

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de
Minas – Mestrado Profissional

Dissertação de Mestrado

RELAÇÃO ESTRUTURA-PROPRIEDADES-PROCESSAMENTO
DE AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS

Autor: Cláudio Moreira de Alcântara
Orientador: Prof. Dr. Vicente Tadeu Lopes Buono
Co-orientador: Wilian da Silva Labiapari

Agosto/2021
Cláudio Moreira de Alcântara

Relação Estrutura-Propriedades-Processamento
de Aços Inoxidáveis Martensíticos

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas - Mestrado Profissional da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de Concentração: Metalurgia Física

Orientador: Prof. Dr. Vicente Tadeu Lopes Buono

Co-orientador: Wilian da Silva Labiapari

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
2021

A347r

Alcântara, Claudio Moreira de.

Relação estrutura-propriedades-processamento de aços inoxidáveis martensíticos [recurso eletrônico] / Claudio Moreira de Alcântara. - 2021.

1 recurso online (94 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Vicente Tadeu Lopes Buono.

Coorientador: Wilian da Silva Labiapari.



Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 91-94.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia metalúrgica - Teses. 2. Metalurgia física - Teses.
3. Aço inoxidável - Teses. 4. Aço - Propriedades mecânicas - Teses.
5. Metais - Têmpera - Teses. I. Buono, Vicente Tadeu Lopes.
II. Labiapari, Wilian da Silva. III. Universidade Federal de Minas Gerais.
Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 669(043)

	<p align="center">UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS ESCOLA DE ENGENHARIA Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG - Mestrado Profissional</p>	
---	---	---

**RELAÇÃO ESTRUTURA-PROPRIEDADES-PROCESSAMENTO DE
AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS**

CLÁUDIO MOREIRA DE ALCÂNTARA

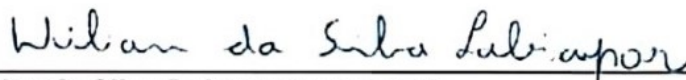
Dissertação de mestrado submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Aprovada em 18 de agosto de 2021.

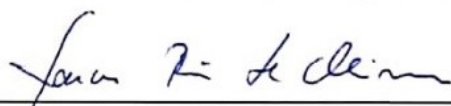
Por:



Prof. Dr. Vicente Tadeu Lopes Buono (UFMG)
Orientador



Dr. Wilian da Silva Labiapari (Aperam)



Dr. Tarcísio Reis de Oliveira (Aperam)



Prof. Dr. Geraldo Lúcio de Faria (FOP)

DEDICATÓRIAS

À minha amada esposa Tânia, pelo incentivo e apoio.
Aos meus filhos, Yves e Mariana pelo carinho recebido.
À Aperam South America pela oportunidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram na realização deste trabalho. Em especial, agradeço à minha família, no suporte e também pelas ausências, aos meus colegas dos laboratórios do Centro de Pesquisa da Aperam que não mediram esforços na realização dos tratamentos térmicos e ensaios, aos meus colegas pesquisadores pelos ensinamentos;

Ao Prof. Vicente Buono pela orientação e paciência;

Ao Dr. Wilian Labiapari pela co-orientação e apoio incondicional na durante todo o desenvolvimento deste trabalho;

Ao Dr. Tarcisio Reis por ter incentivado e me fazer acreditar que era possível chegar aqui;

À Aperam South America, pela oportunidade de crescimento profissional.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

1 – INTRODUÇÃO	14
2 – OBJETIVOS	15
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 – Os Aços Inoxidáveis	16
3.2 – Aços Inoxidáveis Ferríticos	17
3.3 – Aços Inoxidáveis Austeníticos	19
3.4 – Aços Inoxidáveis Duplex	20
3.5 – Aços Inoxidáveis Martensíticos	21
3.6 – Estrutura Martensítica.....	22
3.7 – Tratamentos Térmicos de Têmpera e Revenimento dos Aços Martensíticos	26
3.8 – Propriedades dos Aços Inoxidáveis Martensíticos	27
3.8.1 – Dureza	27
3.8.2 - Propriedades Mecânicas	29
3.8.3 - Resistência ao Impacto	31
3.8.4 - Resistência à Corrosão	32
3.9 – Produção dos aços inoxidáveis martensíticos.....	33
4 – METODOLOGIA	36
4.1 – Materiais Utilizados.....	36
4.2 – Simulações Termodinâmicas e Planejamento do Processamento Térmico	36
4.3 – Processos de Austenitização e Têmpera	39
4.4 – Processos de Revenimento.....	41
4.5 – Caracterizações dos Materiais	44
4.5.1 – Composição Química	44

