microdureza em um aço cementado temperado/revenido utilizado na fabricação de engrenagens automotivas**. 2016. 17-17p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.
- SILVA, V. F. Influência da Austenita retida no crescimento de trincas curtas superficiais por fadiga em camada cementada de aço SAE 8620. 1997. 3p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, SP, 1997.
- SILVA & MEI. **Aços e ligas Especiais**. 3ª Edição. 50 anos. São Paulo: Blucher, p.363-383, 2014.
- SINATORA, A. **Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte**. São Paulo: Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2 jun. 2005. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/66537526/tribologiaITA>>. Acesso em: 15 mar. 2019.
- SOARES, J. P. **Aços para Ferramentas - Características, Tratamentos e Aplicações**. Porto: Publindústria, 2009. 371p.
- SORS, L. Moldes e Matrizes, São Paulo: Hemus, 2002.
- SOUZA, P. F. C. **Avaliação do comportamento em desgaste a seco de aços de roda com microestrutura perlítica e bainítica**. Trabalho de Conclusão de Curso (Título de Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, 2016.
- SPECTRO ANALYTICAL INSTRUMENTS GMBH. **Working principle of a stationary metal analyzer**. SPECTRO Metal Analyzers, XRF Spectrometers for Elemental Analysis, 2013. Disponível em: <<http://www.spectro.com/pages/e/p0102wp01.htm>>. Acesso em: 10 de Julho de 2018.
- STOETERAU, R. L. Apostila de Tribologia do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, SC, Brasil, 2004.
- THELNING, K. E. "**Case Hardening**", in Steel and Its Heat Treatment, Ed. Butterworths, 1984.
- THYSSENKRUPP - **Propriedades mecânicas e físicas do aço AISI P20+Ni [Em linha]**, atual. 2013. Disponível em WWW:<[URL:http://www.thyssenfrance.com/fich_tech_en.asp?product_id=11455&transfo=yes](http://www.thyssenfrance.com/fich_tech_en.asp?product_id=11455&transfo=yes)>. Acesso: 3 de maio 2018.

- VILLARES METALS. 2011 **Aços ferramenta para moldes plásticos**. Disponível em: <<http://www.villaresmetals.com.br/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Moldes-Plasticos/VP20ISO>>. Acesso em: 5 de Fev. 2019.
- WANDER, P. R.; COSTA, C. A.; SCAIN, F. Estudo comparativo de sistemas de resfriamento em moldes para injeção de produtos aletados. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 8p., 2007, Cusco. **Anais do Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica**. Cusco, 2007.
- WEN, D. C. Plasma nitriding of plastic mold steel to increase wear - and corrosion properties. **Journal Surface e Coatings Technology**. n. 204, may, 2009.
- WOOD, R. J. K. Tribocorrosion. In: COTTIS, R. A. *et al.*. (Ed.). **Shreir's corrosion**. 4th. ed. Amsterdam; London: Elsevier, 2010. v.2, p. 1007-1050.
- WORD STEEL ASSOCIATION. www.wordsteel.org. Acesso em: 02/08/2018.
- YOSHIDA, S. **Seleção de aços, tratamentos térmicos e tratamentos de superfície para moldes de injeção de plástico**. Brasimet Comércio e Indústria S/S, São Paulo, set. 1998.
- ZAGONEL, S. **Estudo do desgaste abrasivo de aço carbonitretado em diferentes relações amônia/propano**. 2011. 6p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- ZHANG, G., SCHLARB, A. K. "Correlation of the tribological behaviors with mechanical properties of poly-ether-ketone (PEEKs) with different molecular weights and their fiber filled composites," *Wear*, Vol. 266, pp. 337-344, 2009.