

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA – EE
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA - PPMEC

MARCELO GAUTÉRIO FONSECA

**ESTUDO DOS MECANISMOS DE TRANSFORMAÇÃO DA AUSTENITA RETIDA
NOS PROCESSOS DE CEMENTAÇÃO DE AÇOS BAIXA LIGA POR
DIFERENTES PROCESSO (SHOT PENEING, SUBZERO E CRIONÊNICO)**

RIO GRANDE
2017

MARCELO GAUTÉRIO FONSECA

**ESTUDO DOS MECANISMOS DE TRANSFORMAÇÃO DA AUSTENITA RETIDA
NOS PROCESSOS DE CEMENTAÇÃO DE AÇOS BAIXA LIGA POR
DIFERENTES PROCESSO (SHOT PENEING, SUBZERO E CRIONÊNICO)**

**Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação da Universidade
Federal do Rio Grande, como requisito para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica.**

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Braz Medeiros

RIO GRANDE

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Gautério Fonseca, Marcelo

Estudo dos Mecanismos de transformação da austenita retida nos processos de cementação em aços baixa liga por diferentes processos (shot peening, subzero e criogênico) – Rio Grande, 2017.

Nº de páginas: 84

Área de concentração: Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Braz Medeiros.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande.

1. Austenita; 2. Shot Peening; 3. Criogênico.

Dedico este trabalho a minha esposa Giselle e minha filha Manuela, pela compreensão do tempo que deixamos de estar juntos e aos meus pais, Derli e Vanilda, a eles todos os créditos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus.

Aos meus colegas de trabalho pela compreensão do tempo que precisei para realização desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl, pela oportunidade de trabalhar ao seu lado e me fazer acreditar em minha capacidade.

A Prof. Dr. Jorge Luis Braz Medeiros, que mudou minha visão sobre engenharia de materiais e a admiração que adquiri por seu conhecimento, profissionalismo e dedicação.

Aos meus colegas de pós-graduação que tornaram um período de longa dedicação em algo divertido.

“A persistência é o menor caminho do êxito”.
Charles Chaplin.

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido com a finalidade de avaliar os mecanismos de transformação da austenita retida em amostras de aço DIN 20MnCr5 cementado, temperado e revenido, foram realizados dois processos de shot peening, um dinâmico com porta amostra rotativo de 6 rpm e outro estático. A temperatura utilizada no processo criogênico foi a do Nitrogênio Líquido de -196°C pelo período de duas horas, para a tratamento subzero foi utilizado um ultrafreezer a temperatura de -80°C por um período de quinze horas, para cada um dos processos foram retiradas três amostras para análise, para análise da fração de austenita retida nas amostras foram realizados testes de microdureza, Metalografia Ótica e Mev para análise de comparação com amostras de referências. Para realização do shot peening foi desenvolvido um equipamento na Escola de Engenharia devidamente apropriado para os tipos de amostras utilizadas e com os devidos parâmetros de controles necessário. Para a análise quantitativa foi utilizada análises de imagem em microscópio ótico e recursos de programas de análise de fases e testes de microdureza. Os resultados obtidos foram de 32,32% de austenita retida para as amostras de referência após cementação, tempera e revenimento, de 22,1% de austenita retida para as amostras após o shot peening dinâmico, de 6,04% de austenita retida para as amostras após o shot peening estático, de 5,17% de austenita retida para as amostras após o tratamento subzero e 2,7% de austenita retida para as amostras tratadas em Nitrogênio líquido, todos os processos obtiveram uma redução no percentual de austenita retida.

ABSTRACT

This work was developed with the purpose of evaluating the mechanisms of transformation of austenite retained in samples of steel DIN 20MnCr5 cemented, tempered and tempered, two shot peening processes were carried out, a dynamic one with rotating sample port of 6 rpm and another static. The temperature used in the cryogenic process was that of the liquid nitrogen of -196°C for two hours, for the subzero treatment an ultrafreezer was used at a temperature of -80°C for a period of fifteen hours, for each of the processes were Three samples were analyzed for the analysis of the retained austenite in the samples. Microhardness, Optical Metallography and Mev tests were performed for comparison analysis with reference samples. To perform the shot peening was developed an equipment in the School of Engineering properly appropriate for the types of samples used and with the necessary parameters of necessary controls. For the quantitative analysis we used image analysis in optical microscope and features of phase analysis programs and microhardness tests. The results obtained were 32.32% of austenite retained for the reference samples after carburizing, tempering and tempering, of 22.1% of austenite retained for the samples after the dynamic shot peening, of 6.04% of austenite retained for the samples after static peening shot, 5.17% retained austenite for the samples after the subzero treatment and 2.7% retained austenite for the samples treated in liquid Nitrogen, all the processes obtained a reduction in the percentage of retained austenite .

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação esquemática do diagrama de transformação isotérmica de um aço eutetóide.....	28
Figura 2 - Representação esquemática da formação de uma plaqueta de Martensita (<i>M</i>) a partir de uma matriz austenítica (γ), apresentando os planos de hábito	29
Figura 3 - Representação do processo de revenido indicado pela linha verde no diagrama TTT.....	30
Figura 4 - Representação da rede CFC e Fotomicrográfica da fase austenita	31
Figura 5 - Influência do teor de carbono sobre as propriedades de aços-carbonos esfriados lentamente	32
Figura 6 – Diagrama Fe-C.....	33
Figura 7 - Diagrama Fe-C.....	34
Figura 8 - Imagem da martensita na forma (a) de ripas e (b) acicular.....	37
Figura 9 - Demonstração do efeito do tempo em temperaturas criogênicas na transformação da austenita retida avaliado pela dureza em um aço AISI D2.....	40
Figura 10 - Ilustração de duas engrenagens passando pelo processo de shot peening	41
Figura 11 - Curva característica de tensões residuais produzidas por shot peening	42
Figura 12 - Ilustração esquemática deformações causadas por uma esfera contra a superfície de uma peça	43
Figura 13 - Sistema de shot peening por ar comprimido por sucção	44
Figura 14 - Sistema de shot peening por rotor centrifugo	44
Figura 15 - Representação gráfica da energia mecânica em função da temperatura e as regiões onde podem ocorrer a transformação da austenita retida em martensita.....	45
Figura 16 - Organograma das etapas de desenvolvimento do trabalho	47

Figura 17 - Material cementado a partir do qual foram retirados os corpos de prova.....	48
Figura 18 - Corpo de prova no suporte	49
Figura 19 - Bico utilizado no Shot Peening	50
Figura 20 - Pistola utilizado no shot peening.....	50
Figura 21 - Equipamento utilizado para realização do shot peening.....	51
Figura 22 - Realização do shot peening dinâmico.....	52
Figura 23 - Shot peening estático.....	53
Figura 24 - Ultrafreezer utilizado no tratamento criogênico.....	54
Figura 25 - Tanque de nitrogênio líquido onde foram colocadas as amostras	54
Figura 26 - Amostra sendo retirada do tanque de nitrogênio líquido.....	55
Figura 27 - Ilustração do equipamento utilizado no embutimento	55
Figura 28 - Equipamento utilizado no lixamento.....	56
Figura 29 – Politriz	56
Figura 30 - Imagem do microdurômetro utilizado nos testes.....	58
Figura 31 - Imagem em EDS da seleção das fases presentes na superfície cementada	59
Figura 32 - Amostra obtida em microscópio óptico	63
Figura 33 - Imagem obtida no MEV 2000x.....	63
Figura 34 - Imagem da região selecionada de uma das amostras para definir o percentual de austenita retida.....	64
Figura 35 - Imagem de uma das amostras obtidas em microscópio óptico.....	64
Figura 36 - Imagem tira através de microscopia óptica.....	65
Figura 37 - Imagem obtida em microscópio óptico da superfície onde ocorreu à transformação	66
Figura 38 - Espessura da camada que ocorreu a transformação.....	66
Figura 39 - Imagem obtida em MEV da superfície onde ocorreu a transformação ...	67
Figura 40 - Imagem retirada de análise óptica para determinação do percentual de austenita retida.....	67

Figura 41 - Imagem obtida em microscópio óptico da superfície cementada.....	68
Figura 42 - Imagem obtida no MEV com ampliação de 2000x	68
Figura 43 - Imagem retirada de análise óptica para determinação do percentual de austenita retida.....	69
Figura 44 - Imagem obtida em microscópio óptico	69
Figura 45 - Imagem obtida em MEV	70
Figura 46 - Imagem da região selecionada e Imagem ampliada da seleção da fase austenítica.....	70
Figura 47 - Representação gráfica dos resultados das amostras cementadas e tratadas termicamente	71
Figura 48 - Representação gráfica dos resultados das amostras do processo de shot peening dinâmico	72
Figura 49 - Representação gráfica dos resultados das amostras do processo de shot peening estático	73
Figura 50 - Representação gráfica dos resultados dos testes de microdureza das amostras tratadas termicamente em ultrafreezer	74
Figura 51 - Representação gráfica dos resultados dos testes de microdureza das amostras tratadas em nitrogênio líquido	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aços-liga de baixo teor em liga para cementação.....	23
Tabela 2 - Aços-liga de alto teor de liga para cementação	23
Tabela 3 - Composição química das amostras analisadas	59
Tabela 4 - Espectro com a composição química das fases presentes na região cementada no ponto 1	60
Tabela 5 - Espectro com a composição química das fases presentes na região cementada no ponto 2	60
Tabela 6 - Espectro com a composição química das fases presentes na região cementada no ponto 3	61
Tabela 7 - Espectro com a composição química das fases presentes na região cementada no ponto 4	61
Tabela 8 - Espectro com a composição química das fases presentes na região cementada no ponto 5	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

M	Martensita
γ	Matriz austenítica
Mn	Manganês
Cr	Cromo
O	Oxigênio
H	Hidrogênio
N	Nitrogênio
N ₂	Nitrogênio Líquido
Fe	Ferro
S	Enxofre
P	Fósforo
Si	Silício
Ni	Níquel
Mo	Molibdênio
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
H ₂ O	Água
CH ₄	Metano
mm	Milímetro
Cm	Centímetro
L	Litro
Min	Minuto
S	segundos
V	Volts
Rpm	Rotações por minuto
G	Gramma
Kgf/mm ²	Quilograma força por milímetro quadrado
DIN	Instituto Alemán de Normalización
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
AISI	American Iron and Institute

EDS	Sistema de energia dispersiva
SAE	Society of Automotive Engineers
°C	Temperatura em graus Celsius
°F	Temperatura em graus Fahrenheit
T	Temperatura
CFC	Cúbica de face centrada
CCC	Cúbica de corpo centrado

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	9
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	13
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVOS GERAIS.....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 AÇOS E SUAS TRANSFORMAÇÕES.....	19
2.1.1 Aços e sua importância tecnológica	19
2.1.2 Aços suas fases e Microestrutura	20
2.1.3 Aços baixo carbono aplicados a cementação	20
2.1.4 Efeito dos elementos de liga nos aços baixa carbono.....	21
2.1.5 Aços para cementação e carbonitreção	22
2.2 TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTAÇÃO	24
2.2.1 Cementação	24
2.2.2 Mecanismos de cementação.....	25
2.2.3 Dissociação e transferência de carbono nos processos de cementação:	25
2.2.4 Cementação Gasosa.....	26
2.2.5 Microestrutura da camada cementada	26
2.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS EM AÇOS CEMENTADOS.....	27
2.3.1 Considerações gerais.....	27
2.3.2 Tempera convencional	27
2.3.3 Fatores que afetam a posição das curvas do diagrama TTT. Endurecibilidade ou temperabilidade	28
2.3.4 Transformação martensítica dos aços	29
2.3.5 Tratamento térmico de revenido.....	29
2.4 AUSTENITA RETIDA E SUA TRANSFORMAÇÃO.....	30
2.4.1 Austenita retida ou residual	30
2.4.2 Efeito da velocidade de resfriamento sobre a transformação da austenita ...	31
2.4.3 Comportamento da austenita retida e sua estabilidade na transformação para martensita	34

2.4.5	Transformação martensítica.....	36
2.4.6	Transformação da austenita retida por deformação plástica.....	37
2.5	PROCESSO DE TRATAMENTO CRIOGÊNICO	37
2.5.1	Origem do processamento de materiais através de processos Criogênico...37	
2.5.2	Classificação dos tipos de tratamentos criogênicos	38
2.5.3	Tratamento criogênico.....	38
2.5.4	Mudanças estruturais no tratamento criogênico.....	39
2.5.5	Efeito do tratamento criogênico nas propriedades mecânicas dos aços.....	40
2.6	SHOT PENEING.....	41
2.6.1	Breves considerações	41
2.6.2	Parâmetros de controle para realização de Shot Peening	42
2.6.3	Métodos de shot Peening.....	43
2.6.4	Transformação da austenita retida por shot peening	45
3	MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1	MATERIAL UTILIZADO.....	48
3.2	CEMENTAÇÃO	48
3.3	TRATAMENTO TÉRMICO	48
3.4	CORPOS DE PROVA	48
3.5	PROCESSO DE SHOT PEENING (EQUIPAMENTO)	49
3.5.1	Realização do shot peening dinâmico.....	51
3.5.2	Realização do shot peening estático.....	52
3.6	TRATAMENTO CRIOGÊNICO.....	53
3.6.1	Tratamento criogênico em Ultra Freezer.....	53
3.6.2	Tratamento criogênico em Nitrogênio Líquido.....	54
3.7	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	55
3.7.1	Embutimento;.....	55
3.7.2	Lixamento;.....	56
3.7.3	Polimento;.....	56
3.7.4	Ataque químico	57
3.8	ANÁLISE DE MICROESTRUTURA E DO PERCENTUAL DE AUSTENITA RETIDA EM MICROSCÓPIO ÓPTICO	57
3.9	ANÁLISE DE MICROESTRUTURA EM MEV	57
3.10	TESTES DE MICRODUREZA.....	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59

4.1	ANÁLISE QUÍMICA.....	59
4.2	DETERMINAÇÃO DAS FASES E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL APÓS CEMENTAÇÃO E TRATAMENTO TÉRMICO EM EDS	59
4.3	ANÁLISE DE MICROESTRURA DAS AMOSTRAS APÓS O SHOT PEENING DINÂMICO, ESTÁTICO, TRATAMENTO EM ULTRAFREEZER E NITROGÊNIO LÍQUIDO.....	62
4.3.1	Resultados de análise microestrutural das amostras após cementação e tratamento térmico	62
4.3.2	Análise microestrutural e resultados para o processo de Shot peening dinâmico	64
4.3.3	Análise microestrutural e resultados para o processo de shot peening estático	65
4.3.4	Análise microestrutural e resultados para o processo de tratamento subzero em ultrafreezer.....	67
4.3.5	Análise microestrutural e resultados obtidos em tratamento criogênico em Nitrogênio Líquido	69
4.4	TESTES DE MICRODUREZA.....	71
4.4.1	Aços DIN 20MnCr5 cementado e tratado termicamente	71
4.4.2	Resultados de microdureza para o processo de Shot Peening Dinâmico	72
4.4.3	Resultados de microdureza para processo de shot peening estático	73
4.4.4	Resultados de microdureza para o processo subzero em ultrafreezer	73
4.4.5	Resultados de microdureza para o processo criogênico em Nitrogênio Líquido.....	75
5	CONCLUSÕES	76
6	- SUJESTÕES DE PRÓXIMOS TRABALHOS	77
	REFERÊNCIAS.....	78
	APÊNDICE 1 - TABELAS DE RESULTADOS DE TESTES DE MICRODUREZA PARA AMOSTRAS CEMENTADAS.	82
	APÊNDICE 2 - TABELA DE RESULTADOS DE TESTES DE MICRODUREZA DAS AMOSTRAS COM SHOT PEENING DINÂMICO.....	83
	APÊNDICE 3 - TABELA DE RESULTADOS DE TESTES DE MICRODUREZA DAS AMOSTRAS DE SHOT PEENING ESTÁTICO.....	84
	APÊNDICE 4 - TABELA DE RESULTADOS DOS TESTES DE MICRODUREZA DAS AMOSTRAS COM TRATAMENTO SUBZERO	85
	APÊNDICE 5 - TABELA DE RESULTADOS DE TESTES DE MICRODUREZA DAS AMOSTRAS COM TRATAMENTO CRIOGÊNICO.....	86
	ANEXO 1 - FICHA TÉCNICA ZIRTEC – MICRO ESFERAS DE VIDRO	87
	ANEXO 2 - RELATÓRIO DE ANÁLISE E CERTIFICAÇÃO ZIRTEC.....	88

1 Introdução

O avanço tecnológico sugere o desenvolvimento de novos materiais e novas tecnologias que possam proporcionar produtos competitivos economicamente e com as propriedades desejadas para as mais diversas aplicações.

Durante o processo de tratamento termoquímico de cementação e posterior tempera o material sofre uma transformação, passando de uma estrutura austenítica para outra, onde predomina a martensita. Essa transformação geralmente não é completa devido a estabilização que o carbono e outros elementos de liga ocasionam no material, restando, nos espaços entre as ripas e placas da martensita, uma fase residual de austenita retida. Este componente indesejado degrada as propriedades mecânicas do aço temperado, provocando alterações dimensionais e diminuição em sua dureza e resistência mecânica. Para diminuir a presença da austenita retida, além de processos de conformação mecânica, o revenimento é um dos tratamentos térmicos mais empregados. Estes métodos exigem equipamentos de elevado custo, procedimentos complexos, e elevadas incertezas nos resultados, principalmente na determinação de pequenas frações desta componente. Existe algumas formas de se transformar esta austenita retida em martensita.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho tem como objetivo desenvolver diferentes técnicas confiáveis para transformação da austenita retida em martensita, melhorando o desempenho de componentes cementados, fazendo um comparativo quantitativo utilizando diferentes processos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a microestrutura de aços cementados;
- Verificar a presença de austenita retida;
- Desenvolver processo shot peening;
- Avaliar processos Subzero e Criogênico;

2 Revisão de Literatura

2.1 AÇOS E SUAS TRANSFORMAÇÕES.

2.1.1 Aços e sua importância tecnológica

A indústria siderúrgica até a década de 1970 estabeleceu-se muito suscetível às variações dos ciclos econômicos globais, fornecedora de um dos principais produtos para o desenvolvimento da tecnologia na indústria e construção civil. A partir de 1973, tal relação não se manifestava com a mesma intensidade, já que com o crescimento econômico mundial, não se traduzia em um aumento na demanda por aço.

O investimento em inovações tecnológicas procurando melhorias na qualidade e aumento da eficiência produtiva foi mudando o cenário já que no período entre 1970 e 1980 foram marcados pela crise energética e sobre capacidade do setor devido uma retração e de centralização produtiva com a entrada de novos países produtores [1].

A partir dos meados de 1980 e o surgimento de uma estabilidade dos níveis de demanda mundial e reestruturação do setor houve o surgimento de uma nova tendência diante de um capitalismo que exigia compactar as etapas produtivas, em pequenos lotes de produtos diferenciados, com exigências cada vez maiores pela qualidade e a utilização e a inovação de diferentes processos [1].

Atualmente todos os materiais que nos deparamos no dia-dia, muitos deles são reconhecidos como metais ou ligas metálicas, este conceito está intimamente relacionado a uma série de propriedades tais com brilho metálico, opacidade, boa condutividade elétrica e térmica, ductilidade, etc..

Os aços são materiais extraordinários e altamente versáteis, mas no entanto, um material complicado em vista de seu processamento e química, podendo incluir vários elementos químicos na sua formação, além de Ferro como elemento de base [2].

Os aços se diferenciam entre si, pela forma do arranjo em sua estrutura, tamanho e uniformidade dos grãos e pela sua composição química, tais variações alteram significativamente suas propriedades mecânicas, soldabilidade, ductilidade e resistência a corrosão, entre outros [5].

2.1.2 Aços suas fases e Microestrutura

Os materiais metálicos em seu estado líquido, proveniente da alta energia térmica envolvida, apresentam uma microestrutura amorfa, ocasionada pela não ocorrência de ordenações de longo alcance dos átomos, já no estado sólido apresenta como característica principal a sua microestrutura que é resultante por um arranjo dos átomos. O surgimento de diferentes estruturas e arranjos ocorrem na passagem do material do estado líquido para o estado sólido, quando há o processo de cristalização, levando à ordenação dos átomos decorrente a atração química e atômica, assim diferentes arranjos desses átomos dão origens a diferentes componentes estruturais denominados fases [4].