4.5.2 - Ensaio de Tração	44
4.5.3 - Metalografia Ótica	45
4.5.4 - Ensaio de Resistência à Corrosão	45
4.5.5 - Análise MEV- FEG - EBSD	46
4.5.6 - Ensaio de Dureza	45
4.5.7 - Ensaio de Impacto – Charpy	46
5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1 – Caracterização do material	48
5.1.1 – Microestrutura como Recebido	47
5.1.2 - Microestrutura após Austenitização e Têmpera	49
5.1.3 - Microestrutura do aço P420D após Têmpera e Revenimento	51
5.1.4 - Microestrutura do aço P420A após Têmpera e Revenimento.....	55
5.2 – Análise Microestrutural via EBSD	59
5.3 – Dureza.....	61
5.3.1 – Efeito da Temperatura de Austenitização e Têmpera na Dureza	61
5.3.2 – Efeito do Revenimento na Dureza.....	62
5.4 – Propriedades Mecânicas	66
5.4.1 – Limite de Escoamento e Resistência após Austenitização e Têmpera.....	66
5.4.2 – Limite de Escoamento e Limite de Resistência após Revenimento	68
5.5 – Resistência ao Impacto	77
5.5.1 – Efeito da Austenitização na Resistência ao Impacto.....	77
5.5.2 – Efeito do revenimento na Resistência ao Impacto.....	78
5.6 – Resistência à Corrosão.....	81
5.6.1 – Resistência à Corrosão após Austenitização e Têmpera.....	81
5.6.2 – Resistência a Corrosão após Revenimento	84
6 – CONCLUSÕES	87
7 – RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS	89
8 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
9 – BIBLIOGRAFIA	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Desenho esquemático da camada passiva.....	17
Figura 3.2 - Série 400 dos aços inoxidáveis ferríticos.....	18
Figura 3.3 - Série 300 dos aços inoxidáveis austeníticos.....	19
Figura 3.4 - Microestrutura típica de um aço inoxidável Duplex.....	20
Figura 3.5 - Diagrama pseudobinário do sistema Fe-C-Cr.....	22
Figura 3.6 - Representação da transformação martensítica.....	23
Figura 3.7 - Tipos de martensita formadas em uma liga Fe-C.....	24
Figura 3.8 - Microestrutura de um aço inoxidável martensítico temperado.....	25
Figura 3.9 - Diagrama típico de um ciclo de tratamento térmico de têmpera e revenimento para um aço AISI 420 aplicado em cutelaria.....	26
Figura 3.10 - Dureza em função do teor de carbono.....	28
Figura 3.11 - Efeito da temperatura de austenitização na dureza.....	29
Figura 3.12 - Efeito da temperatura de revenimento sobre as prop. mecânicas.....	30
Figura 3.13 - Efeito da temperatura de austenitização sobre a energia de impacto.....	32
Figura 3.14 - Efeito da temperatura de austenitização - perda de massa por corrosão...33	
Figura 3.15 - Desenho esquemático da produção dos aços inoxidáveis.....	34
Figura 3.16 - Microestrutura típica do aço AISI 420 Deformado após LTQ e ferrítico após recozimento em caixa.....	35
Figura 4.1 - Simulação termodinâmica de fase do P420D executada por software ThermoCalc.....	37
Figura 4.2 - Simulação termodinâmica de fase do P420A executada por software ThermoCalc.....	38
Figura 4.3 - Fluxograma do processamento térmico.....	38
Figura 4.4 - Forno resistivo Combustol usado na austenitização das amostras.....	39
Figura 4.5 - Curvas obtidas durante a austenitização e têmpera das amostras.....	40
Figura 4.6 - Ciclone de ar forçado usado na têmpera das amostras.....	41
Figura 4.7 - Forno resistivo, usado nos tratamentos térmicos de revenimento.....	42
Figura 4.8 - Registrador de dados usado na medição das temperaturas de têmpera e revenimento das amostras.....	43