As fases são partes estruturais homogêneas. As formas mais simples de fases nos materiais são aquelas constituídas no estado de agregação dos materiais como, sólidos, líquido e gasoso. O conceito básico para possíveis mudanças nas características e propriedades de materiais metálicos, esta que modificações introduzidas em sua microestrutura interferem diretamente em suas características, tais modificações podem ser realizadas através da modificação da composição química da liga, através da alteração dos processo de fabricação e através de tratamentos térmicos que impondo alterações controladas na temperatura no material no estado sólido, provocam alterações das fases originais.

Os materiais metálicos encontrassem em seu estado mais normal, quando sua microestrutura apresentar o equilíbrio termodinamicamente mais estável [4].

2.1.3 Aços baixo carbono aplicados a cementação

Os aços carbono são ligas que Ferro-Carbono que contêm o ferro como elemento de base com teores de carbono que variam entre 0,008% e 2,11%, além de certos elementos residuais resultante do seu processo de fabricação. Devido sua boa ductilidade e plasticidade possuem maior facilidade para trabalhos a frio quanto a quente do que aços que suportam maiores esforços [8].

Os aços carbonos se dividem em três classes que são:

- Aços de baixo carbono, com percentuais de [C] que variam de 0,05% até 0,30%, são aços com grande ductilidade e boa soldabilidade e apresentam dureza entre 100 e 170 Vickers.
- Aços de médio teor de carbono, com percentuais que variam de 0,3% e 0,5% de carbono são aços utilizados na fabricação de bielas engrenagens que temperados e revenidos atingem boa tenacidade e resistência.
- Aços de alto teor de carbono, possuem percentuais maiores do que 0,7% de carbono são aços de alta dureza e resistência após a tempera.

Os aços são fabricados e distribuídos para as mais diversas aplicações assim foram criados diversos sistemas de classificação dos aços para construção mecânica, no Brasil o mais utilizado são os da SAE (Society of Automotive Engineers) e da AISI (American Iron and Steel Institute). O aço é designado geralmente por quatro algarismos. Os dois primeiros referem-se aos elementos de liga e os dois últimos ao teor de carbono [5,6,7].

2.1.4 Efeito dos elementos de liga nos aços baixa carbono

Os elementos de liga ou elementos químicos podem ocupar um lugar na estrutura cristalina do ferro preenchendo eventuais lacunas ou de forma intersticial sendo está preponderante nos aços, em ambos os casos o material é classificado como aço liga ou ligado [8].

As propriedades e características dos aços e ligas especiais, estão diretamente relacionada a sua composição química, as alterações nas fases presentes em equilíbrio e a maneira e velocidade com que as fases se formam. É evidente então, que existe certo grau de complexidade nos efeitos que os elementos de liga possam causar nas propriedades e características dos aços [9].

2.1.5 Aços para cementação e carbonitreção

A tendência atual na produção de peças cementadas e a introdução de elementos de liga refletem diretamente no custo de produção e no processo de manufatura de peças e componentes. Para reduzir tais custos procura-se utilizar, sempre que possível aço baixo carbono ou aços de baixo teor de liga com carbono mais elevado, em casos onde as propriedades exigidas envolvam maiores necessidades a solução é introduzir elementos de liga em teores mais elevados [10,13].

Os aços para cementação se classificam em três tipos:

- Aços-carbonos;

O teor de carbono varia entre 0,08% a 0,25%, O mais comum entre esses é o SAE 1020 com variações de manganês mais alto (0,70% a 1,00%), os aços-carbonos são maleáveis com boa tenacidade e capacidade de carbonetar, são de fácil usinabilidade e com capacidade de endurecer, possuem bom controle no tratamento térmico.

Os aços-carbonos apesar de não apresentarem uma melhor resistência mecânica comparados com os aços aços-liga quando tratados termicamente são capazes de conferir excelentes resultados de dureza e resistência mecânica, podendo chegar a 70Kgf/mm².

- Aços-liga de baixo teor em liga;

Os aços-ligas de baixo teor de liga apresentam um percentual de elementos de liga de 1% a 2%, como cromo, níquel, molibdênio e manganês, em combinações adequadas. Tais elementos conferem a esses aços boa temperabilidade e elevada dureza, além de alta resistência à tração com um núcleo dúctil. A Tabela 1 mostra algumas composições típicas [10,13].

Tabela 1 - Aços-liga de baixo teor em liga para cementação

SAE	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
8115	0,13/0,18	0,70/0,90	0,035	0,040	0,20/0,35	0,20/0,40	0,30/0,50	0,08/0,15
8615	0,13/0,18	0,70/0,90	0,035	0,040	0,20/0,35	0,40/0,60	0,40/0,60	0,15/0,25
8617	0,15/0,20	0,70/0,90	0,035	0,040	0,20/0,35	0,40/0,70	0,40/0,60	0,15/0,25
8620	0,18/0,23	0,70/0,90	0,035	0,040	0,20/0,35	0,40/0,70	0,40/0,60	0,15/0,25
8622	0,20/0,25	0,70/0,90	0,035	0,040	0,20/0,35	0,40/0,70	0,40/0,60	0,15/0,25
8625	0,23/0,28	0,70/0,90	0,035	0,040	0,20/0,35	0,40/0,70	0,40/0,60	0,15/0,25
8627	0,25/0,30	0,70/0,90	0,035	0,040	0,20/0,35	0,40/0,70	0,40/0,60	0,15/0,25
8720	0,18/0,23	0,70/0,90	0,035	0,040	0,20/0,35	0,40/0,70	0,40/0,60	0,20/0,30
8822	0,20/0,25	0,75/1,00	0,035	0,040	0,20/0,35	0,40/0,70	0,40/0,60	0,30/0,40
94B15*	0,13/0,18							

Fonte: Infomet

- Aços-liga de teor em liga mais elevado;

Nestes aços os percentuais de elementos de liga superam 8%, apresentam alta temperabilidade e o teor de carbono não deva superar 0,25%. Nesses aços se consegue excelentes tenacidades no núcleo. A tabela 2 abaixo está a relação de alguns aços-ligas com seus teores de elementos de liga [11].

Tabela 2 - Aços-liga de alto teor de liga para cementação

SAE	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
3310	0,08/0,13	0,45/0,60	—	—	0,20/0,35	3,25/3,75	1,40/1,75	—
4320	0,17/0,22	0,45/0,65	0,035	0,040	0,20/0,35	1,65/2,00	0,40/0,60	0,20/0,30
4615	0,13/0,18	0,45/0,65	0,035	0,040	0,20/0,35	1,65/2,00	—	0,20/0,30
4617	0,15/0,20	0,45/0,65	0,035	0,040	0,20/0,35	1,65/2,00	—	0,20/0,30
4620	0,17/0,22	0,45/0,65	0,035	0,040	0,20/0,35	1,65/2,00	—	0,20/0,30
4621	0,18/0,23	0,70/0,90	0,035	0,040	0,20/0,35	1,65/2,00	—	0,20/0,30
4815	0,13/0,18	0,40/0,60	0,035	0,040	0,20/0,35	3,25/3,75	—	0,20/0,30
4817	0,15/0,20	0,40/0,60	0,035	0,040	0,20/0,35	3,25/3,75	—	0,20/0,30
4820	0,18/0,23	0,50/0,70	0,035	0,040	0,20/0,35	3,25/3,75	—	0,20/0,30

Fonte: COSTA E SILVA, A. L. & MEI, P. M. *Aços e Ligas Especiais*, Eletrometal 1988

2.2 TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTAÇÃO

2.2.1 Cementação

O processo de cementação de aços seguido de tempera é um processo muito antigo que, na época antiga e medieval, era o único meio de produzir aços para espadas e facas. Com a incapacidade de atingirem altas temperaturas para fusão de minério de ferro, a única maneira de produzir um aço era reduzir o minério de ferro, então forjar laminas finas e mantê-la por um tempo suficiente em um fogo de carvão seguido de uma remoção direta em um líquido e um subsequente reaquecimento. Durante muitos anos, não se sabia o que acontecia durante esse processo siderúrgico [12,13].

Cementação é um tratamento termoquímico utilizado em aços baixo carbono, realizado através do processo de difusão, que consiste na introdução de carbono na superfície do aço, de forma que, depois de temperado, apresente uma superfície com extrema dureza e um núcleo tenaz.

O processo de cementação consiste em se adicionar uma quantidade de carbono à superfície da peça na faixa de 0,8% a 1% a uma temperatura entre 850 e 950°C. Estas temperaturas podem ser mais elevadas a fim de se reduzir o tempo de cementação ou produzir profundidades de camada cementada mais profundas na peça. Este tratamento termoquímico de introdução do carbono na austenita é diretamente influenciado por dois processos que determinam a taxa de cementação. Estes são a absorção do carbono na superfície e a difusão do carbono pelo aço. A cementação é amplamente utilizada na produção de peças e componentes para suportarem esforços de tração, flexão, torção e resistência a fadiga [14,15,16,9].

Existem vários métodos para a realização da cementação dentre outras as mais conhecidas são: sólida, ou em caixa, líquida, plasma e a vácuo [13].

Fatores que influenciam no controle nos processos de cementação

Existem basicamente dois fatores que influenciam o controle do processo de cementação que são;

- a) O potencial do meio ou da atmosfera onde a peça será cementada (sólido, líquido, gasoso ou plasma) e o elemento químico utilizado no processo.

- b) É a capacidade da peça de absorver esse elemento durante o processo, que está associada com a solubilidade e a difusão do elemento químico na peça a ser cementada [9].

2.2.2 Mecanismos de cementação.

Nos processos de cementação existem basicamente dois mecanismos que devem ocorrer para realização do processo.

- Dissociação e transferência do carbono da atmosfera cementada para a superfície do aço
- Difusão do carbono no processo de cementação para o aço [17].

2.2.3 Dissociação e transferência de carbono nos processos de cementação:

Estudos revelam que existam aproximadamente 180 reações químicas que ocorrem durante o processo de cementação [18].

Entre as equações de transferência de carbono da atmosfera para o material da peça a ser cementada com maior transferência de carbono para iniciar o processo de cementação são as seguintes [19]:



Entre as equações citadas a que ocorre a maior velocidade de reação é a equação número (1) e a que ocorre menor velocidade de reação é a que envolve o metano de número (4) [19].

2.2.4 Cementação Gasosa.

A cementação gasosa é entre todos os outros processos o mais utilizado na indústria, seu princípio consiste em se colocar a peça a ser cementada em um forno com atmosfera de potencial de carbono controlado, este controle se dá por meio de gases que contêm CO, CO₂, H₂, H₂O e CH₄. Além do controle de carbono se faz necessário o controle do potencial de oxigênio.

A microestrutura resultante da cementação depende de dois fatores conjugados que são:

- Variação de velocidade de resfriamento (têmpera).
- Variação da composição química (difusão de carbono).

Reações principais:



Como essas reações são reversíveis, dependendo da temperatura e das concentrações de metano (CH₄) e hidrogênio (H₂), o aço pode tanto receber carbono (C) como perdê-lo [9,19,20].

2.2.5 Microestrutura da camada cementada

No processo de obtenção de aços cementados o processo de difusão ocorre da superfície para o núcleo, formando um sistema microestrutural complexo. Diferentes microestruturas e possíveis mudanças dependem do tratamento térmico realizado após a cementação.

A microestrutura da camada cementada consiste basicamente de martensita, austenita retida, carbonetos, inclusões, segregações de fósforo e óxidos na camada cementada [21].

2.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS EM AÇOS CEMENTADOS

2.3.1 Considerações gerais

Os tratamentos térmicos são utilizados com a finalidade de se obterem matérias com as propriedades e características nas quais eles foram desenvolvidos, mas, podem desencadear transformações de fases na liga metálica, quando ocorre uma transformação de fase, uma nova fase surge com propriedades diferentes da que possuía, tais transformações acontecem devido as transformações difusionais envolvidas por fenômenos de nucleação e crescimento de uma nova fase, aumentando até atingirem o equilíbrio.

Dependendo da velocidade de resfriamento dos aço-carbono, podem-se obter diferentes composições das fases presentes no tratamento, como perlita, bainita e a martensita [4].

2.3.2 Tempera convencional

Tempera são processos de tratamento térmico em aços com a finalidade de aumentar a dureza e a resistência mecânica, tal processo é realizado em duas etapas. A primeira é elevar a temperatura do material superior à temperatura crítica de 727°C e posteriormente realizar o resfriamento brusco visando obter uma estrutura martensítica [22].

A temperatura de austenização pode variar com a composição química de cada material, o objetivo no processo é conduzir o aço a uma fase, na qual se obtém o melhor arranjo possível dos cristais do aço, para obter a futura dureza. Após essa fase o aço pode ser submetido a outros tratamentos térmicos suplementares envolvendo outras transformações de fases, de acordo com a necessidade.

Para o processo de tempera pode-se levar vários fatores.

O tempo de exposição da peça a temperatura de austenização. Cada aço tem uma temperatura de austenização, e que é aquela que proporciona o máximo de dureza.

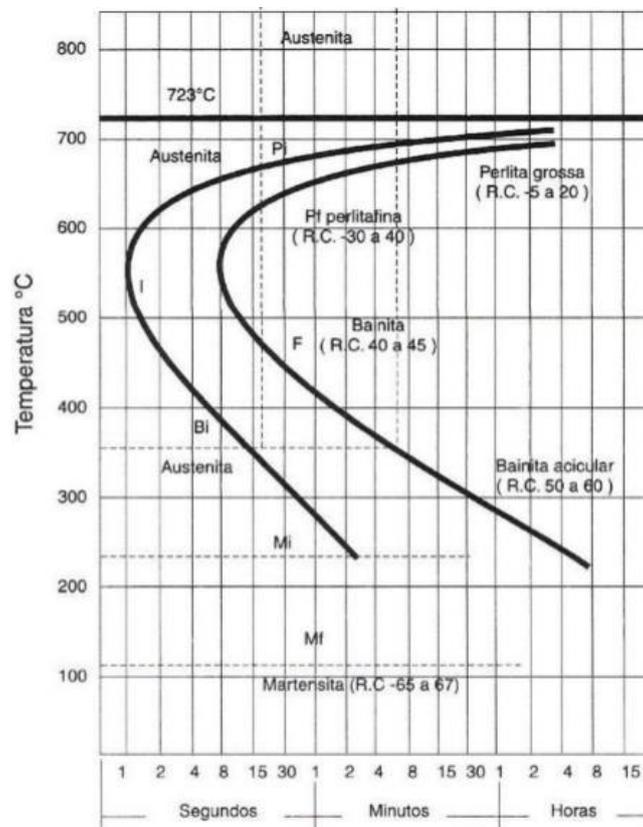
A segunda etapa da têmpera é o tempo de resfriamento, A rapidez do resfriamento é importante para formação da estrutura desejada [4].

2.3.3 Fatores que afetam a posição das curvas do diagrama TTT. Endurecibilidade ou temperabilidade

O diagrama de fases, serve para nos dar a proporção e a estrutura de fases a uma determinada temperatura, mas não revela o tempo em que ocorre cada reação.

No diagrama TTT da Figura 1, está a representa da curva que estabelece o tempo e a temperatura em que ocorrem as diversas transformações sólidas nos aços. Tais curvas de temperabilidade possuem grande valores práticos, pois ao se conhecer as velocidades de resfriamento de um aço ao sofre tratamento térmico a sua dureza pode ser determinada diretamente a partir da curva de temperabilidade. Outro fator que pode afetar a curva de temperabilidade são os elementos de liga presentes na composição química. A adição desses elementos de liga na composição química dos aços, com exceção do Cobalto, desloca o cotovelo do diagrama para a direita aumentando a temperabilidade [36].

Figura 1 - Representação esquemática do diagrama de transformação isotérmica de um aço eutetóide



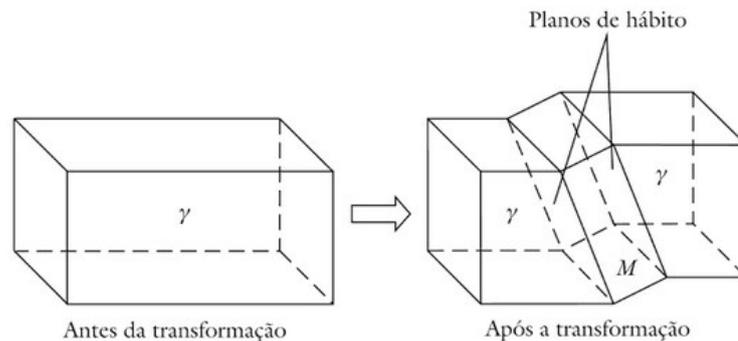
Fonte: CHIAVERINI, 2008.

2.3.4 Transformação martensítica dos aços

Na transformação martensítica nos aços a austenita com estrutura cúbica de faces centradas transforma-se em martensita com estrutura cúbica de corpo centrado, não havendo um plano comum que permita a coerência entre as duas estruturas, mas foi observado experimentalmente que a transformação da austenita em martensita ocorre através da rápida movimentação da interface de separação entre elas, constituída por um plano cristalino invariante comum às duas, denominado plano de hábito, que dificulta a explicação do processo [4].

A Figura 2 apresenta de forma esquemática a formação de uma plaqueta de martensita na matriz austenítica, evidenciando o plano de hábito.

Figura 2 - Representação esquemática da formação de uma plaqueta de Martensita (M) a partir de



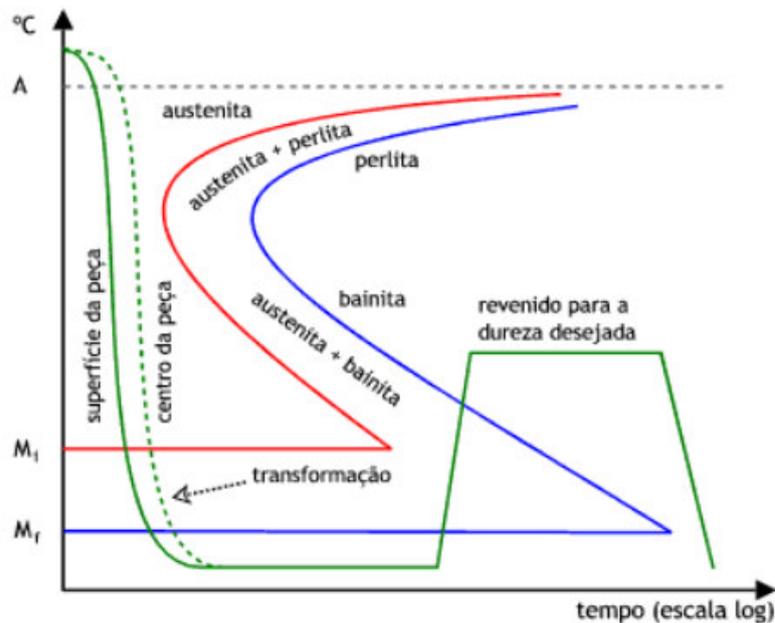
Fonte: RG dos Santos, 2017.

2.3.5 Tratamento térmico de revenido

Os tratamentos térmicos de revenimento possuem o objetivo de tornar os aços temperados mais dúcteis através de aquecimento. Para a obtenção das propriedades finais desejadas variáveis como tempo e temperatura devem ser controladas durante o processo [16]. O processo de revenimento consiste na segregação de carbono para os defeitos da rede cristalina e a precipitação de carbonetos metaestáveis, cuja natureza depende da liga e da temperatura de revenimento, além disso, o tratamento térmico de revenido é possível transformar a austenita retida, também conhecido como segundo estágio do revenido e acontece a temperaturas entre 200 e 250°C. A Figura 3 abaixo está o diagrama TTT e a linha

verde está a representação do processo de revenido em função do tempo e temperatura. O resultado é um alívio de tensões internas e redução de dureza [15,16].

Figura 3 - Representação do processo de revenido indicado pela linha verde no diagrama TTT.



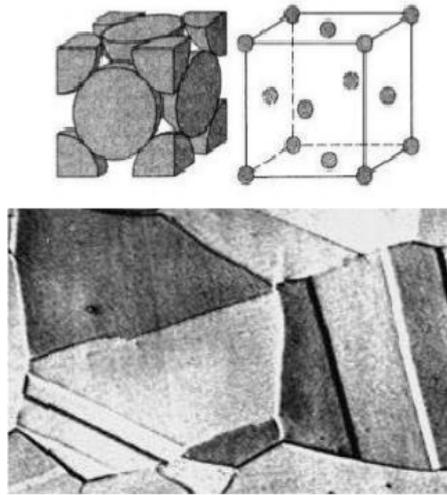
Fonte - MSPC

2.4 AUSTENITA RETIDA E SUA TRANSFORMAÇÃO

2.4.1 Austenita retida ou residual

A austenita em sua fase sólida ou ferro na fase alfa γ , possui estrutura (CFC) cúbica de face centrada não magnética, permite uma maior solubilidade do carbono máximo de 2,14% em massa a temperatura de 1147°C. Na Figura 4 está a representação de uma rede cristalina e também uma ilustração contendo os grãos austeníticos.

Figura 4 - Representação da rede CFC e Fotomicrográfica da fase austenita



Fonte: THELNING, 1975, CALLISTER, 2002

Após o tratamento térmico de tempera, tem-se uma microestrutura martensítica de estrutura CCC o que resulta uma estrutura com elevada tensão interna, dureza e fragilidade.

A austenita retida surge após a solubilização e tempera, tendo como sua principal causa a composição química e o elemento mais importante o carbono, o qual rebaixa significativamente o início e o fim da formação da martensita. O carbono em solução sólida contribui aumentando a resistência ao cisalhamento da austenita, desse modo, quantidades apreciáveis de austenita não transformada, podem estar presentes entre as ripas de martensita a temperatura ambiente. Já independente de quaisquer níveis carbono, os elementos de liga tendem a estabilizar a austenita, favorecendo o aumentando nos percentuais de austenita retida.

Outro fator que influi nos percentuais de austenita retida é a temperatura de austenização, quanto maior for a mesma, maior será a capacidade de dissolver excessos de carbonetos na austenita, antes do resfriamento [23, 27].

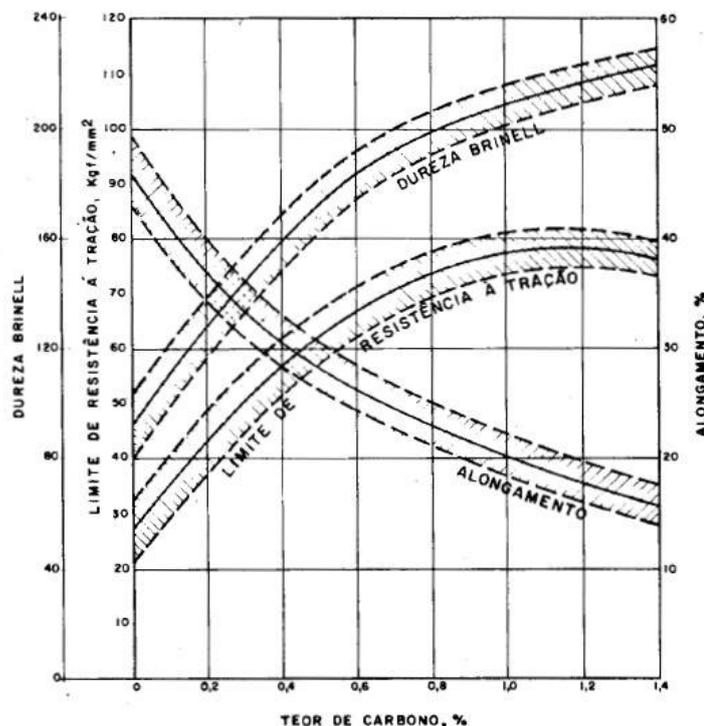
2.4.2 Efeito da velocidade de resfriamento sobre a transformação da austenita

Constituintes resultantes da transformação da austenita como a ferrita, perlita e cementita, de acordo com suas quantidades atribuem aos materiais

diferentes propriedades mecânicas, durante o resfriamento sob temperaturas de austenização, fases e constituintes bem como suas morfologias estão diretamente atreladas à composição e as velocidades de resfriamento alcançadas durante o processo. A estrutura martensítica que confere maior resistência ao aço raramente é usada nessa condição [24].

No diagrama de equilíbrio na Figura 5 pode se observar as variações nas propriedades mecânica dos aços.

Figura 5 - Influência do teor de carbono sobre as propriedades de aços-carbonos esfriados lentamente

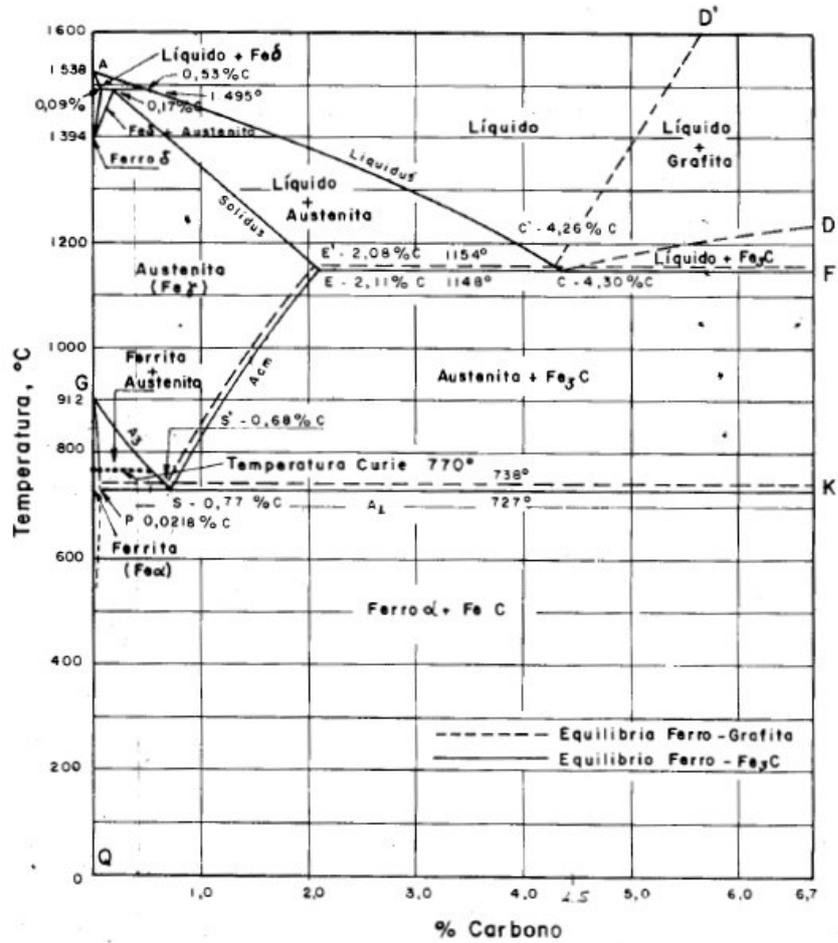


Fonte: Evaldo Diniz Dias, Célio Jesus Marcelo, Horacio Guimarães Delgado Jr., José Adilson Castro, Carlos Roberto Xavier; *Efeito da velocidade de resfriamento sobre a transformação da austenita em aços baixa liga*, CADERNOS UniFOA; 2014.

No instante que for aumentada a velocidade de resfriamento da austenita não haverá tempo suficiente para uma completa movimentação e arranjo atômico e as reações de transformação da austenita se modificam podendo deixar de formar-se os constituintes normais. Pode-se deduzir-se que quando se aumenta a

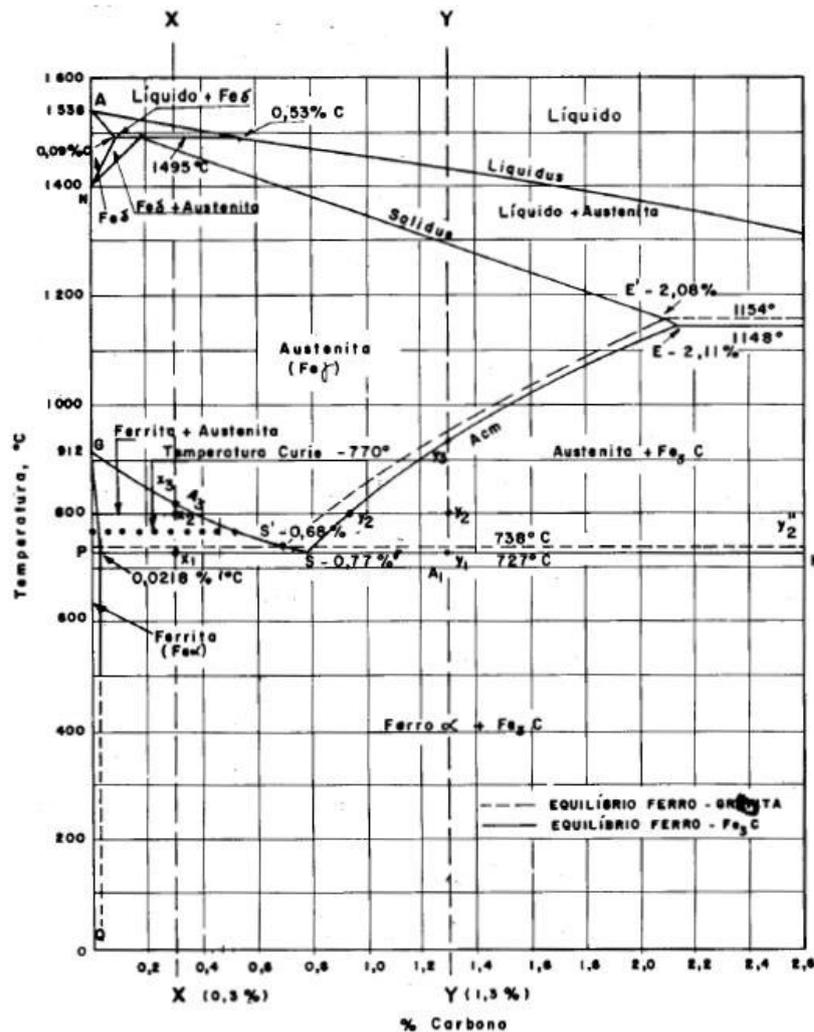
velocidade de resfriamento representado no diagrama Fe-C da Figura 6 e 7, como resultado de uma alteração na posição da zona crítica tem-se um gradual abaixamento nas linhas de transformação A_3 e A_1 [24].

Figura 6 – Diagrama Fe-C



Fonte: Cardernos UinFOA; 2014.

Figura 7 - Diagrama Fe-C



Fonte: CADERNOS UniFOA; 2014.

2.4.3 Comportamento da austenita retida e sua estabilidade na transformação para martensita

Compreender os fatores que contribuem para estabilidade térmica e mecânica da austenita retida é uma questão importante que deve ser considerada na produção de materiais e componentes e que se torna determinante no desempenho dos materiais

A resistência da austenita retida em transformar-se em martensite após a deformação, também referida como estabilidade mecânica, é um fator importante na resposta mecânica desses aços. A austenita retida também pode se decompor termicamente em fases mais termodinamicamente estáveis como consequência das

mudanças de temperatura, que é referida como a estabilidade térmica da austenita retida. Após o aquecimento, a austenite pode se transformar em ferrita e carbonetos. Além disso, embora a austenita retida possa permanecer estável em um processo de aquecimento, pode se decompor em martensite durante a extinção posterior. Portanto, a estabilidade térmica da austenita retida é uma questão importante que deve ser considerada no desempenho do material, especialmente se for submetido a processos como soldagem, galvanização por imersão a quente, assadeira de tinta ou ciclo térmico durante o serviço. Compreender os fatores que contribuem para a estabilidade mecânica e térmica da austenita retida é crucial para o projeto e processamento de novos aços [25,26,27].

2.4.4 Decomposição da austenita retida

A decomposição da austenita retida durante o reaquecimento ocorre em duas etapas:

1. A decomposição da austenita a baixas temperaturas está associada a heterogeneidade na concentração de carbono na austenita
2. Quanto menor a velocidade de resfriamento para formação de martensita a altas temperaturas, maior será a fração de austenita se decompõe o que sugere que a recuperação térmica da martensita durante o reaquecimento desestabiliza a austenita ao reduzir a pressão hidrostática que resiste a decomposição da austenita retida.

À medida que a densidade de deslocamento e o conteúdo de carbono da martensite diminuem devido ao temperamento, a força da martensite diminui. A recuperação da tensão residual é mostrada pela desertificação média do núcleo, provavelmente acompanhada por uma reorganização ou aniquilação de luxações geometricamente necessárias. A recuperação aumenta a capacidade da martensita para acomodar a expansão do volume da transformação da austenita com a tensão, resultando em menor estabilidade mecânica da austenita.

O reaquecimento subsequente de espécimes tensos mostra que, durante o primeiro estágio de decomposição, a austenite é desestabilizada a temperaturas mais baixas e ocorre mais transformação do que em condições não tensas. Isto é explicado por um aumento da densidade de deslocamento na austenita

remanescente devido à tensão, que fornece mais sites de nucleação para transformação. Durante o segundo estágio de decomposição, observa-se pequenas diferenças no comportamento de decomposição da austenita entre espécimes tensos e não esticados, o que indica que os fatores que afetam a decomposição de austenite em altas temperaturas são independentes das variações da microestrutura produzidas por estirpe [27,28].

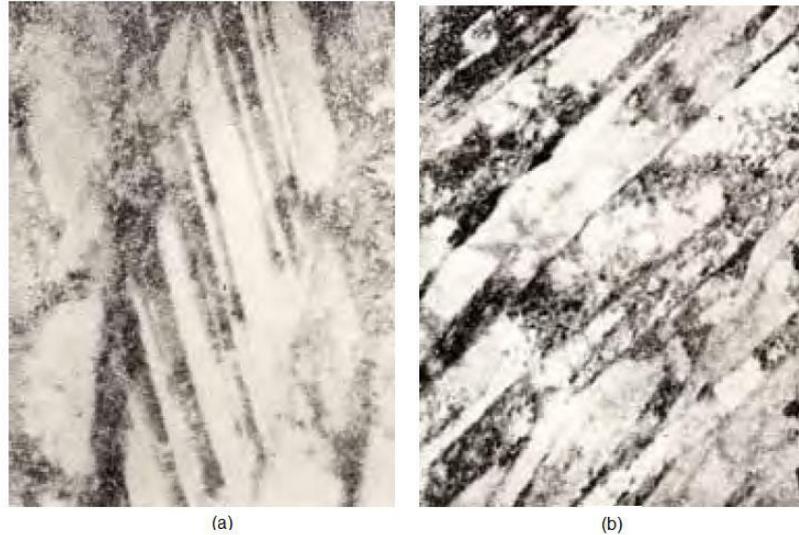
2.4.5 Transformação martensítica

No processo de transformação martensítica ocorre um movimento coordenado e/ou cooperativo entre átomos da fase composta, tal transformação no estado sólido sem processo difusional [29].

A martensita em sua fase ferromagnética além de muito dura e muito resistente pode se transformar em martensita por dois processos. O primeiro por meio de resfriamento brusco do aço a partir do campo austenítico e o segundo através de forças mecânicas com deformações dentro do regime plástico a temperaturas ambientes. Em ambos os casos o processo de formação da martensita envolve deformação polimórfica da estrutura CFC para estrutura tetragonal de corpo centrado, através do deslocamento nanométrico dos átomos em relação aos seus vizinhos. A estrutura martensítica possui alto teor de carbono e possui como característica em sua formação um aumento em seu volume.

Dois tipos de martensita se formam no que diz respeito a sua morfologia: a primeira é na forma de placas (*ripas*), esta formação ocorre preferencialmente em aços com menos de 0,6% de carbono, a segunda na forma de agulhas (*acicular ou lenticular*) com percentuais de carbonos maiores na Figura 8 abaixo está a representação dos dois tipos de martensita [29,30,31].

Figura 8 - Imagem da martensita na forma (a) de ripas e (b) acicular



Fonte: HUMEROTHER, 1968.

2.4.6 Transformação da austenita retida por deformação plástica

A transformação da austenita retida em martensítica em camadas de aços cementados induzida pela deformação, se dá pela sua instabilidade e é necessário esclarecer dois tipos de trabalhos para que ocorra sua transformação, transformação induzida por tensão e transformação induzida por deformação. Uma vez que a transformação martensítica é conseguida pelo movimento cooperativo de cisalhamento dos átomos, é facilmente visto que o trabalho aplicado auxilia a transformação. No entanto, ainda existem algumas questões sobre como o trabalho aplicado auxilia a transformação [32,33].

2.5 PROCESSO DE TRATAMENTO CRIOGÊNICO

2.5.1 Origem do processamento de materiais através de processos Criogênico

Há mais de um século é utilizado o processo de tratamento a temperaturas consideradas criogênicas. A palavra 'Krios' tem sua origem Grega, o que significa frio ou geada, nos meados de 1877, Cailletet e Pictet utilizaram o oxigênio líquido em seus experimentos a baixas temperaturas [34].

Em 1882 Heike Kamerlingh Onnes na Universidade de Leiden na Holanda, construiu o primeiro laboratório criogênico para estudos a baixas temperaturas, tornando-se líder para pesquisas em criogenia por cinco décadas.

Existem inconsistências na definição da temperatura que estabelece o processo criogênico. A sociedade da América define temperaturas criogênicas como temperaturas abaixo de 120K, ou seja, temperaturas (-243,67F ou 153,15°C). O Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST) considera temperaturas criogênicas abaixo de 180°C, isso estabelece como os pontos de ebulição normais de numerosos gases permanentes como (hélio, hidrogênio, nitrogênio e ar normal) enquanto Freon, sulfureto de hidrogênio, etc, possuem ponto de ebulição acima de 180°C [35].

2.5.2 Classificação dos tipos de tratamentos criogênicos

Os processos de tratamentos criogênicos são bastante variados e se diferenciam pela faixa de temperatura, tempo de tratamento e as formas de resfriamento [37,38].

Os processos criogênicos se dividem basicamente em dois tipos:

- 1- Tratamento Subzero: quando a peça ou o material é resfriado a temperaturas de -80°C e conseqüentemente exposto a temperatura ambiente;
- 2- Tratamento Criogênico: quando a temperatura de resfriamento atinge -180°C ou menos Ex: Nitrogênio Líquido a -196 °C;

2.5.3 Tratamento criogênico

O tratamento criogênico é utilizado com a finalidade de melhorar as propriedades mecânicas dos aços ferramentas e aços cementados, aumenta a estabilidade dimensional e microestrutural reduzindo as tensões residuais [39,40,41]. Os fenômenos envolvidos na transformação dependem das temperaturas envolvidas no processo e as propriedades mecânicas estão associadas a diferentes fenômenos:

- A uma transformação quase que total da austenita retida em martensita;
- Precipitados de finos carbonetos;
- Remoção das tensões residuais quando precipitados de carbonetos [39,41].

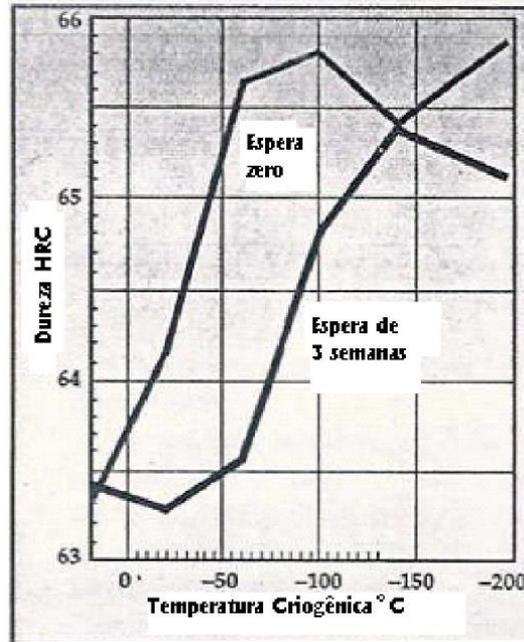
De modo geral no tratamento criogênico, 1h de resfriamento para 2,5cm de secção é o suficiente para se obter a transformação da austenita retida em martensita [39].