Figura 4.9 - Representação esquemática do ciclo de tratamento térmico.....	43
Figura 4.10 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração.....	44
Figura 4.11 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de impacto.....	47
Figura 5.1 - Aços P420A e P420D como recebido.....	49
Figura 5.2 - Aço P420D austenitizado em diferentes temperaturas.....	50
Figura 5.3 - Aço P420A austenitizado em diferentes temperaturas.....	51
Figura 5.4 - Aço P420D austenitizado em 950°C e revenido.....	52
Figura 5.5 - Aço P420D austenitizado em 1000°C e revenido.....	53
Figura 5.6 - Aço P420D austenitizado em 1050°C e revenido.....	54
Figura 5.7 - Aço P420A austenitizado em 950 °C e revenido.....	55
Figura 5.8 - Aço P420D austenitizado em 1100°C e revenido.....	56
Figura 5.9 - Aço P420A austenitizado em 1000°C e revenido.....	57
Figura 5.10 - Aço P420A austenitizado em 1050°C e revenido.....	58
Figura 5.11 - Aço P420A austenitizado em 1100°C e revenido.....	59
Figura 5.12 - Microestrutura observada via técnica de EBSD do aço P420D.....	60
Figura 5.13 - Microestrutura observada via técnica de EBSD do Aço P420A.....	61
Figura 5.14 - Dureza dos aços Aço P420D e Aço P420A em função da temperatura de Austenitização.....	62
Figura 5.15 - Dureza dos aços Aço P420D e Aço P420A após austenitizado a 950°C e revenido em diferentes temperaturas.	63
Figura 5.16 - Dureza dos aços Aço P420D e Aço P420A após austenitizado a 1000°C e revenido em diferentes temperaturas.	64
Figura 5.17 - Dureza dos aços Aço P420D e Aço P420A após austenitizado a 1050°C e revenido em diferentes temperaturas.....	65
Figura 5.18 - Dureza dos aços Aço P420D e Aço P420A em função da temperatura de revenimento.....	66
Figura 5.19 - Limite de escoamento dos aços P420D e aço P420A em função da temperatura de austenitização.....	67
Figura 5.20 - Limite de resistência dos aços P420D e aço P420A em função da temperatura de austenitização.....	67
Figura 5.21 - Limite de escoamento dos aços Aço P420D e Aço P420A após austenitizado a 950°C e revenido em diferentes temperaturas.....	69

Figura 5.22 - Limite de escoamento dos aços Aço P420D e Aço P420A após austenitizado a 1000°C e revenido em diferentes temperaturas.....	70
Figura 5.23 - Limite de escoamento dos aços Aço P420D e Aço P420A após austenitizado a 1050°C e revenido em diferentes temperaturas.....	71
Figura 5.24 - Limite de escoamento dos aços Aço P420D e Aço P420A após austenitizado a 1100°C e revenido em diferentes temperaturas.....	72
Figura 5.25 - Limite de Resistência dos aços Aço P420D e Aço P420A após austenitizado a 950°C e revenido em diferentes temperaturas.....	73
Figura 5.26 - Limite de Resistência dos aços Aço P420D e Aço P420A após austenitizado a 1000°C e revenido em diferentes temperaturas.....	74
Figura 5.27 - Limite de Resistência dos aços Aço P420D e Aço P420A após austenitizado a 1050°C e revenido em diferentes temperaturas.....	75
Figura 5.28 - Limite de Resistência dos aços Aço P420D e Aço P420A após austenitizado a 1100°C e revenido em diferentes temperaturas.....	76
Figura 5.29 - Energia de Impacto dos Aços P420A e P420D em função da temperatura de austenitização.....	78
Figura 5.30 - Efeito da temperatura de revenimento em 250°C na energia de impacto dos aços P420D e Aço P420A após austenitização em diferentes temperaturas.....	79
Figura 5.31 - Efeito da temperatura de revenimento em 300°C na energia de impacto dos aços P420D e Aço P420A após austenitização em diferentes temperaturas.....	80
Figura 5.32 - Efeito da temperatura de revenimento em 350°C na energia de impacto dos aços P420D e Aço P420A após austenitização em diferentes temperaturas.....	80
Figura 5.33 - Efeito da temperatura de revenimento em 400°C na energia de impacto dos aços P420D e Aço P420A após austenitização em diferentes temperaturas.....	81
Figura 5.34 - Aço P420D, potencial de pite com solução a 3,5% de NaCl e Ph8.....	82
Figura 5.35 - Aço P420A, potencial de pite com solução a 3,5% de NaCl e Ph 8.....	83
Figura 5.36 - Potencial de Pite com solução a 3,5% de NaCl e Ph 8 para o aço P420D austenitizado e revenido em diferentes temperaturas.....	85
Figura 5.37 - Potencial de pite com solução a 3,5% de NaCl e Ph 8 para o aço P420A austenitizado e revenido em diferentes temperaturas.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química dos aços estudados [% em massa].....	36
--	----