2.5.4 Mudanças estruturais no tratamento criogênico

Atualmente existem duas teorias para explicar os efeitos causados pelo processo de tratamento a baixas temperaturas nas propriedades mecânicas dos aços. A primeira se refere às mudanças devido a transformação da austenita retida em martensita. A outra teoria descreve que além da transformação da austenita retida em martensita ocorre mudanças na morfologia da martensita e um aumento na formação e precipitação de carbonetos ultrafinos conhecidos como carbonetos η no processo de revenido provocando mudanças nas propriedades de materiais e componentes. Resfriamento a temperatura de -80°C se mostra eficiente em transformar parcialmente toda a austenita retida em martensita [42].

Estudos demonstram que grandes quantidades de austenita retida são transformadas em martensita a temperaturas entre 0 e -80°C e a temperaturas entre -80 e 196°C somente um percentual muito pequeno da austenita retida transforma se em martensita. Outro fenômeno microestrutural é a estabilização da austenita retida, estudos realizados demonstraram que a dureza atingida em corpos de prova a temperatura de -80°C logo após a tempera foram maiores do que corpos de prova que aguardaram semanas em repouso [44]. A Figura 9 abaixo demonstra o efeito do tempo em função da temperatura na transformação da austenita retida.

Figura 9 - Demonstração do efeito do tempo em temperaturas criogênicas na transformação da austenita retida avaliado pela dureza em um aço AISI D2.



Fonte: Colins, 1998

2.5.5 Efeito do tratamento criogênico nas propriedades mecânicas dos aços

As mudanças microestruturais e as propriedades mecânicas no processo de tratamento criogênico estão diretamente atreladas ao tipo de material, aos parâmetros de tempera e o tempo e temperatura utilizados no processo [44].

Entre as propriedades mecânicas envolvidas no tratamento criogênico influenciadas pelos dois processos estão;

- 1) Devido à transformação da austenita retida;
 - Transformação da austenita retida aumenta a dureza;
 - Melhora a estabilidade dimensional;
 - Reduz a tenacidade;
 - Possível aumento na resistência ao desgaste;

- 2) Formação de precipitados de carbonetos;
 - Aumento na resistência ao desgaste;
 - Aumento na tenacidade;
 - Pouco aumento ou nenhum efeito na dureza [44];

2.6 SHOT PENEING

2.6.1 Breves considerações

Shot peening é um tratamento superficial de trabalho a frio amplamente utilizado para produzir uma camada de tensões residuais compressivas, com a finalidade de mudar as propriedades mecânicas na superfície dos metais. Tal processo se diferencia do processo de jateamento convencional por não ter o objetivo de limpeza e remoção de materiais da superfície de peças e componentes, mas sim, para melhorar as características da superfície, tais como dureza, resistência ao desgaste e a fadiga de componentes metálicos, tal processo está ilustrado na Figura 10 [47].

Figura 10 - Ilustração de duas engrenagens passando pelo processo de shot peening

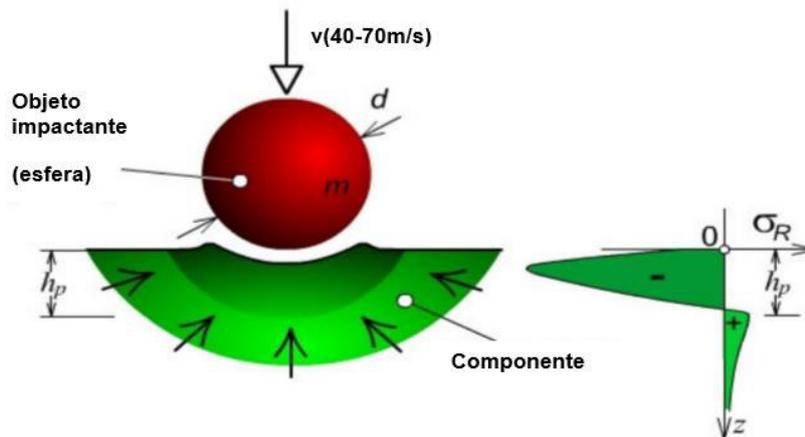


Fonte: OSK- Kiefer GmbH

O Shot Peening é muito utilizado para melhorar a vida a fadiga, mas investigações realizadas em uma grande variedade de materiais apontam que tal processo também pode reduzir, atrasar ou evitar outros tipos de problemas como fretting, corrosão por fadiga e fragilização por hidrogênio, há também alguns estudos que relatam o efeito positivo do shot peening sobre o comportamento de materiais cerâmicos [45].

Seu princípio de funcionamento consiste em um jateamento de microesferas ou granalhas em alta velocidade contra a superfície de peças, componentes de máquinas ou elementos estruturais, o impacto das microesferas ou granalhas promovem uma deformação na superfície do material causando uma camada com tensões residuais de compressão. Cada particular atua como se fosse um pequeno martelo provocando deformação plástica na superfície da peça. Porém, camadas internas mais profundas abaixo da superfície deformada plasticamente, encontram-se dentro de um regime elástico não conseguindo retornar a sua geometria original, permanecendo, como consequência, com deformação elástica remanescente. É desta maneira que se originam as tensões residuais de compressão como resultado da interação entre estas duas camadas, superficial e interna, Figura 11 [47]

Figura 11 - Curva característica de tensões residuais produzidas por shot peening



Fonte: CARDOZO, 2008

2.6.2 Parâmetros de controle para realização de Shot Peening

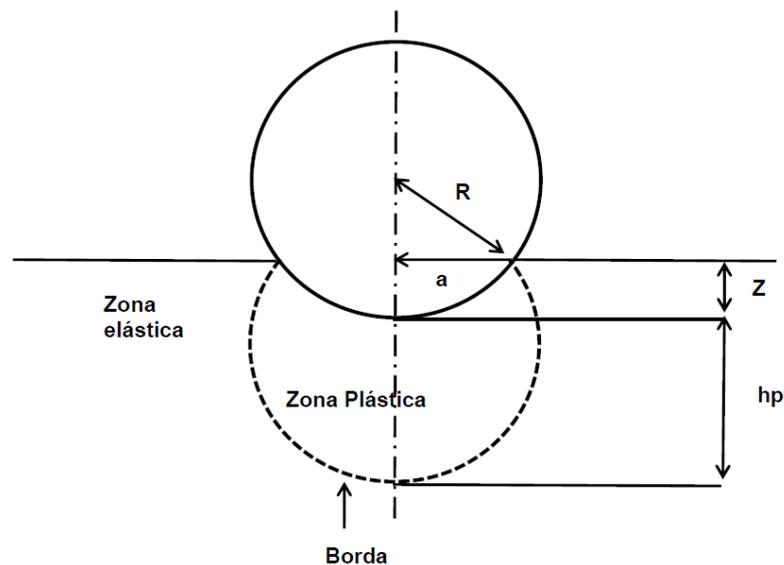
Para determinarmos e conhecermos o campo de tensões é predominante conhecermos os materiais e equipamentos envolvidos no processo. A intensidade do jateamento está diretamente relacionada à capacidade de transferência de energia no ponto de impacto juntamente com o tempo de exposição.

Para obtenção das características e propriedades mecânicas desejadas como rugosidade da superfície, dureza da superfície e tensões residuais e taxas de deformação envolvidas no processo é importante determinarmos as variáveis

envolvidas como a pressão do ar, diâmetro das microesferas, taxa de alimentação, tempo de processo e distância do bico até a superfície que será tratada. Outras variáveis com geometria da peça e ângulo de impacto são de extrema relevância no processo, por definição é de 90° , quanto menor for o ângulo de colisão da esfera com a superfície da peça menor será a intensidade do shot peening, devendo ser compensado variando a intensidade tamanho da microesfera ou alterando outras variáveis para que se possa obter as deformações adequadas [46,47].

Distância do bico até a peça, quanto maior menor será a intensidade e a cobertura sobre a superfície da peça [47].

Figura 12 - Ilustração esquemática deformações causadas por uma esfera contra a superfície de uma peça

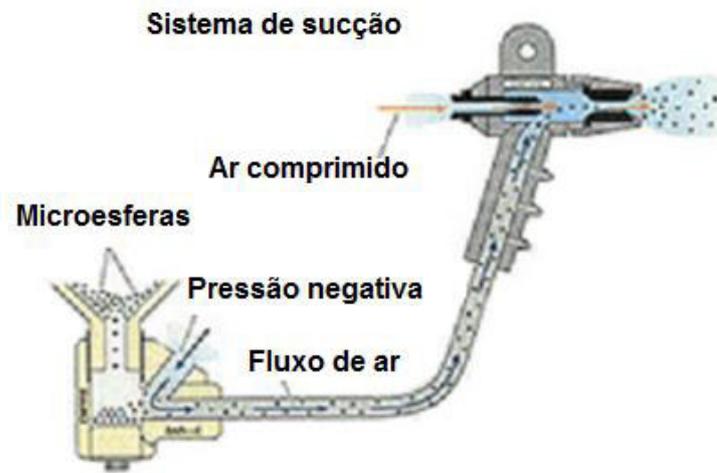


Fonte: KOBAYASHY, 1998.

2.6.3 Métodos de shot Peening

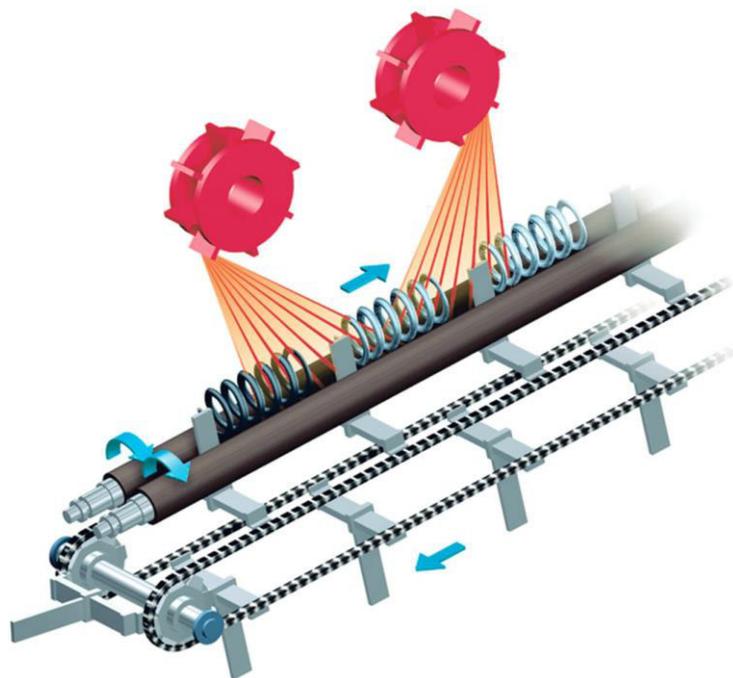
Existem dois métodos convencionais de shot peening. O primeiro método envolve a aceleração de partículas de materiais com ar comprimido, em um fluxo de ar de alta velocidade podendo atingir até 250 pés/s. O segundo método envolve a aceleração de partículas por meio de uma turbina rotativa centrífuga conforme figuras 13 e 14.

Figura 13 - Sistema de shot peening por ar comprimido por sucção



Fonte: MEC MEX

Figura 14 - Sistema de shot peening por rotor centrifugo



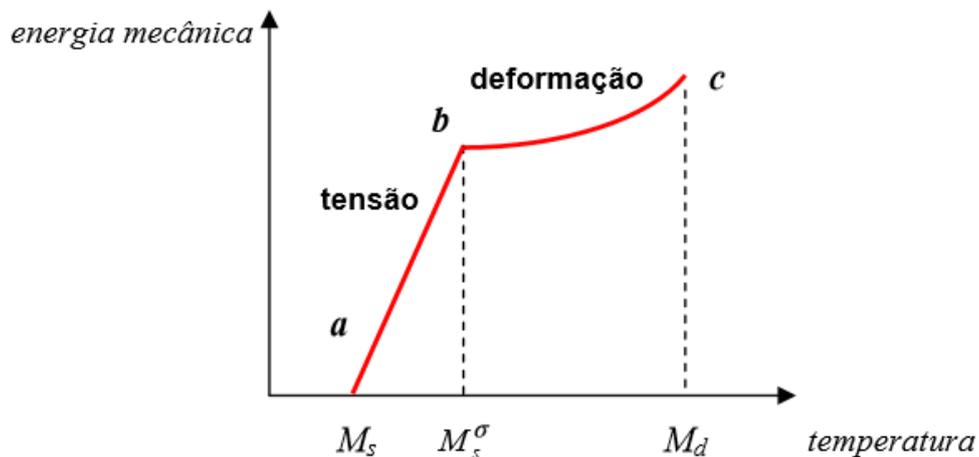
Fonte: Wheelabrator

2.6.4 Transformação da austenita retida por shot peening

Nos processos de tratamento térmico aplicado como tempera entre outros, a transformação da austenita não é completa, permanecendo uma fração de austenita retida metaestável a temperatura ambiente de forma não desejada, sua transformação para martensita pode ser estimada pela temperatura na qual ela pode ser transformada, tanto por resfriamento quanto por deformações oriundas de solicitações mecânicas [48,49].

No processo de shot peening as colisões das microesferas com a superfície da peça proporcionam energia mecânica suficiente para que ocorra a transformação da austenita retida em martensita, dependendo da intensidade da carga aplicada esta transformação poderá ocorrer por deformação elástica (martensita de tensão) e deformação plástica (martensita de deformação). Na Figura 15 está a representação gráfica da energia mecânica em função da temperatura para transformação da austenita retida em martensita [50].

Figura 15 - Representação gráfica da energia mecânica em função da temperatura e as regiões onde podem ocorrer a transformação da austenita retida em martensita



Fonte: Adaptado de Perlade et al, 2003.

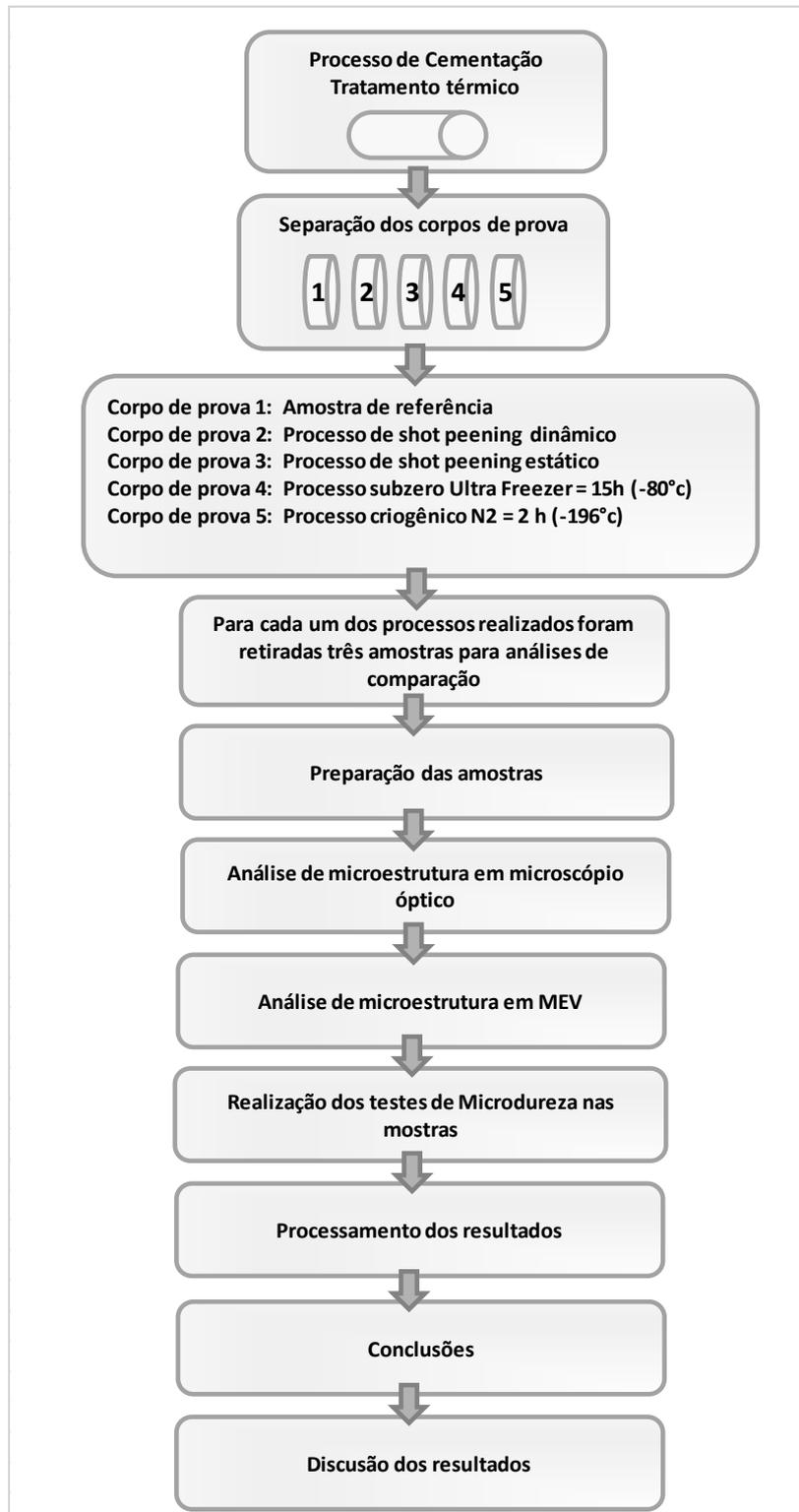
A presença de elementos de liga, principalmente o carbono auxiliam na estabilização da austenita, dificultando sua transformação para martensita, que diminui a temperatura M_i a temperaturas abaixo da temperatura ambiente.

A martensita de tensão mostrada no gráfico acima, só pode ser transformar entre os pontos *a* e *b*, enquanto a martensita de deformação transformasse entre os pontos *b* e *c*, já nenhuma transformação ocorre acima do ponto M_d [50].

3 Materiais e Métodos

Na figura 16 pode ser visualizado fluxo das etapas a serem realizadas.

Figura 16 - Organograma das etapas de desenvolvimento do trabalho



3.1 MATERIAL UTILIZADO

O material utilizado foi o aço DIN 20MnCr5 que devido sua composição química é classificado como aços para cementação e ou carbonitreção e possuem média temperabilidade de núcleo. Na Figura 17 pode ser visualizada amostra do material estudado.

Figura 17 - Material cementado a partir do qual foram retirados os corpos de prova.



3.2 CEMENTAÇÃO

O material utilizado foi cementado em atmosfera a base de Metanol e Propano por 12 horas de cementação com potencial de carbono 1,2%, temperatura de 925°. Atmosfera obtida a partir da utilização dos gases Propano e Metanol.

3.3 TRATAMENTO TÉRMICO

Foi realizada têmpera direta em óleo acelerado Houghto KB (110°C/s), em seguida foi realizado processo de revenimento a temperatura de 180°C.

3.4 CORPOS DE PROVA

O material após a cementação e o tratamento térmico foi seccionado em cinco corpos de prova, para esta operação foi utilizado corte por abrasão a úmido e durante o processo de operação teve-se o cuidado para não modificar a estrutura

dos materiais e a sequência de operações posteriores. Os corpos de prova ficaram divididos em cinco;

1º corpo de prova: utilizado como referência;

2º corpo de prova: utilizada no processo de shot peening dinâmico;

3º corpo de prova: utilizada no processo de shot peening estático;

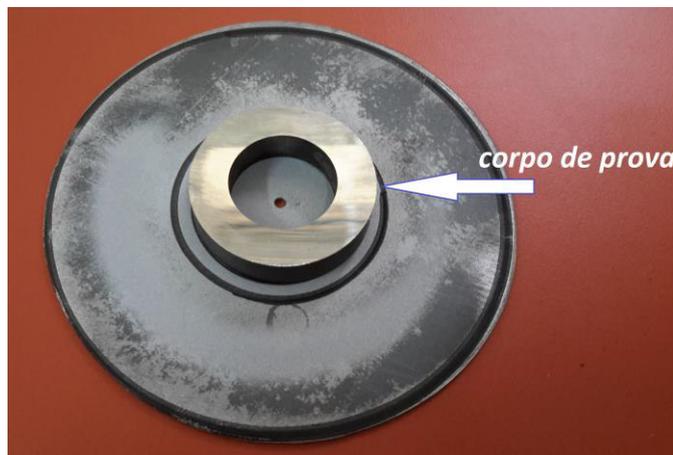
4º corpo de prova: utilizada no tratamento subzero em Ultra freezer por 15 horas.

5º corpo de prova: utilizada no tratamento criogênico em Nitrogênio líquido por 2 horas;

Após a realização de cada um dos processos em cada um dos cinco corpos de prova, foram retiradas três amostras para análise microestrutural e microdureza.

Na Figura 18 abaixo, está a foto de um dos corpos de prova no suporte de fixação para realização do shot peening.

Figura 18 - Corpo de prova no suporte



3.5 PROCESSO DE SHOT PEENING (EQUIPAMENTO)

O equipamento utilizado para realização do shot peening foi desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande-FURG com as seguintes características;

- Gabinete com as seguintes dimensões: 92cm largura, 52cm altura e 62cm de profundidade interna com revestimento interno em aço inoxidável perfeita vedação portas com vidro duplos e sistema de exaustão a filtragem;

- Pistola MTX para jateamento com de areia ou microesferas por sucção com bico de 6,2mm Figura 19 e 20;
- Reservatório em vidro com capacidade de 5 litros;
- Compressor de ar da Marca Schulz;
- Pressão de trabalho 130psi;
- Microesfera da Ziretc impacto C, em anexo;
- Porta amostra com movimento rotativo ou estático.

Figura 19 - Bico utilizado no Shot Peening



Figura 20 - Pistola utilizado no shot peening



Na figura 21 abaixo, está a imagem do equipamento montado que foi realizado os processos de shot peening.

Figura 21 - Equipamento utilizado para realização do shot peening



3.5.1 Realização do shot peening dinâmico

Para realização do shot peening dinâmico foram utilizados os seguintes parâmetros de controle:

- **Tipo de microesfera:** microesfera de vidro impactado C da (Zirtec) peneira 150-250.
- **Vazão de operação:** 0,29L/min.
- **Distância do bico ao material:** 2,5mm
- **Tempo de shot peening:** 17min
- **Rotação utilizada:** 6 rpm

A figura 22 abaixo está uma foto retirada do corpo de prova no porta amostra para realização do shot peening dinâmico.

Figura 22 - Realização do shot peening dinâmico



3.5.2 Realização do shot peening estático

Para realização do shot peening dinâmico foram utilizados os seguintes parâmetros de controle:

- **Tipo de microesfera:** microesfera de vidro impactado C da (Zirtec) peneira 150-250.
- **Vazão de operação:** 0,29L/min.
- **Distância do bico ao material:** 2,5mm
- **Tempo de shot peening:** 17min

Na Figura 23 abaixo, está uma imagem do sistema montado para a realização do shot peening estático.

Figura 23 - Shot peening estático



3.6 TRATAMENTO CRIOGÊNICO

3.6.1 Tratamento criogênico em Ultra Freezer

Para realização do tratamento subzero foi utilizado um ultrafreezer vertical com faixa de temperatura de -50°C a -86°C , capacidade de 333L, paredes com camadas finas de espuma de poliuretano com um isolamento à vácuo, interior e exterior construídos em aço galvanizado com zinco acabado com acrílico resistente à corrosão, sistema de alarmes sonoros e visuais, modelo mdf - u33v, série 10080220, marca Sanyo no Instituto de Ciências Biológica (ICB) da Universidade Federal do Rio Grande-Furg. As amostras sofreram tratamento pelo período de quinze horas a uma temperatura de -80°C . Na Figura 24, esta foto retirada do equipamento utilizado no tratamento Subzero.

Figura 24 - Ultrafreezer utilizado no tratamento criogênico



3.6.2 Tratamento criogênico em Nitrogênio Líquido

Os tratamentos em Nitrogênio líquidos agregam maior resistência ao desgaste em aços cementados e tratados termicamente, tais características são possíveis devido à transformação da austenita retida para martensita, para o tratamento de criogênico os corpos de prova foram submersos em um tanque de Nitrogênio Líquido com capacidade para 20 Litros por um tempo de duas horas como mostrado nas Figuras 25,26.

Figura 25 - Tanque de nitrogênio líquido onde foram colocadas as amostras



Figura 26 - Amostra sendo retirada do tanque de nitrogênio líquido



3.7 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

3.7.1 Embutimento;

O embutimento foi realizado para facilitar o processo de preparação evitando danificação da lixa do pano de polimento e abaloamento da superfície da amostra. Foi utilizado embutimento a quente em material baquelite na cor preta com pressão de 125 a 150 Kgf/mm² por meio de prensa. A Figura 27 abaixo, está a ilustração do material utilizado no embutimento.

Figura 27 - Ilustração do equipamento utilizado no embutimento



3.7.2 Lixamento;

A operação de lixamento foi utilizada lixas 220, 420, 600, e 1200 a fim de eliminar riscos e marcas e está ilustrada na Figura 28 abaixo.

Figura 28 - Equipamento utilizado no lixamento



3.7.3 Polimento;

O polimento foi realizado com auxílio de uma politriz e o agente foi alumina e estão representados na Figura 29 abaixo.

Figura 29 – Politriz



3.7.4 Ataque químico

No ataque químico foi utilizado Nital.

3.8 ANÁLISE DE MICROESTRUTURA E DO PERCENTUAL DE AUSTENITA RETIDA EM MICROSCÓPIO ÓPTICO

Para determinação dos percentuais de austenita retida, foram utilizadas imagens da microestrutura das amostras através do programa Phase Analysis utilizando MICROSCÓPIO DE METALOGRAFIA, MODELO GX51F, SÉRIE 0F68306, MARCA OLYMPUS.

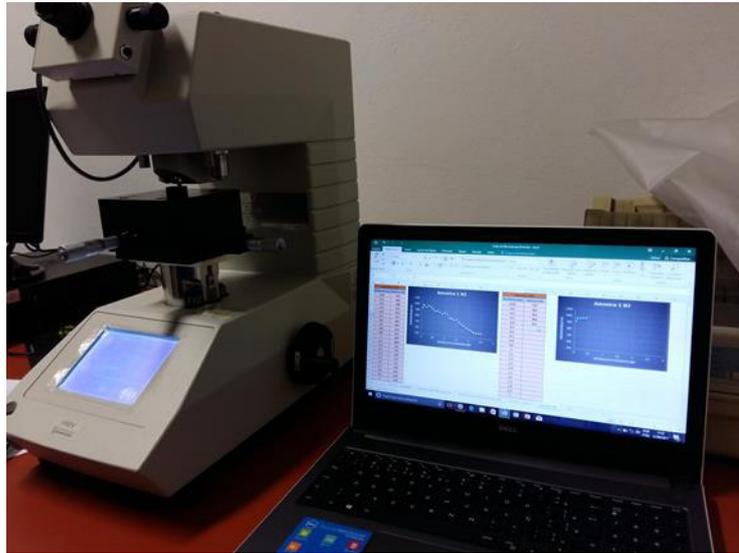
3.9 ANÁLISE DE MICROESTRUTURA EM MEV

Foram analisadas três amostras de cada processo, sendo efetuadas imagens de microestrutura e EDS.

3.10 TESTES DE MICRODUREZA

As amostras de cada processo inclusive as mantidas como referência foram submetidas a testes de microdureza no laboratório da escola de engenharia. Os testes foram realizados em microdurômetro, cor gelo, 220 v, modelo hwt-2t, série I63034901552, marca shimadzu, demonstrado na Figura 30 abaixo.

Figura 30 - Imagem do microdurômetro utilizado nos testes



Para realização dos testes de microdureza foi utilizada uma carga de 300g pelo período de 10 segundos e os intervalos utilizados foram de 0,05 da superfície cementada e posteriormente de 0,1 até 2,5mm de profundidade da superfície cementada.

4 Resultados e Discussões

4.1 ANÁLISE QUÍMICA

Na tabela 3 pode ser verificada a composição química do aço utilizado neste trabalho.

Tabela 3 - Composição química das amostras analisadas

Amostra	%C	%Mn	%S	%P	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	%V
1	0,22	1,11	0,024	0,008	0,24	1,02	0,1	0,03	-
2	0,21	1,13	0,025	0,008	0,24	1.03	0,1	0,04	-

Os resultados demonstraram que o aço utilizado foi o aço Din20mncr5.

4.2 DETERMINAÇÃO DAS FASES E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL APÓS CEMENTAÇÃO E TRATAMENTO TÉRMICO EM EDS

Figura 31 - Imagem em EDS da seleção das fases presentes na superfície cementada

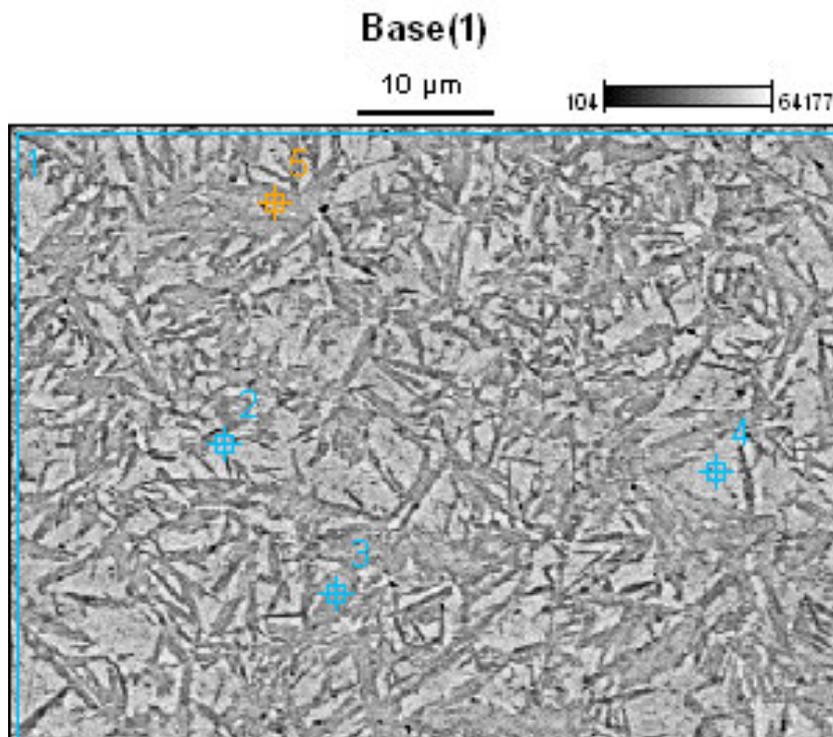


Tabela 4 - Espectro com a composição química das fases presentes na região cimentada no ponto 1

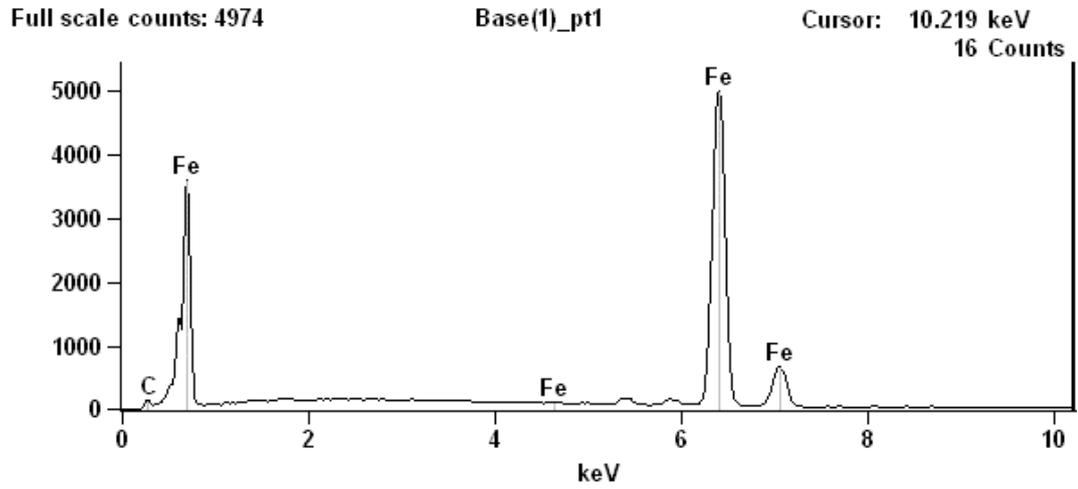


Tabela 5 - Espectro com a composição química das fases presentes na região cimentada no ponto 2

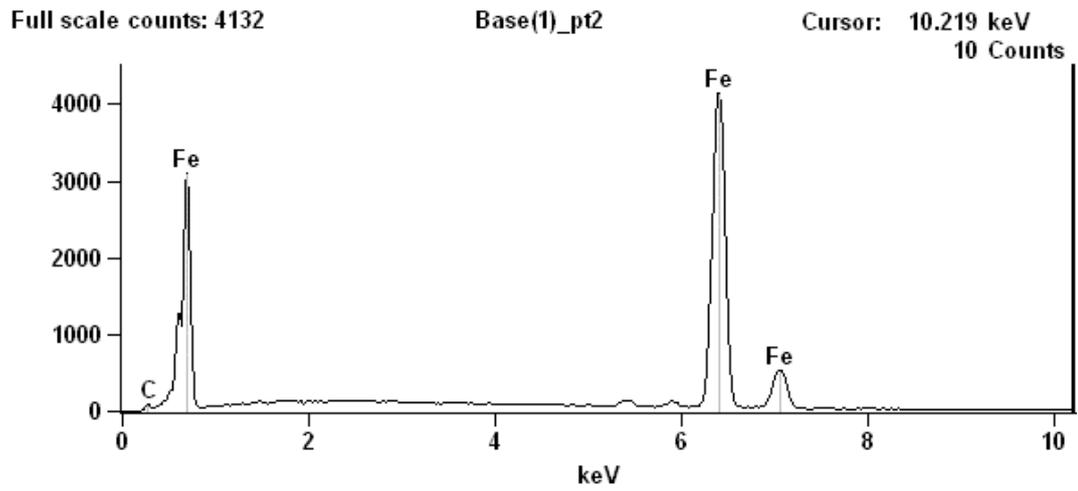


Tabela 6 - Espectro com a composição química das fases presentes na região cementada no ponto 3

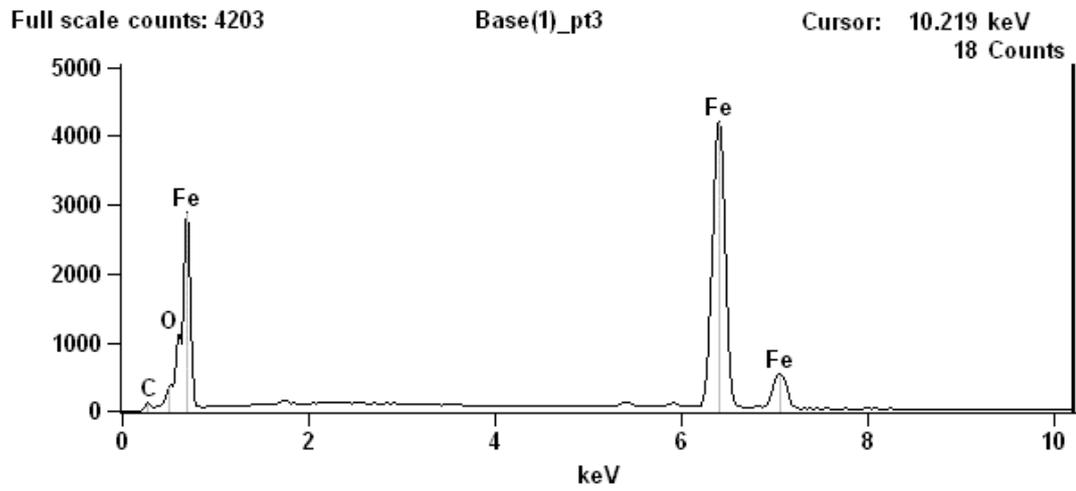


Tabela 7 - Espectro com a composição química das fases presentes na região cementada no ponto 4

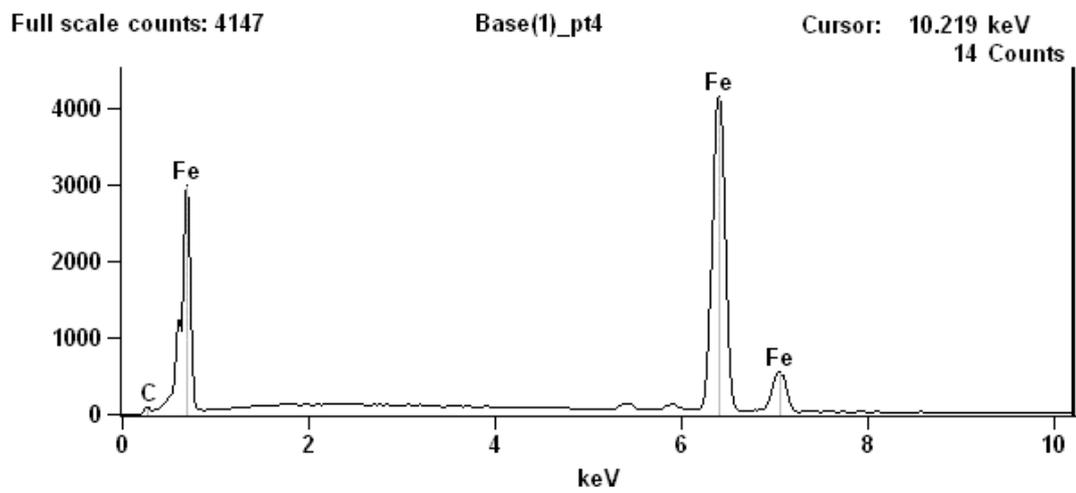
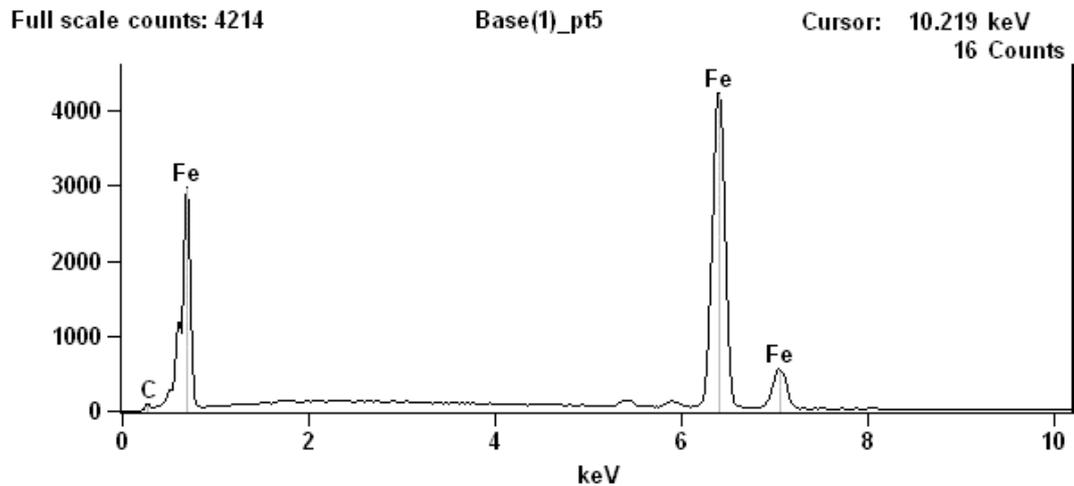


Tabela 8 - Espectro com a composição química das fases presentes na região cementada no ponto 5



4.3 ANÁLISE DE MICROESTRURA DAS AMOSTRAS APÓS O SHOT PEENING DINÂMICO, ESTÁTICO, TRATAMENTO EM ULTRAFREEZER E NITROGÊNIO LÍQUIDO.

A seguir estão os resultados obtidos através da análise de imagens em microscopia óptica e Mev das microestruturas e os resultados das possíveis transformações da austenita retida em martensita que ocorreram nos processos envolvidos no trabalho.

4.3.1 Resultados de análise microestrutural das amostras após cementação e tratamento térmico

As amostras de aços DIN 20MnCr5 apresentaram percentual médio de 32,32% de austenita retida. Na Figura 32 e 33, pode ser visualizada a microestrutura da camada cementada em microscópio óptico e Mev, constituída por martensita e austenita retida. Na Figura 34 pode ser visualizado imagens do programa utilizado para análise da fase austenítica e determinação do percentual da austenita retida. A presença de austenita retida tem forte influência do potencial de carbono e da presença de elementos de liga [23,27]. A austenita retida pode ser fator deletério aos componentes devido ao fato do mesmo poder transforma-se em Martensita não

revenida por processo mecânico ou criogênico. Se não for posteriormente revenida poderá fragilizar o material [23,27].