LISTA DE NOTAÇÕES

AC1 = Início de transformação Austenítica

BQB = Bobina laminada a quente e decapada

BQP = Bobina lamina aquece

CCC = Cúbico de corpo centrado

CFC = Cúbico de face centrada

EBSB – Difração de elétrons retro espalhados

FEG = Microscópio Eletrônico de varredura de alta resolução

MEV = Microscópio Eletrônico de varredura

Mf = Temperatura final de transformação martensitica

MO = Microscópio Ótico

Ms = Temperatura de início de transformação martensitica

NaCl = Cloreto de Sódio

TCC = Tetragonal de corpo centrado

ThermoCalc. = Software de simulação termodinâmica

α = Ferrita

γ = Austenita

RESUMO

O aço inoxidável martensítico AISI 420 é muito usado na indústria de cutelaria em função da sua alta dureza, resistência ao desgaste e excelente resistência à corrosão, propriedades adquiridas quando este aço é submetido aos processos de tratamento térmico de têmpera e revenimento. Entretanto quando variáveis como temperatura de austenitização, tempo de encharque e velocidade de resfriamento são executadas de modo empírico ou de forma não controlada, resulta em problemas de desempenho do produto final. O objetivo global do presente trabalho foi estudar o efeito de diferentes temperaturas de austenitização e de revenimento, na microestrutura, propriedades mecânicas, resistência ao impacto e resistência à corrosão, sendo para isso, escolhidos dois aços inoxidáveis martensíticos AISI 420 produzidos pela empresa Aperam South America, cuja diferença entre os dois materiais está no teor de Carbono, onde o aço denominado internamente de P420D tem teor de carbono na ordem de 0,18% e o aço P420A tem teor de carbono em 0,32%. Os testes foram realizados através de tratamentos térmicos de têmpera e revenimento em escala laboratorial, em quatro temperaturas distintas. As amostras foram caracterizadas através de ensaios metalográficos, de dureza, ensaios mecânicos e de resistência ao Impacto. O aço P420A apresentou maiores valores de dureza que o aço P420D, onde o maior teor de Carbono do mesmo influenciou esta variável nas diferentes condições de tratamento. O aço P420A apresenta maiores valores de propriedades mecânicas que o aço P420D dado ao maior teor de carbono desta liga, contudo ambos os aços as propriedades de limite de resistência e escoamento aumentam à medida que se aumenta a temperatura de austenitização. Os aços apresentam melhoria dos valores de propriedades mecânicas quando são submetidos às diferentes temperaturas de revenimento. Os aços P420A e P420D apresentam baixos valores de energia de impacto quando somente temperados, entretanto o aço P420D tem uma melhora expressiva dessa propriedade quando submetido às temperaturas de revenimento. A resistência à corrosão melhora com acréscimo da temperatura de austenitização, porem o aço 420D apresenta melhores valores de resistência ao pite devido este ter menor teor de carbono que o aço P420A.

Palavras Chave

Inoxidável, martensítico, austenitização, têmpera, revenimento, propriedades.

ABSTRACT

AISI 420 martensitic stainless steel is widely used in the cutlery industry due to its high hardness, wear resistance and excellent corrosion resistance, properties acquired when this steel is subjected to heat treatment processes of quenching and tempering. However, when variables such as austenitizing temperature, soaking time and cooling speed are performed empirically or in an uncontrolled manner, this results in end product performance problems. The overall objective of this work was to study the effect of different austenitization and tempering temperatures on the microstructure, mechanical properties, impact and corrosion resistance. For this, two martensitic stainless steels AISI 420 produced by the company Aperam South America were chosen, whose difference between the two materials is in the carbon content, where the steel known internally as P420D has a carbon content in the order of 0.18% and the P420A steel has a carbon content of 0.32%. The tests were carried out through laboratory-scale quenching and tempering heat treatments at four different temperatures. The samples were characterized through metallographic, hardness, mechanical and impact strength tests. P420A steel had higher hardness values than P420D steel, where its higher carbon content influenced this variable in different treatment conditions. P420A steel has higher mechanical property values than P420D steel due to the higher carbon content of this alloy, however both steels' yield and strength limit properties increase as the austenitization temperature increases. The Steels show improved mechanical property values when subjected to different tempering temperatures. P420A and P420D steels have low impact energy values when as quenched, however P420D steel has a significant improvement in this property when subjected to tempering temperatures. Corrosion resistance improves with increasing austenitization temperature, but 420D steel has better pitting resistance values due to its lower carbon content than P420A steel.

Key words

Stainless, martensitic, austenitizing, quenching, tempering, properties.

1 INTRODUÇÃO

É cada vez mais evidente o avanço mercadológico dos aços inoxidáveis em função da sua versatilidade, desempenho e resistência à corrosão. Na indústria, o aço inoxidável martensítico é amplamente utilizado em moldes e matrizes, cutelaria profissional, discos de freio e até em chassis de veículos.

O aço inoxidável martensítico mais conhecido e utilizado é o AISI 420. Fornecido ao mercado na condição recozida, é normalmente usinado, conformado ou trabalhado a frio, enquanto ainda no estado ferrítico, e após essas etapas de produção são submetidos a operações de tratamentos térmicos de têmpera e revenimento.