Figura 32 - Amostra obtida em microscópio óptico

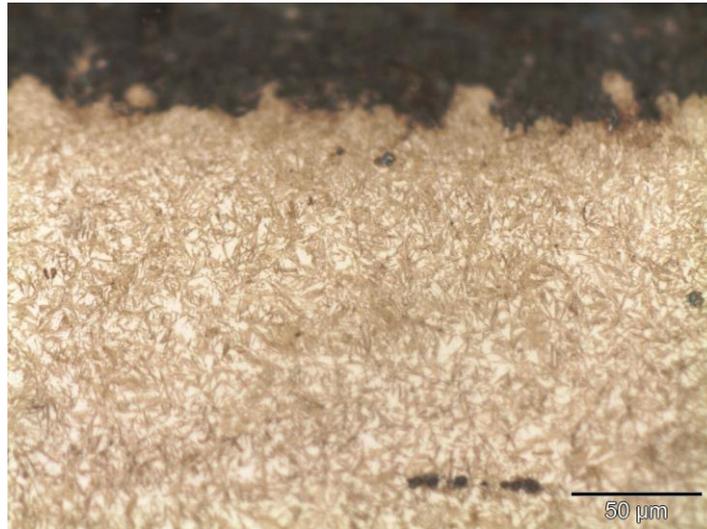


Figura 33 - Imagem obtida no MEV 2000x

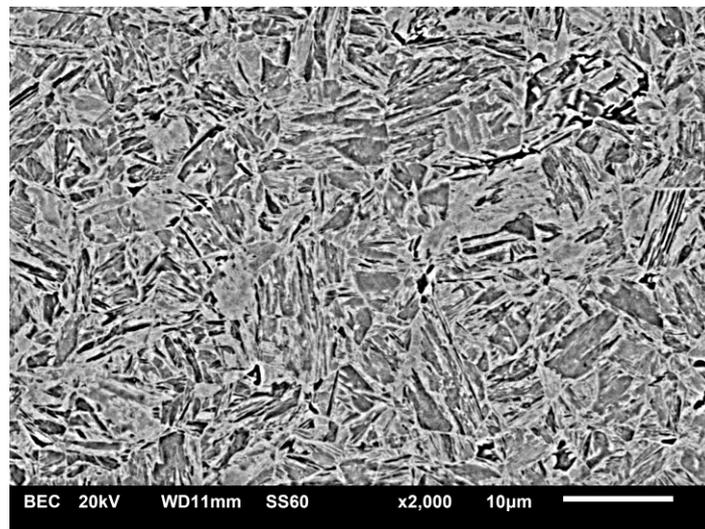
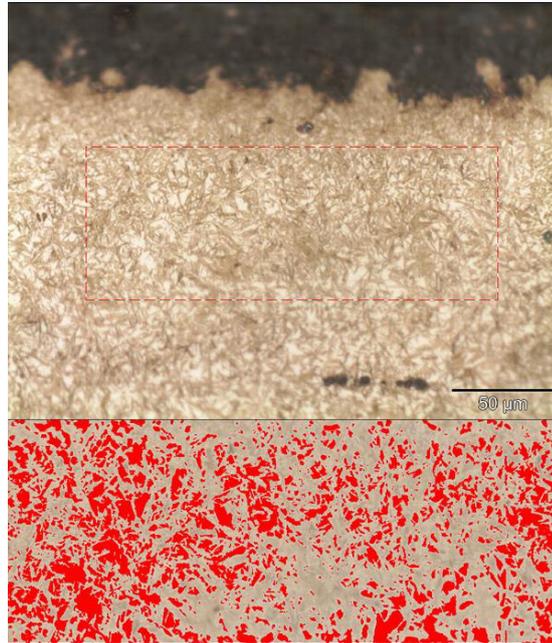


Figura 34 - Imagem da região selecionada de uma das amostras para definir o percentual de austenita retida



4.3.2 Análise microestrutural e resultados para o processo de Shot peening dinâmico

O percentual de austenita retida na superfície da camada cementada após o processo de shot peening em sistema rotativo (dinâmico) sofreu uma redução de 32,32% para 22,1%, as imagens estão representadas nas Figuras 35, 36 abaixo.

Figura 35 - Imagem de uma das amostras obtidas em microscópio óptico

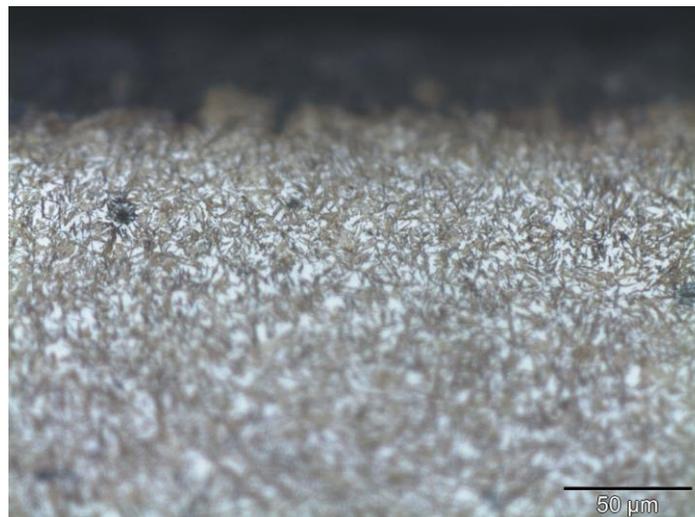
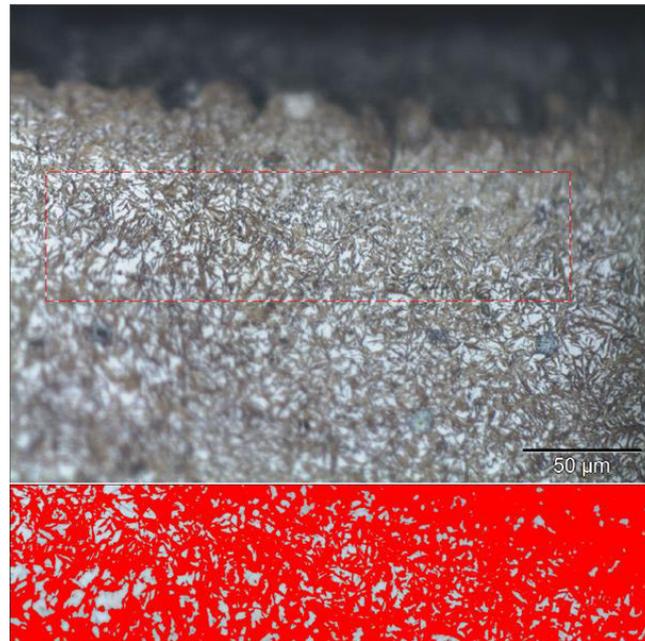


Figura 36 - Imagem tira através de microscopia óptica



4.3.3 Análise microestrutural e resultados para o processo de shot peening estático

Os resultados obtidos no processo de shot peening estático mostraram que a transformação da austenita retida em martensita ocorreu quase que total, em uma região bem superficial, com profundidade de 46,18 μm na camada cementada, decorrente da intensidade de deformação aplicada no processo. As Figuras 37, 38 e 39 abaixo, estão imagens tiradas em microscópio óptico e Mev, bem como a espessura da camada afetada no processo.

Os percentuais de austenita retida no processo de shot peening estático foram reduzidos de 32,32% para 6,04% conforme imagem da Figura 40.

Figura 37 - Imagem obtida em microscópio óptico da superfície onde ocorreu a transformação

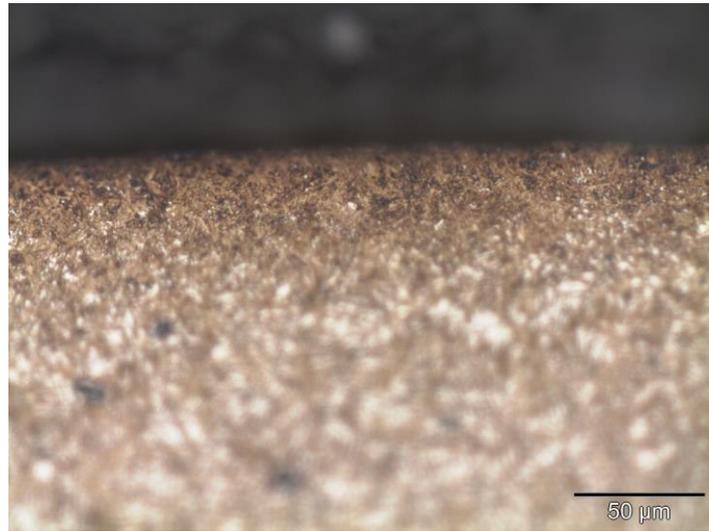


Figura 38 - Espessura da camada que ocorreu a transformação

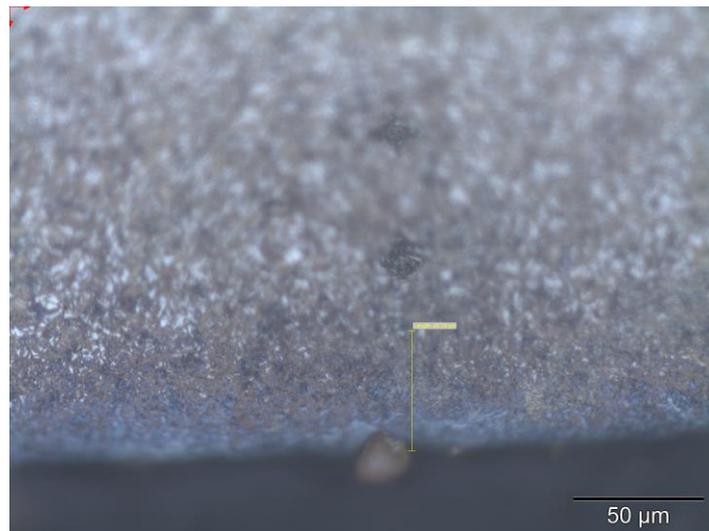


Figura 39 - Imagem obtida em MEV da superfície onde ocorreu a transformação

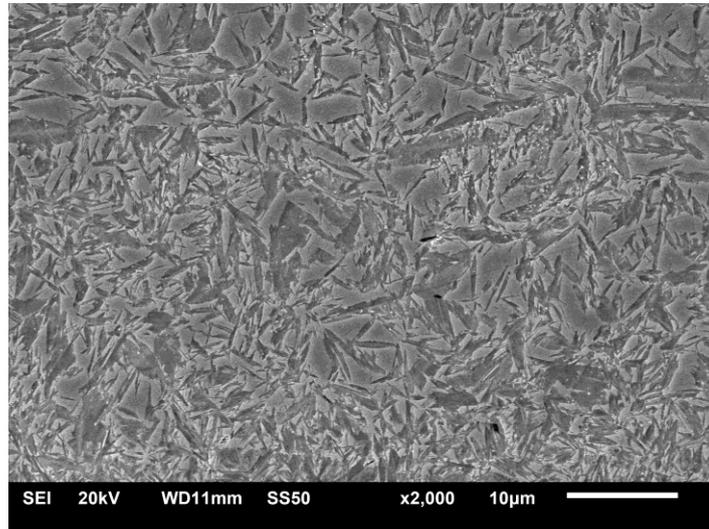
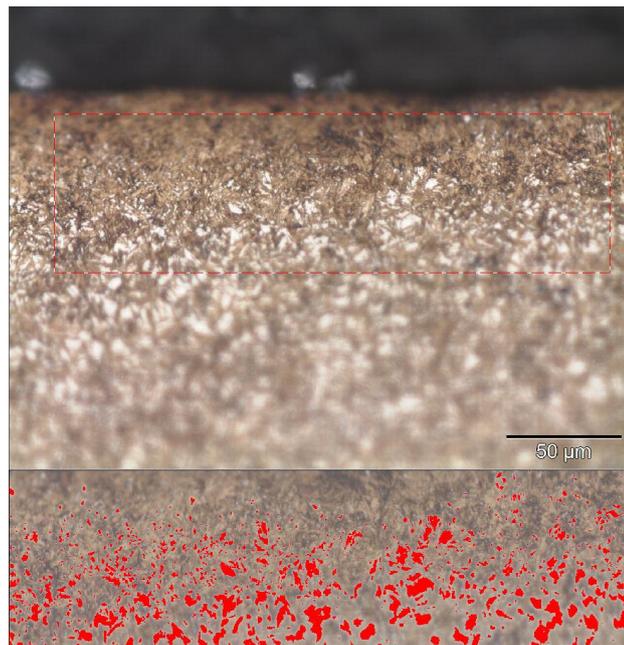


Figura 40 - Imagem retirada de análise óptica para determinação do percentual de austenita retida



4.3.4 Análise microestrutural e resultados para o processo de tratamento subzero em ultrafreezer.

Os resultados de transformação da austenita retida obtidos a -80°C por quinze horas apresentaram uma redução na austenita retida de 32,32% para 5,17%, conforme imagens apresentadas nas Figuras 41, 42 e 43 abaixo.

Figura 41 - Imagem obtida em microscópio óptico da superfície cementada

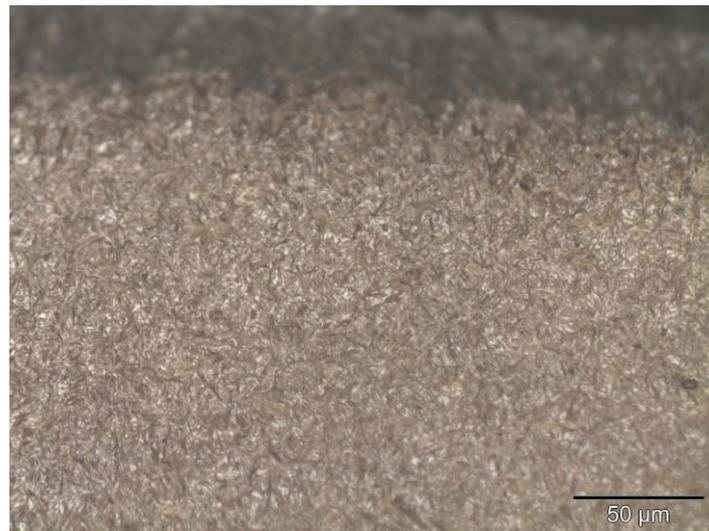


Figura 42 - Imagem obtida no MEV com ampliação de 2000x

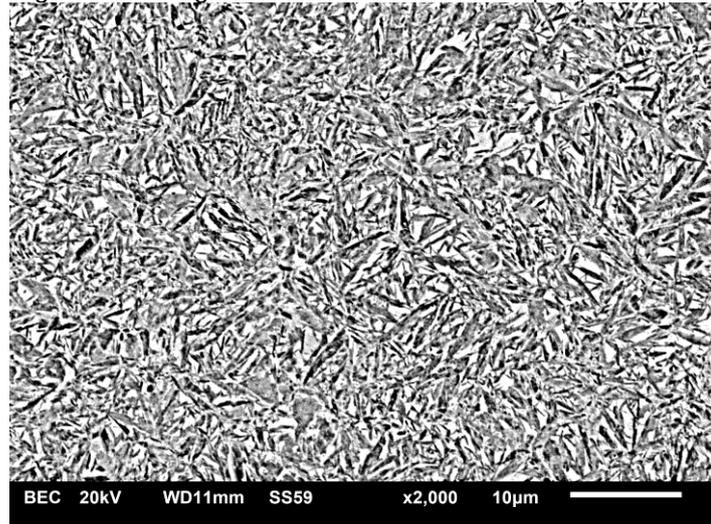
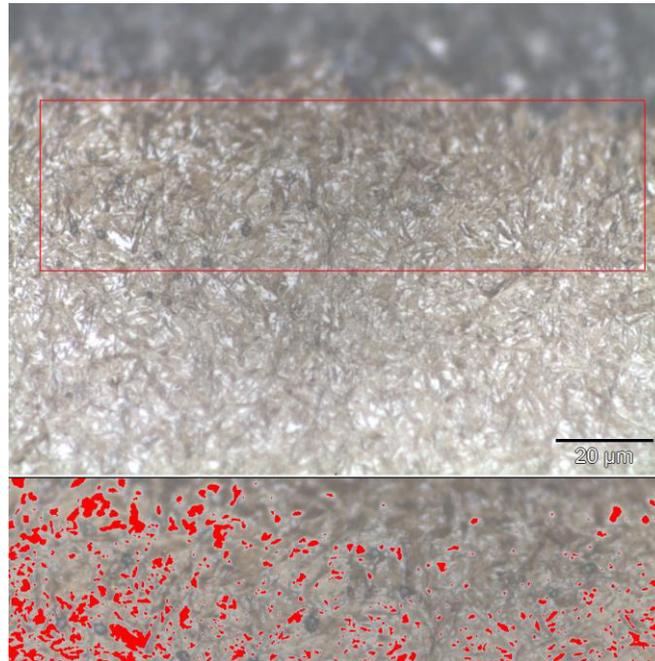


Figura 43 - Imagem retirada de análise óptica para determinação do percentual de austenita retida



4.3.5 Análise microestrutural e resultados obtidos em tratamento criogênico em Nitrogênio Líquido

Os resultados por análise de imagem óptica demonstraram que o percentual de austenita retida após o tratamento em Nitrogênio Líquido reduzindo o percentual de austenita retida das amostras para 2,7%. Nas Figuras 44 e 45 estão imagens da microestrutura obtidas em microscópio óptico e MEV e na Figura 46 imagens extraídas da microestrutura com as fases selecionadas.

Figura 44 - Imagem obtida em microscópio óptico

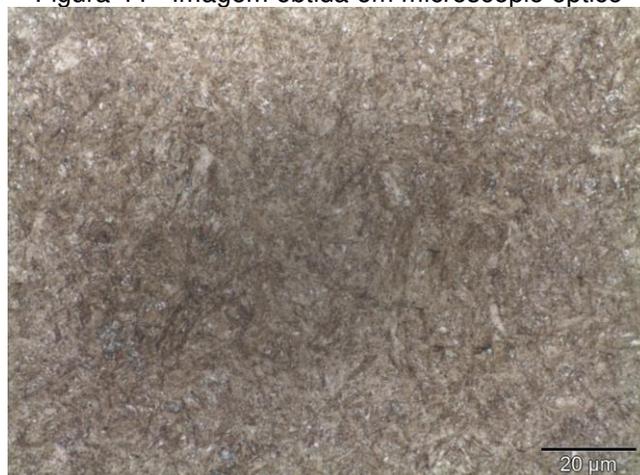


Figura 45 - Imagem obtida em MEV

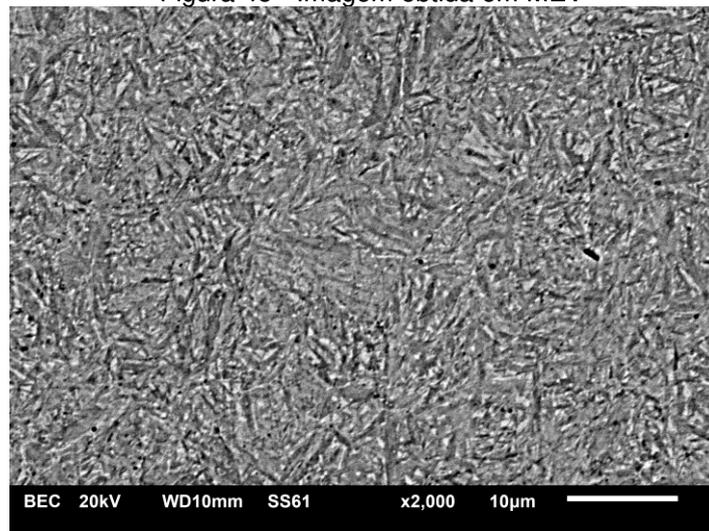
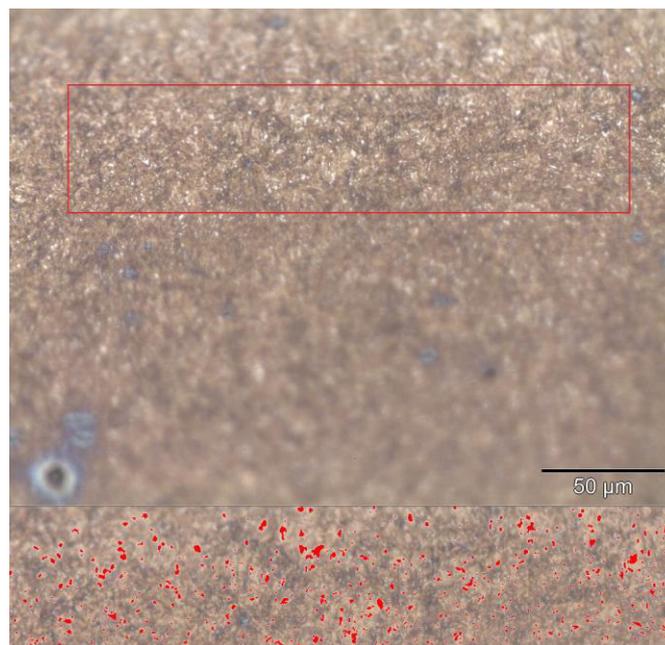


Figura 46 - Imagem da região selecionada e Imagem ampliada da seleção da fase austenítica



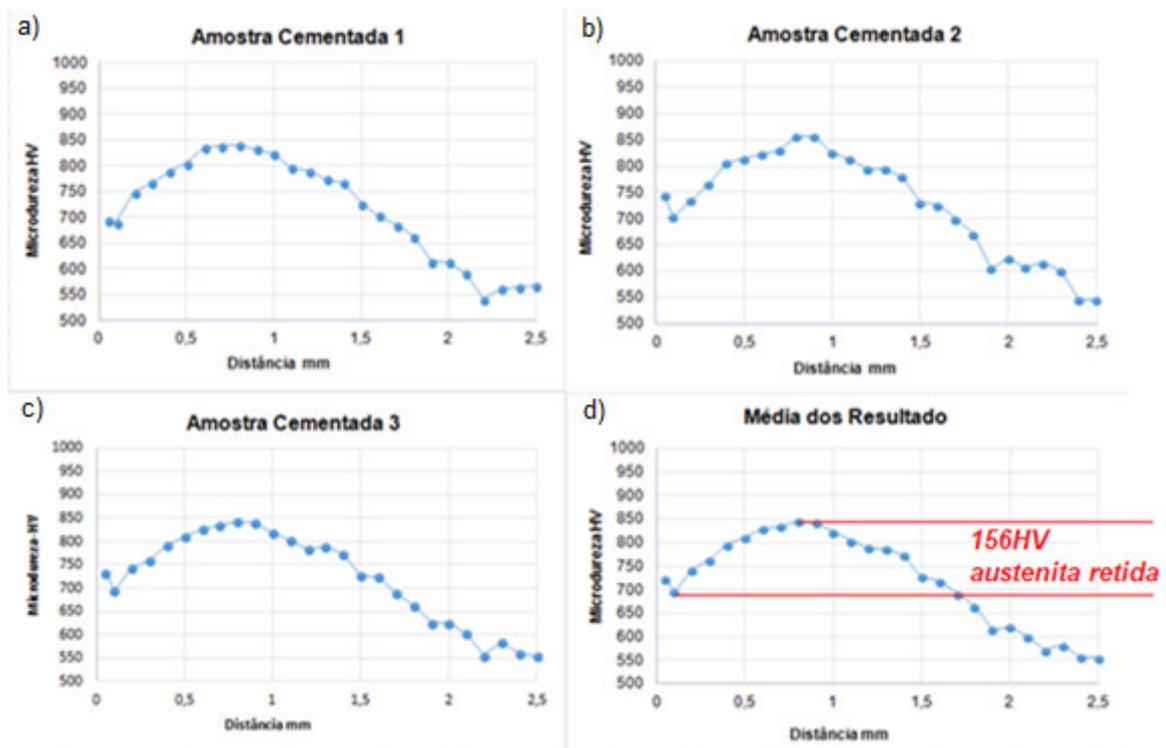
4.4 TESTES DE MICRODUREZA

Os resultados dos testes de microdureza estão representados na sequência a seguir.

4.4.1 Aços DIN 20MnCr5 cementado e tratado termicamente

Na Figura 47 abaixo, estão os resultados dos testes de microdureza das amostras após a cementação, tempera e revenimento.

Figura 47 - Representação gráfica dos resultados das amostras cementadas e tratadas termicamente



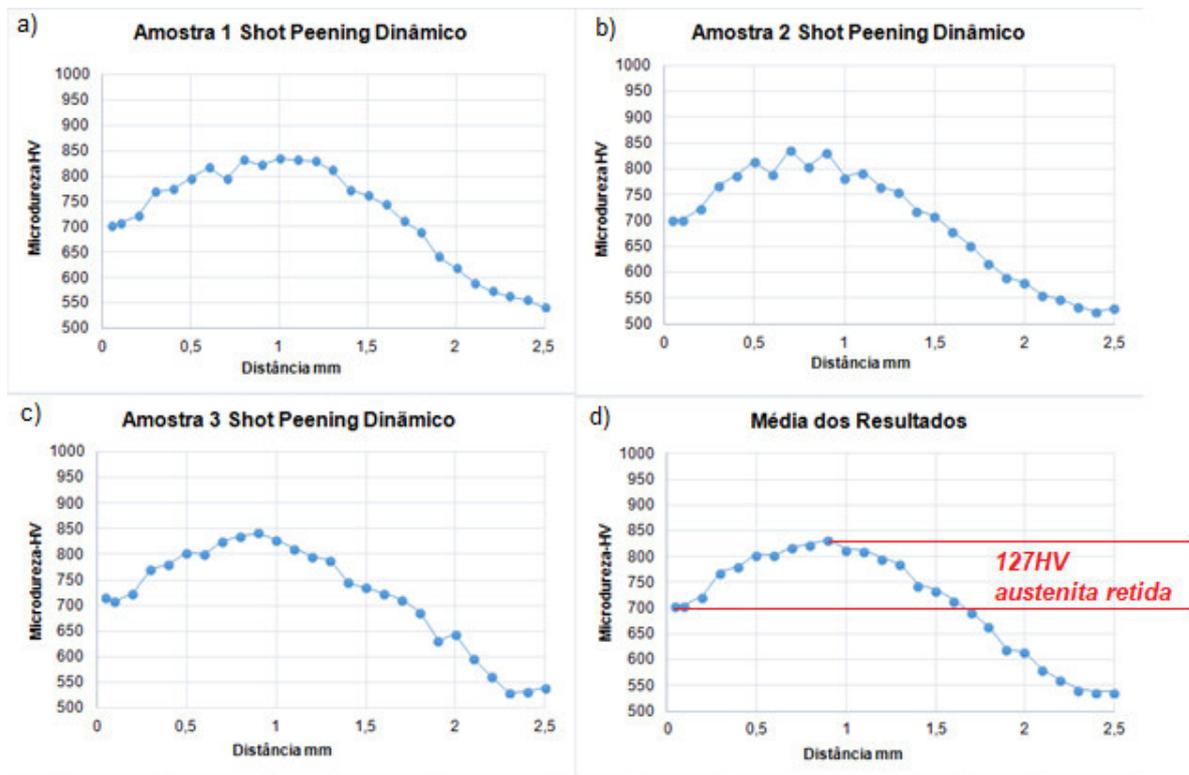
Os resultados obtidos através de gráficos demonstram que a resultados de microdureza começam de forma crescente até atingirem seu resultado máximo até uma profundidade média de 0,8mm e 846HV, essa diminuição da dureza da superfície, se dá, devido a estabilidade da austenita com o aumento dos teores de carbono devido a cementação, o carbono em solução sólida contribui aumentando a resistência ao cisalhamento da austenita, desse modo, quantidades apreciáveis de

austenita não se transformaram, estando presentes entre as ripas de martensita a temperatura ambiente conforme está ilustrado nas linhas vermelhas do gráfico da média dos valores.

4.4.2 Resultados de microdureza para o processo de Shot Peening Dinâmico

Na Figura 48 abaixo, estão os resultados dos testes de microdureza das amostras submetidas ao processo de Shot Peening Dinâmico.

Figura 48 - Representação gráfica dos resultados das amostras do processo de shot peening dinâmico

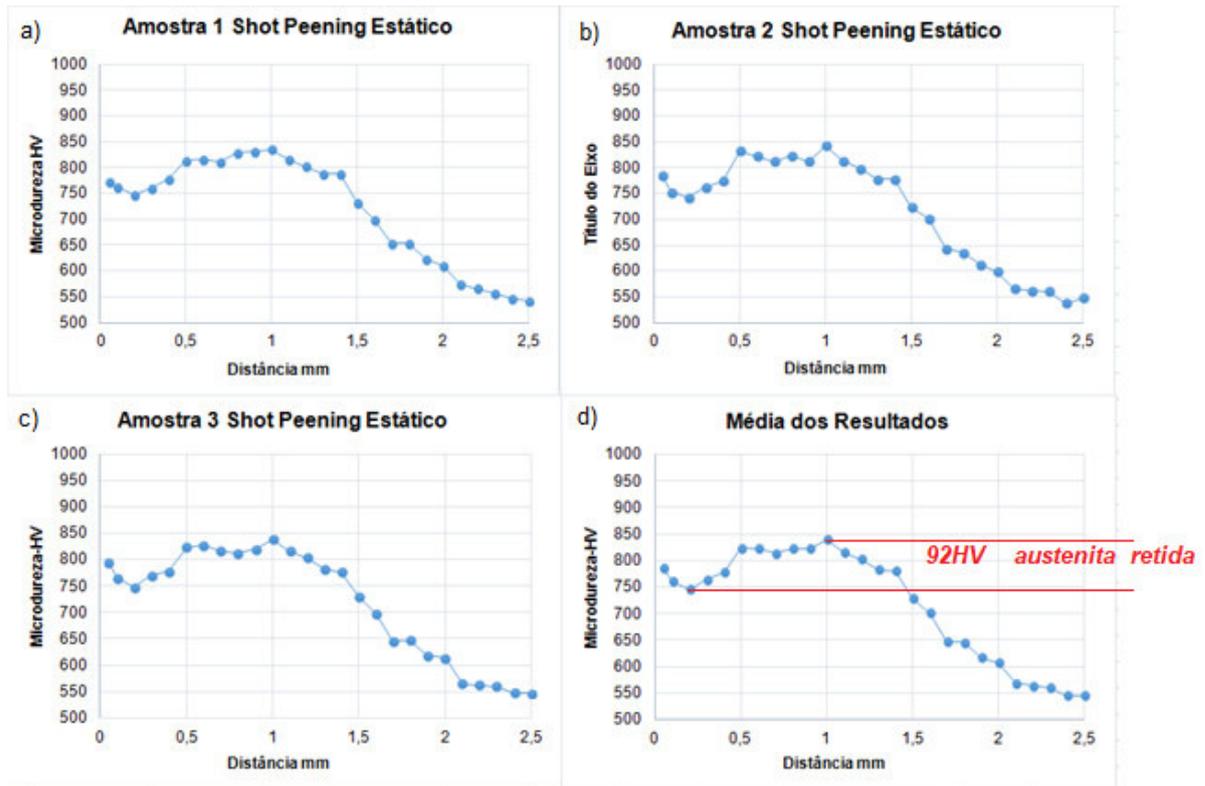


Como pode ser observado nos gráficos houve uma diminuição no percentual de austenita retida, comparado com as amostras de referência, devido um decréscimo, na amplitude nos resultados de microdureza da superfície ao ponto máximo, tais resultados também conferem com os resultados de imagem realizados anteriormente.

4.4.3 Resultados de microdureza para processo de shot peening estático

Na Figura 49 abaixo, estão os resultados dos testes de microdureza realizados nas amostras após o processo de Shot Peening Estático.

Figura 49 - Representação gráfica dos resultados das amostras do processo de shot peening estático

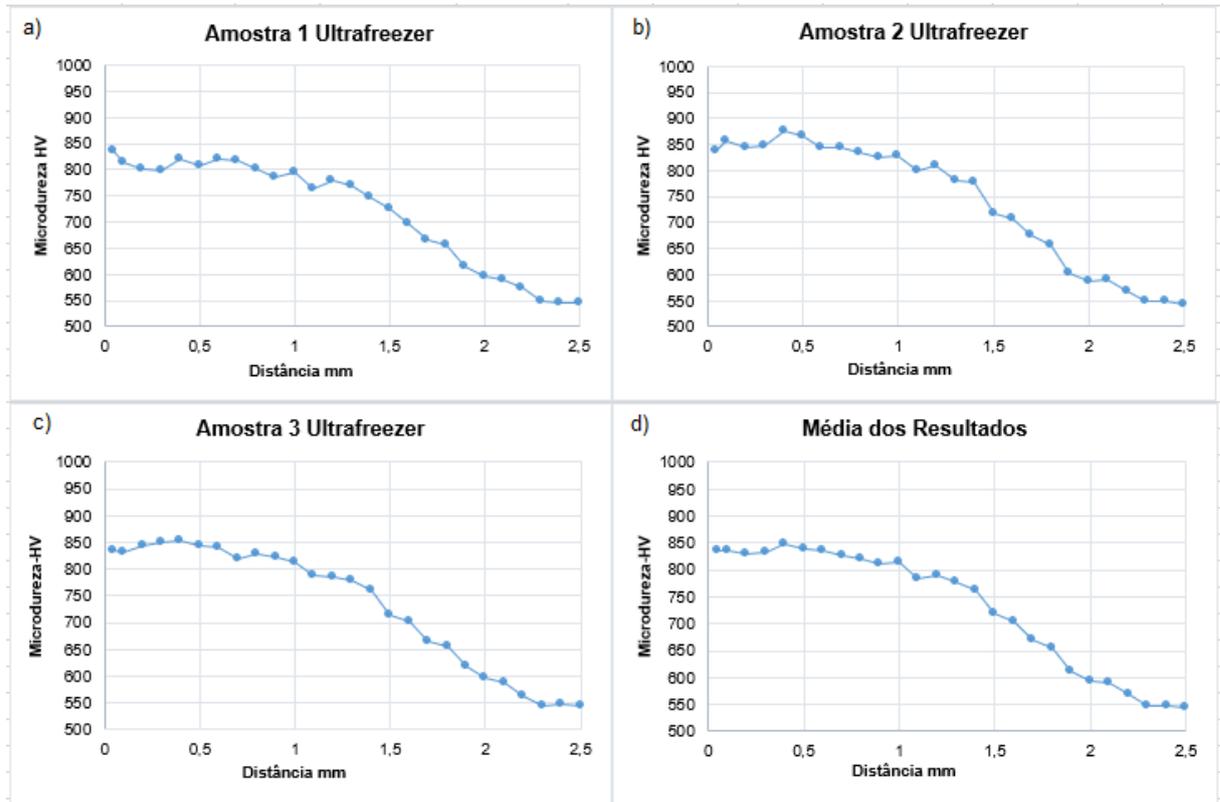


Como pode ser observado nos gráficos houve uma diminuição significativa no percentual de austenita retida indicada pela menor amplitude entre o mínimo inicial e a máxima dureza nos testes caindo para 92 HV.

4.4.4 Resultados de microdureza para o processo subzero em ultrafreezer

Na Figura 50 abaixo, estão representados graficamente os resultados dos testes de microdureza realizados nas amostras submetidas ao processo subzero.

Figura 50 - Representação gráfica dos resultados dos testes de microdureza das amostras tratadas termicamente em ultrafreezer

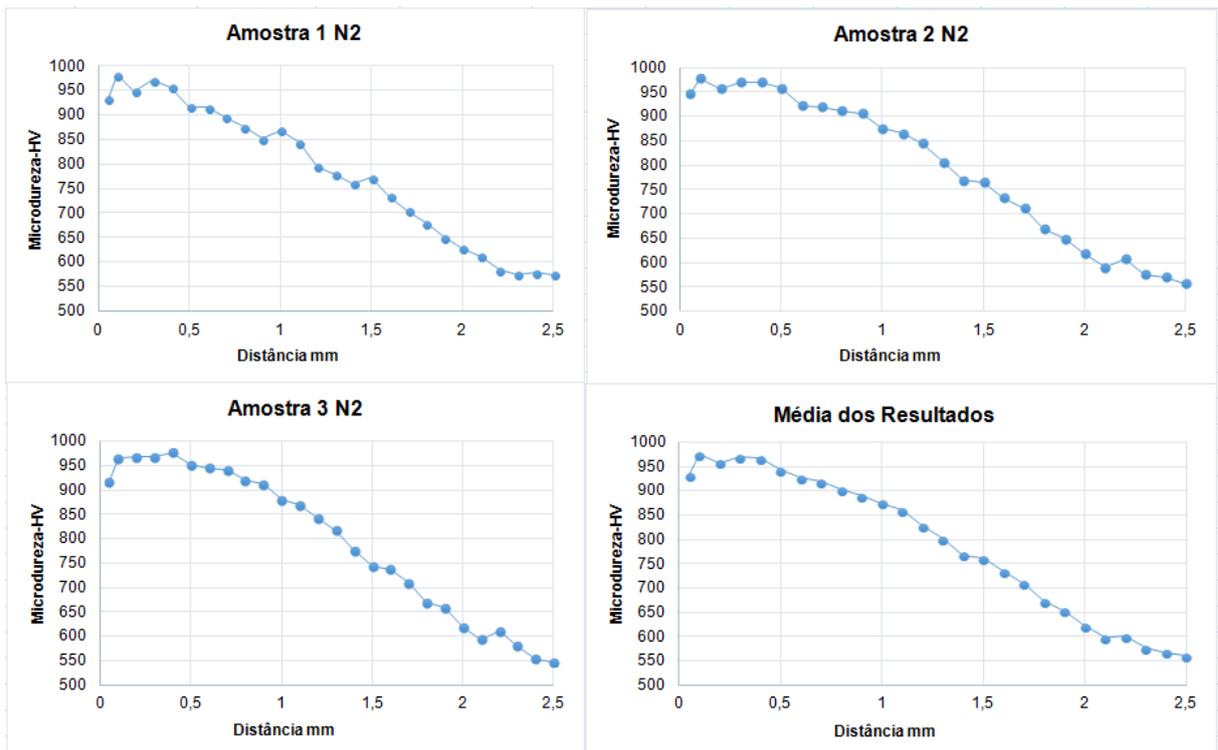


Como pode ser observado a inclinação da curva demonstra um decréscimo na microdureza que vai da superfície até atingir uma profundidade de 2,3mm indicando não haver quase nenhuma austenita retida presente nas amostras.

4.4.5 Resultados de microdureza para o processo criogênico em Nitrogênio Líquido

Na Figura 51 abaixo, estão os resultados dos testes de microdureza realizados nas amostras submetidas ao processo de tratamento criogênico em nitrogênio líquido.

Figura 51 - Representação gráfica dos resultados dos testes de microdureza das amostras tratadas em nitrogênio líquido



Os resultados de gráfico dos testes de microdureza das amostras submetidas ao tratamento criogênico em Nitrogênio Líquido mostram um grande aumento na microdureza das amostras a quase nada de austenita retida presente nas amostras.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos e discutidos conclui-se que:

- Os processos de Criogenia em nitrogênio líquido e ultrafreezer foram os mais efetivos na transformação de austenita retida em Martensita;
- A aplicação do processo mecânico por shot peening estático apresentou melhor desempenho que o processo dinâmico;
- Foi possível eliminar 97,3% de austenita retida, transformando-a em Martensita com a utilização de Nitrogênio líquido;
- Não foi detectado crescimento anormal de grão nas amostras após a cementação;
- Em todas as técnicas utilizadas foi possível aumento de dureza superficial e diminuição do percentual de austenita retida.
- Os perfis de microdureza foram diretamente influenciados com a utilização das técnicas de Shot peening, e criogenia.
- Não foram detectadas variações de microdureza no substrato do material;
- Houve modificação nítida do perfil de microdureza, após a aplicação dos processos de criogenia e deformação por shot peening;
- Não foram detectados carbonetos em contornos de grão após a aplicação dos processos mecânicos e subzero.