O processo de têmpera consiste em se elevar o aço à temperatura de austenitização por um tempo que possibilite a solubilização mais completa possível do carbono e elementos de liga na austenita, seguido de um resfriamento rápido que resulte na transformação martensítica. O objetivo é obter uma estrutura martensítica de dureza elevada, propriedades mecânicas e de resistência a corrosão que permitam a sua utilização.

Os parâmetros que mais influenciam a estrutura e a dureza obtida são, além da composição química, a temperatura, o tempo de austenitização e a velocidade de resfriamento. Neste trabalho foram estudados os aços inoxidáveis martensíticos P420D e P420A produzidos pela empresa Aperam South America, variando-se a temperatura de austenitização e de revenimento. Como principais resultados, vimos a influência destas duas variáveis na microestrutura, propriedades mecânicas e resistência à corrosão.

2 OBJETIVOS

Estudar os efeitos de diferentes temperaturas de austenitização e de revenimento, nas propriedades de dois aços inoxidáveis martensíticos com diferentes teores de carbono produzidos comercialmente, visando oferecer ao mercado produtos otimizados para aplicações específicas e/ou customizadas.

São objetivos específicos do projeto:

- Investigar a influência da composição química na microestrutura após tratamento térmico de têmpera e revenimento
- Avaliar o efeito da composição química nas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão.
- Avaliar o efeito da temperatura de austenitização e do revenimento desses aços nas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas de Ferro, Carbono e Cromo possuindo no mínimo 10,5% de Cromo. Tem como principal e mais importante propriedade a resistência à corrosão na maioria dos meios onde outros materiais falham. A adição elementos de liga como Ni, V, Nb, Mo, Si, Ti e Mn propiciaram uma grande variedade e classes de aços inoxidáveis com diferentes propriedades de resistência a corrosão, resistência mecânica, soldabilidade e tenacidade para diversas aplicações⁽¹⁾.

A resistência à corrosão se deve principalmente ao Cromo, formando a camada "passiva", que é um filme de óxido/hidróxido rico em Cromo devido à elevada afinidade ao Oxigênio⁽²⁾, e se forma naturalmente na superfície, sendo extremamente fina, na ordem de 1 a 5 nanômetros

A camada passiva é auto-regenerativa, ou seja, mesmo quando o aço é danificado superficialmente, o Oxigênio do ar combina imediatamente com o Cromo para restaurá-la, agindo como um escudo que protege o material de subseqüentes ataques corrosivos, e as características da camada formada (formação, impermeabilidade, taxa de dissolução, entre outros) é que vão determinar o desempenho do material em meio corrosivo^(1,2).

Na Figura 3.1 há um desenho esquemático, onde é possível visualizar a camada passiva na cor azul promovendo a proteção do aço inoxidável e após ocorrer a ruptura da mesma, há a regeneração pela ação do oxigênio.

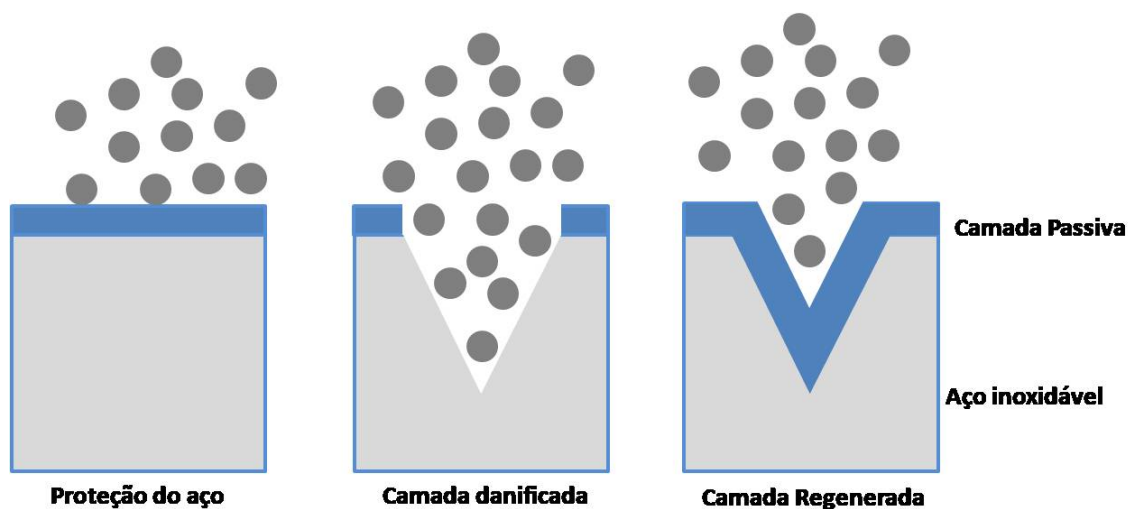


Figura 3.1 – Desenho esquemático da camada passiva (Adaptado de Santos, 2019)

3.2 Aços Inoxidáveis Ferríticos

Os aços inoxidáveis ferríticos possuem uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), sendo basicamente, liga de Fe-Cr, com teores de Cromo entre 11 e 27%. O teor de Carbono é mantido baixo, o que resulta em uma limitada resistência mecânica. Estas ligas deveriam ser inteiramente de estrutura ferrítica até o ponto de fusão, ou seja, não apresentar transformação ferrita-austenita.^(3,29)

A Figura 3.2 exemplifica alguns aços inoxidáveis ferríticos e sua composição química tendo como base o aço inoxidável 430.⁽³⁵⁾

Ferríticos

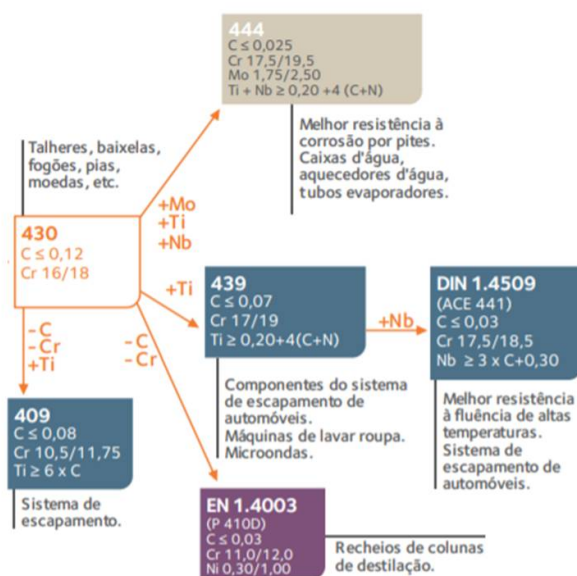


Figura 3.2 – Série 400 dos aços inoxidáveis ferríticos (Fonte: APERAM, 2019)

Os aços inoxidáveis ferríticos não são endurecíveis por tratamento térmico, são magnéticos e apresentam boa resistência à corrosão em meios menos agressivos. Com ductilidade e soldabilidade que permitem uma vasta aplicação, que se assemelham ao aço carbono. São largamente utilizados em talheres, bandejas e linha branca (fogões, geladeiras, lava-roupas, etc.), principalmente pelo seu custo baixo em relação aos aços austeníticos. O tipo AISI 430 é o que melhor representa essa família, por ser a base química dos demais aços ferríticos.

Os aços ferríticos podem ser estabilizados com Titânio e Nióbio, que por possuírem maior afinidade pelo C e N do que o Cromo, sendo fortes formadores de carbonetos e/ou carbonitretos, evita a formação de precipitados de Cromo do tipo $\text{Cr}_{23}(\text{C}, \text{N})_6$, mantendo-o em solução sólida ⁽²⁹⁾ o que garante a resistência a corrosão e boa soldabilidade. Esses aços quando não estabilizados, pode ocorrer a formação de martensita, que se localiza nos contornos de grãos, onde o endurecimento ocorrido pela presença da martensita, causa fragilidade, necessitando assim de recozimento para eliminar sua presença garantindo a estrutura ferrítica ⁽³⁾.

3.3 Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos são basicamente ligas Fe-Cr-Ni, não magnéticos e com estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC). A adição de Níquel como elemento de liga estabiliza a austenita mesmo à temperatura ambiente, propiciando grande mudança em muitas propriedades. Na Figura 3.3 evidencia-se a variedade de aços austeníticos existentes de acordo sua composição química ⁽³⁵⁾.