6 – SUJESTÕES DE PRÓXIMOS TRABALHOS

- Determinação de tensões residuais por DRX;
- Verificação das fases formadas por DRX;
- Ensaios de fadiga em corpos de prova utilizando-se as técnicas deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] AM Morandi – A siderurgia e sua adaptação ao novo paradigma tecnológico, **Revista Análise Econômica**, 1997.
- [2] Aços: **processamento, estrutura e desempenho**, segunda edição (ASM, 2015),
- [3] H Ferraz, O aço na construção civil, **Revista eletrônica de ciências**; São Paulo, 2003.
- [4] RG dos Santos, **Transformações de fases em materiais metálicos** - 2017
- [5] MCMULLAN, O. W.; TALBOT, A. M. Metallurgy. 1. ed. PA: International Textbook Company, 1936 – 1940.
- [6] Adalto de Farias, **Análise da tensão residual e integridade superficial no processo de torneamento em material endurecido do aço ABNT 8620 Cementado**, USP, 2009.
- [7] SMITH, W. F. **Structure and Properties of Engineering Alloys**. United States of America: 1981
- [8] COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1974.
- [9] **Aços e Ligas especiais**/ André Luiz V. Da Costa e Silva, Paulo Roberto Meri. – 3ª Ed. revista- São Paulo: Editora Blucher, 2010.
- [10] Chiaverini. V, **Aços e Ferros Fundidos**. 5º edição
- [11] COSTA E SILVA, A. L. & MEI, P. M. **Aços e Ligas Especiais**, Eletrometal 1988
- [12] EJ Mittemeijer, MAJ Somers, **Thermochemical surface engineering of steels**- 2014
- [13] B. Edenhofer, D. Joritz, M. Rink, K. Voges; **Carburizing of steels**, Ipsen International GmbH, Kleve, Germany; 485-549
- [14] ASM Committe on Gas Carburizing. **Carburizing and Carbonitriding**. American Society for Metals, Metals parks Park, Ohio, EUA, 1977.
- [15] Kraus, G. Steels: **Heat Treatment and Processing Principles**. ASM International, Materials Park, Ohio, EUA, 1990.
- [16] NBR NM 136 – **TRATAMENTOS TÉRMICOS DE AÇO**. Terminologia e definições. ABMT, 2000.

- [17] BOLTZ, E.S.; TOROK, P.M.; WINTER K.M. **Better Parts Faster with Embedded, Real-Time Control of Carbon Diffusion**, United Process Controls, p. 1-6, 2009.
- [18] KARABELCHTCHIKOVA, O. **Fundamentals of Mass Transfer in Gas Carburizing**. Worcester Polytechnic Institute, 2007
- [19] LINDE GAS DIVISION. Furnace atmospheres Nº 1 **Gas Carburizing and Carbonitriding**
- [20] MILLER, D.C. **Accelerated Carburizing through Special Control of Furnace Atmosphere and Reactions**. Air Products and Chemicals, v 14, p. 37-40, 1982.
- [21] KRAUSS, G.; **Microstructure of Carburized steels**, Heat Treating, 1993
- [22] ASM HANDBOOK. Heat Treating. V. 4, 2001.
- [23] Hu, Z. Z., Ma, M. L., Liu, Y.Q., Liu, J. H. The effect of austenite on low cycle fatigue in three-phase steel. **International Journal of Fatigue**, Vol.19, Nos 8-9, pp. 641-646, 1997.
- [24] Evaldo Diniz Dias, Célio Jesus Marcelo, Horacio Guimarães Delgado Jr., José Adilson Castro, Carlos Roberto Xavier; **Efeito da velocidade de resfriamento sobre a transformação da austenita em aços baixa liga**, *CADERNOS UniFOA*; 2014.
- [25] H. Luo Comments on "austenite stability of ultrafine-grained transformation induced plasticity steel with Mn partitioning" by S. Lee, S.J. Lee and B.C. de Cooman, Scripta Materialia 65, 225-228, Scr. Mater. 66 (2012) 829-831, 2011.
- [26] J. Hidalgo, K.O. Findley, M.J. Santofimia **Thermal and mechanical stability of retained austenite surrounded by martensite with different degrees of tempering**
- [27] J.HIDALGO, K. O .FINDLEY, M. J. SANTOFIMIA, **Estabilidade térmica e mecânica da austenite retida cercada por martensite com diferentes graus de temperatura**, *Volume 690*, 6 April 2017, Pages 337-347
- [28] COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.
- [29] Nishyama. Z. (1978), **Martensitic transformation**. Academic Press. New York, p.1479

- [30] Guimarães, J. R. C. (1981) Conceituação, cinética e morfologia da transformação martensítica em aços. **Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales**, V.1, nº 1, 3-9.
- [31] NETO, H. B.; LANDGRAF, F. J. G.; FUKUHARA, M.; TSCHIPTSCHIN, A. P.; GOLDENSTEIN, H. **Paper submitted for presentation at the 60th Annual Congress of ABM, Belo Horizonte, MG (2005).**
- [32] I Tamura - **Metal Science**, 1982 - Taylor & Francis
- [33] International, A., ASM Metals Handbook Volume 18: **Friction, Lubrication and Wear Technology**, A. International, Editor 1992. p. 320, 1499, 1774-1781,
- [34] Scurlok RG (1990) A MATER of Degres: **A Brief History of Cryogenics**. *Cryogenics* 30(6):483-500.
- [35] Gunston B (2009) **Cryogenics. Cambridge Aerospace Dictionary**, 2nd ed. Cambridge University Press.
- [36] SANDRA, DALLA LANA. **Modelamento da Temperabilidade Jominy por Regressão Linear Multipla para aços ao Boro**. Dissertação.UFRG, 2011.
- [37] Collins, D. N. Deep cryogenic treatment of tool steels: a review. **Heat Treatment of Metals**, v. 23, n. 2, p. 40-42, 1996.
- [38] Preciado, M., P.M. Bravo, and J.M. Alegre, Effect of low temperature tempering prior cryogenic treatment on carburized steels. **Journal of Materials Processing Technology**, 2006. 176(1-3): p. 41-44.
- [39] International, A., ASM Metals Handbook Volume 4: Heat Treating, A. International, Editor 1991. p. 167-1678, 487-491.
- [40] Gulyaev, A., **Cold treatment of steel. Metal Science and heat Treatment**, 1998. 40(11): p. 449-455
- [41] Paolo Baldissere, C.D., *Deep Cryogenic Treatment: A Bibliografic Review. The Open Mechanical Engineering Journal*, 2008. 2: p. 1-11.
- [42] Yun, Dong / Xiaoping, Lin / Hongshen, Xiao. **Deep Cryogenic Treatment of Highseep steel and its Mechanism**. *Heat Treatment of Metals*, pp.55-59, 1988.
- [43] Collins, David N. **Cryogenic Treatment of tool Steels**. *Advanced Materials & Processes*, pp H23-H29, 1998.
- [44] Collins, D.; Domer J. **Deep cryogenic treatment of a D2 cold-work tool steel. Heat Treatment of Metals**, v. 3, p. 71-74, 1997.

- [45] Pfeiffer, W. and Frey, T. (2006) **Strength-ening of ceramics by shot peening.** *J. Eur. Ceram. Soc.*,26, 2639–2645
- [46] Okan Unal, Departamento de Engenharia Mecânica, Karabuk University, Karabuk 78050, Turquia
- [47] TORRES, M. A. S.: ***Uma avaliação do Efeito do Shot Peening na Vida em Fadiga do Aço ABNT 4340 com e sem Revenimento de Cromo Duro.*** Tese (Doutorado) – FEG/UNESP, Guaratinguetá, SP, 2002.
- [48] ZAEFFERER, S.; OHLERT, J.; BLECK, W. *Acta Materialia* 52 (2004) p.2765.
- [49] YAN, Y. H.; KAI, G. Y.; JIAN, M. D. **Materials Science and Engineering A** 441 (2006) p.331.
- [50] PERLADE, A.; BOUAZIZ, O.; FURNÉMONT, Q. **Materials Science and Engineering**, A356 (2003) p.145.

**APÊNDICE 1 - TABELAS DE RESULTADOS DE TESTES DE MICRODUREZA
PARA AMOSTRAS CEMENTADAS.**

Amostra 1 Cementada		Amostra Cementada 2		Amostra Cementada 3		Média	
Distância mm	Dureza-HV	Distância mm	Dureza-HV	Distância mm	Dureza-HV	Distância mm	Dureza-HV
0,05	695	0,05	744	0,05	732	0,05	724
0,1	690	0,1	703	0,1	695	0,1	696
0,2	749	0,2	734	0,2	744	0,2	742
0,3	767	0,3	766	0,3	760	0,3	764
0,4	789	0,4	806	0,4	792	0,4	796
0,5	805	0,5	815	0,5	812	0,5	811
0,6	836	0,6	823	0,6	828	0,6	829
0,7	839	0,7	830	0,7	835	0,7	835
0,8	840	0,8	857	0,8	842	0,8	846
0,9	833	0,9	856	0,9	840	0,9	843
1	824	1	825	1	820	1	823
1,1	797	1,1	814	1,1	803	1,1	805
1,2	791	1,2	795	1,2	783	1,2	790
1,3	775	1,3	795	1,3	790	1,3	787
1,4	767	1,4	780	1,4	772	1,4	773
1,5	727	1,5	731	1,5	728	1,5	729
1,6	704	1,6	726	1,6	725	1,6	718
1,7	686	1,7	700	1,7	689	1,7	692
1,8	664	1,8	671	1,8	662	1,8	666
1,9	615	1,9	606	1,9	626	1,9	616
2	613	2	624	2	624	2	620
2,1	592	2,1	607	2,1	604	2,1	601
2,2	542	2,2	616	2,2	556	2,2	571
2,3	562	2,3	601	2,3	584	2,3	582
2,4	565	2,4	546	2,4	560	2,4	557
2,5	568	2,5	545	2,5	554	2,5	556

APÊNDICE 2 - TABELA DE RESULTADOS DE TESTES DE MICRODUREZA DAS AMOSTRAS COM SHOT PEENING DINÂMICO.

Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Média	
Distância mm	Dureza-HV						
0,05	701	0,05	701	0,05	716	0,05	706
0,1	708	0,1	702	0,1	708	0,1	706
0,2	721	0,2	723	0,2	725	0,2	723
0,3	770	0,3	768	0,3	772	0,3	770
0,4	774	0,4	788	0,4	781	0,4	781
0,5	796	0,5	815	0,5	803	0,5	805
0,6	817	0,6	790	0,6	802	0,6	803
0,7	795	0,7	836	0,7	825	0,7	819
0,8	833	0,8	805	0,8	836	0,8	825
0,9	823	0,9	833	0,9	842	0,9	833
1	834	1	784	1	828	1	815
1,1	832	1,1	794	1,1	812	1,1	813
1,2	830	1,2	765	1,2	796	1,2	797
1,3	812	1,3	756	1,3	789	1,3	786
1,4	773	1,4	720	1,4	745	1,4	746
1,5	762	1,5	710	1,5	735	1,5	736
1,6	744	1,6	679	1,6	723	1,6	715
1,7	712	1,7	653	1,7	712	1,7	692
1,8	690	1,8	618	1,8	687	1,8	665
1,9	641	1,9	590	1,9	632	1,9	621
2	619	2	581	2	645	2	615
2,1	590	2,1	557	2,1	596	2,1	581
2,2	573	2,2	548	2,2	562	2,2	561
2,3	563	2,3	535	2,3	530	2,3	543
2,4	556	2,4	525	2,4	532	2,4	538
2,5	541	2,5	532	2,5	540	2,5	538

APÊNDICE 3 - TABELA DE RESULTADOS DE TESTES DE MICRODUREZA DAS AMOSTRAS DE SHOT PEENING ESTÁTICO.

Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Média	
Distância mm	Dureza-HV						
0,05	773	0,05	785	0,05	795	0,05	784
0,1	762	0,1	752	0,1	765	0,1	760
0,2	748	0,2	742	0,2	748	0,2	746
0,3	760	0,3	762	0,3	770	0,3	764
0,4	778	0,4	774	0,4	778	0,4	777
0,5	814	0,5	832	0,5	824	0,5	823
0,6	816	0,6	822	0,6	828	0,6	822
0,7	812	0,7	812	0,7	816	0,7	813
0,8	828	0,8	824	0,8	812	0,8	821
0,9	832	0,9	812	0,9	820	0,9	821
1	835	1	842	1	838	1	838
1,1	817	1,1	814	1,1	816	1,1	816
1,2	802	1,2	798	1,2	804	1,2	801
1,3	788	1,3	778	1,3	782	1,3	783
1,4	789	1,4	778	1,4	776	1,4	781
1,5	733	1,5	723	1,5	730	1,5	729
1,6	700	1,6	702	1,6	698	1,6	700
1,7	653	1,7	643	1,7	645	1,7	647
1,8	653	1,8	635	1,8	647	1,8	645
1,9	622	1,9	612	1,9	618	1,9	617
2	610	2	598	2	613	2	607
2,1	575	2,1	565	2,1	565	2,1	568
2,2	566	2,2	562	2,2	562	2,2	563
2,3	556	2,3	560	2,3	560	2,3	559
2,4	547	2,4	538	2,4	547	2,4	544
2,5	542	2,5	548	2,5	546	2,5	545

APÊNDICE 4 - TABELA DE RESULTADOS DOS TESTES DE MICRODUREZA DAS AMOSTRAS COM TRATAMENTO SUBZERO

Amostra 1 sub zero		Amostra 2 sub zero		Amostra 3 sub zero		Média	
Distância mm	Dureza-HV	Distância mm	Dureza-HV	Distância mm	Dureza-HV	Distância mm	Dureza-HV
0,05	836	0,05	837	0,05	836	0,05	836
0,1	814	0,1	858	0,1	832	0,1	835
0,2	801	0,2	845	0,2	845	0,2	830
0,3	799	0,3	846	0,3	850	0,3	832
0,4	819	0,4	874	0,4	852	0,4	848
0,5	807	0,5	865	0,5	845	0,5	839
0,6	820	0,6	844	0,6	842	0,6	835
0,7	818	0,7	844	0,7	818	0,7	827
0,8	801	0,8	834	0,8	828	0,8	821
0,9	787	0,9	826	0,9	822	0,9	812
1	796	1	828	1	814	1	813
1,1	762	1,1	801	1,1	788	1,1	784
1,2	779	1,2	808	1,2	786	1,2	791
1,3	770	1,3	781	1,3	780	1,3	777
1,4	749	1,4	776	1,4	761	1,4	762
1,5	726	1,5	716	1,5	714	1,5	719
1,6	697	1,6	709	1,6	701	1,6	702
1,7	667	1,7	676	1,7	665	1,7	669
1,8	655	1,8	657	1,8	655	1,8	656
1,9	616	1,9	604	1,9	618	1,9	613
2	597	2	587	2	596	2	593
2,1	590	2,1	589	2,1	589	2,1	589
2,2	575	2,2	569	2,2	564	2,2	569
2,3	548	2,3	548	2,3	543	2,3	546
2,4	546	2,4	549	2,4	548	2,4	548
2,5	544	2,5	543	2,5	545	2,5	544

APÊNDICE 5 - TABELA DE RESULTADOS DE TESTES DE MICRODUREZA DAS AMOSTRAS COM TRATAMENTO CRIOGÊNICO.

Amostra 1 N2		Amostra 2 N2		Amostra 3 N2		Média	
Distância mm	Dureza-HV						
0,05	932	0,05	946	0,05	917	0,05	932
0,1	981	0,1	978	0,1	965	0,1	975
0,2	948	0,2	957	0,2	967	0,2	957
0,3	971	0,3	970	0,3	968	0,3	970
0,4	956	0,4	970	0,4	977	0,4	968
0,5	917	0,5	958	0,5	952	0,5	942
0,6	915	0,6	922	0,6	945	0,6	927
0,7	895	0,7	920	0,7	941	0,7	919
0,8	876	0,8	912	0,8	920	0,8	903
0,9	851	0,9	906	0,9	912	0,9	890
1	869	1	876	1	879	1	875
1,1	844	1,1	865	1,1	870	1,1	860
1,2	795	1,2	845	1,2	842	1,2	827
1,3	779	1,3	806	1,3	817	1,3	801
1,4	760	1,4	769	1,4	775	1,4	768
1,5	772	1,5	765	1,5	744	1,5	760
1,6	733	1,6	733	1,6	737	1,6	734
1,7	704	1,7	712	1,7	710	1,7	709
1,8	679	1,8	669	1,8	670	1,8	673
1,9	650	1,9	649	1,9	658	1,9	652
2	628	2	618	2	619	2	622
2,1	611	2,1	590	2,1	593	2,1	598
2,2	584	2,2	608	2,2	610	2,2	601
2,3	574	2,3	576	2,3	580	2,3	577
2,4	578	2,4	570	2,4	553	2,4	567
2,5	574	2,5	557	2,5	547	2,5	559

ANEXO 1 - FICHA TÉCNICA ZIRTEC – MICRO ESFERAS DE VIDRO

ZIRTEC

O VIDRO (Cristal-Fil)
e
Microesferas de Vidro SodaCal

Valores Típicos:

Físicos	
Gravidade Específica	2,5
Índice de Refração	1,51
Ferro Livre % max	0,1
Mecânicos	
Módulo de young, 10 ⁴ psi	10,0
Módulo de rigidez, 10 ⁴ psi	4,3
Dureza (moh)	6,0
Coefficiente de Fricção	0,9-1,0
Elétricos	
Constante dielétrica, 22 ^o C, 10 ⁶ Hz	6,9
Tangente de Perda, 22 ^o C, 10 ⁶ Hz	0,0085
Resistividade, 25 ^o C, ohm-cm	6,5x10 ¹²
Térmicos	
Ponto de amolecimento – ^o C	704
Coefficiente de expansão, pol/pol. ^o Cx10 ⁻⁷	90
Condutividade térmica (cal/ sec) (cm ²) (^o C/cm) at 500 ^o C	0,0036
Composição Típica (Vidro Soda Cal)	
	%
SiO ₂	72,5
Na ₂ O	13,7
CaO	9,8
MgO	3,3
Al ₂ O ₃	0,4
FeO/Fe ₂ O ₃	0,2
K ₂ O	0,1
B ₂ O ₃	0,0

*Quando testado pela ASTM C-169 não apresenta sílica cristalina livre

As microesferas não são tóxicas.

Nenhum risco existe com relação a ingestão, inalação ou contato.

Folhas de Segurança do material são disponíveis sob solicitação.

O uso de luvas e óculos (EPI'S) para proteção mecânica, uma vez que se tratam de partículas extremamente finas é necessário.

ANEXO 2 - RELATÓRIO DE ANÁLISE E CERTIFICAÇÃO ZIRTEC.

Relatório de Análise Final

Página 2 de 2

	Av. Prof. Sá Lessa, 381, Acaari
	Dist. Ind. Fazenda Botafogo
	Cep: 21530-040
	Rio de Janeiro/RJ - Brasil
	Fone: 552124725050 Fax: 552138354237

Especificações do Produto									
Número: IMP-05					Revisão: 00				
Nome do Produto					Lote				
IMP-C					220217c104				
Angulares					Inclusão de Ar				
Total de partículas	Total de angulares	% Angulares			Contagem Total	Contagem			
69	1	1.45			0 - 10%	69	66	95.65	
					10 - 20%	69	2	2.9	
					20 - 40%	69	1	1.45	
					> 40%	69	0	0	
Granulometria					Devitrificação				
Abertura de Tela	Especificação	Massa (g)	% Ret.	% Pass	Contagem Total	Contagem Defeito	% Defeito		
35	500	100	0	0	100				
40	425	95-100	3	3.3	96.7	Isentas	69	69	100
50	300	0-10	81	88	8.7	Alta	69	0	0
60	250	0-3	8	8.7	0.0	Baixa	69	0	0
Prato			0	0	0.0				
Total			92		0.0				
					Contagem total	Contagem defeitos	% defeitos		
					69	0	0		
Esféricidade									
	Total de partículas	Total de defeitos	Esféricidade (%)						
Microficha	69	11	84,06						
Microscópio									
Rondômetro									
Laudo	Analista *	Data	Atende Norma						
✓	Jose Manuel	22/02/2017							
Observações:									
Assinatura:									
									

* Documento autenticado eletronicamente.