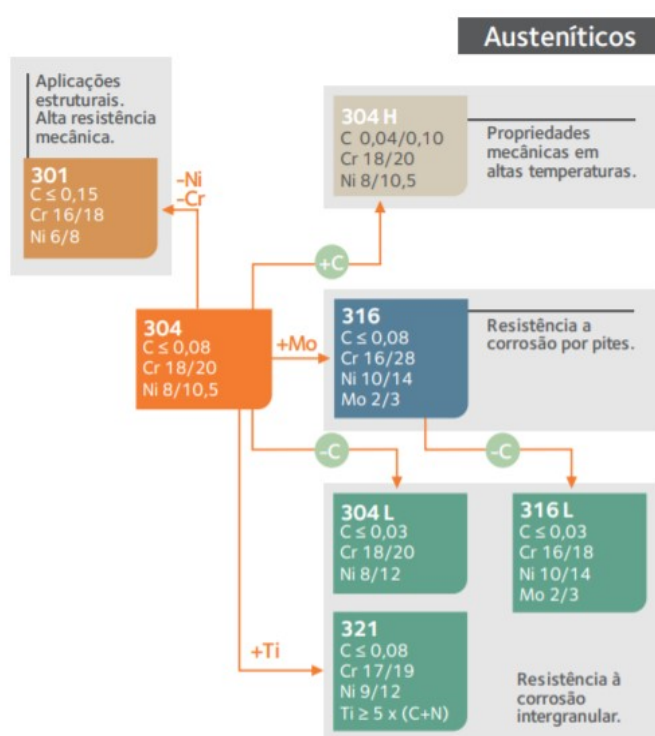


Figura 3.3 – Série 300 dos aços inoxidáveis austeníticos (Fonte: APERAM, 2019)

O Cr e o Ni como principais elementos de liga conferem boa resistência à corrosão, excelente ductilidade e soldabilidade comparativamente aos aços ferríticos. São utilizados em aplicações criogênicas e a altas temperaturas ⁽⁵⁾, na ordem de até 1.100 °C. Também são largamente utilizados em equipamentos para indústria de papel e celulose, farmacêutica, alimentícia, sucroalcooleira, cervejaria e bens de capital. Assim como os aços inoxidáveis ferríticos, não podem ser endurecidos por tratamento térmico. O tipo mais comum dessa família é o AISI 304.

3.4 Aços Inoxidáveis Duplex

Os aços inoxidáveis duplex são ligas Fe-Cr-Ni com adição de elementos de liga e processamento térmico específico para desenvolver microestrutura com quantidade de ferrita e austenita objetivando 50% de cada fase, sendo o motivo pelo qual recebem o nome de duplex ⁽⁵⁾.

Por terem excelentes propriedades mecânicas e resistência á corrosão possuem ampla utilização nas indústrias químicas, de óleo, gás, papel e celulose, evaporadores, dutos e tanques de condução e armazenamento de material corrosivo. Um dos aços inoxidáveis duplex mais conhecido é o 2205, ou UNS S31803 aplicado principalmente, em tubos flexíveis na extração de petróleo.

Na Figura 3.4 há uma microestrutura típica de um aço inoxidável duplex ⁽³⁴⁾. Onde é mostrado as duas fases da sua composição.

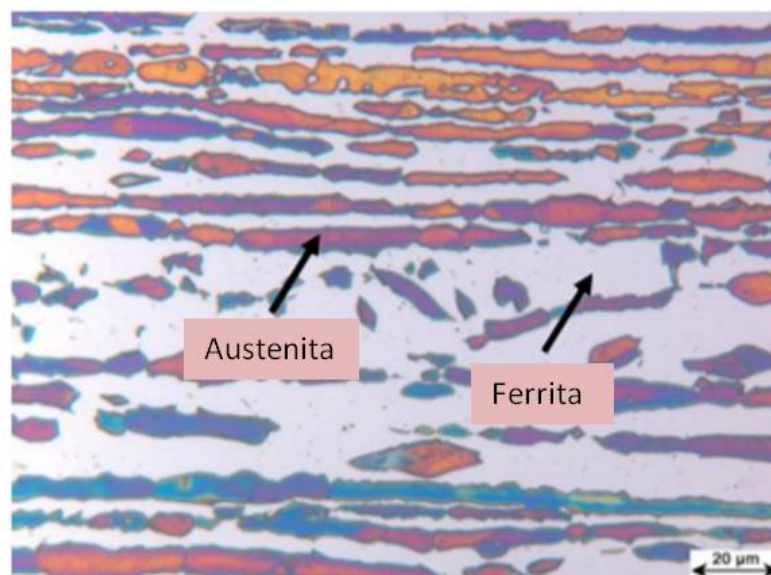


Figura 3.4 – Microestrutura típica de um aço inoxidável Duplex (Adaptado de RAGGER, 2011)

3.5 Aços Inoxidáveis Martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos, foco deste trabalho, são ligas de Fe-Cr contendo entre 10,5 a 18% de Cromo, porém, com teor de carbono mais alto em relação aos outros aços inoxidáveis, o que permite o endurecimento por tratamento térmico. Quando temperados são magnéticos e possuem estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC), de elevada dureza e baixa ductilidade ⁽⁶⁾.

O aço inoxidável martensítico mais conhecido e utilizado é o AISI 420, que na condição recozido é conformado ou trabalhado a frio. O recozimento à temperatura próxima aos 760°C permite a combinação do Carbono e Cromo, formando carboneto de Cromo, $Cr_{23}C_6$, que precipita na matriz ferrítica. Cada precipitado de $Cr_{23}C_6$ possui, em peso, aproximadamente 95% de Cr, deixando a matriz empobrecida deste elemento em solução sólida. Isso faz com que não tenha um mínimo de Cr que o torna inoxidável, reduzindo sua resistência à corrosão na maioria dos meios ⁽⁷⁾.

O diagrama pseudobinário do sistema Fe-C-Cr, para a composição fixa de 13% de Cromo ilustrado na Figura 3.5, evidencia as principais transformações de fase para esta liga. A linha tracejada transversal indica o teor de 0,4% em massa de Carbono, onde a característica mais importante é a presença do campo monofásico de estabilidade da austenita, um campo bifásico de austenita e carboneto tipo $M_{23}C_6$ e o campo trifásico de Austenita, carboneto $M_{23}C_6$ e carboneto M_7C_3 .

Em uma ampla faixa de temperatura, o campo monofásico da austenita permite a dissolução dos carbonetos e com o superresfriamento a partir dessa faixa, ocorre a têmpera do aço. Na temperatura ambiente ⁽⁷⁾, a microestrutura é composta de uma matriz ferrítica com carbonetos tipo $M_{23}C_6$.

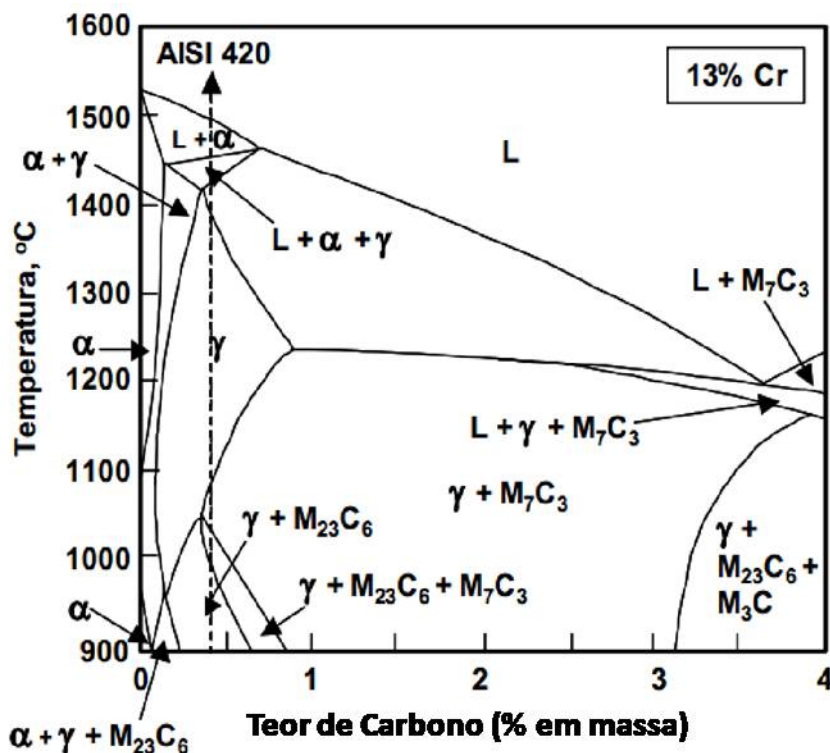


Figura 3.5 – Diagrama pseudobinário do sistema Fe-C-Cr (adaptado Pinedo – 2000)

A particularidade dos aços inoxidáveis martensíticos está na combinação de boa resistência à corrosão, devido principalmente ao elemento Cr em solução sólida, aliado à alta dureza, lhe conferindo resistência mecânica e, na maioria dos casos, resistência ao desgaste.

3.6 Estrutura Martensítica

A martensita é uma solução sólida intersticial de C na rede tetragonal de corpo centrado, TCC. Essa estrutura cristalina é intermediária entre as fases normais CFC e CCC. A transformação da fase austenítica para martensítica ocorre em alta velocidade devido ao superresfriamento, que faz com que os átomos de C não tenham tempo de sair da fase CFC por difusão, o que impede que a transformação de CFC para CCC se complete, originando a estrutura martensítica ⁽⁸⁾.

A Figura 3.6 mostra como ocorre a transformação da fase austenita para fase martensita, onde a austenita é representada por duas 2 células (CFC), Figura 3.6a, e o

prisma, Figura 3.6b, formado dentro das mesmas, representado pelas letras MNPQ e M'N'P'Q'. Esse prisma carregado com átomos de carbono tem configuração tetragonal correspondente à célula ferrítica (CCC), obtida pelo resfriamento lento (Figura 3.6c), entretanto com os parâmetros de rede são diferentes obtidos pela presença do carbono e superresfriamento, ocorre a transformação martensítica, Tetragonal de Corpo Centrado (TCC) formado pelos átomos de Fe e C.

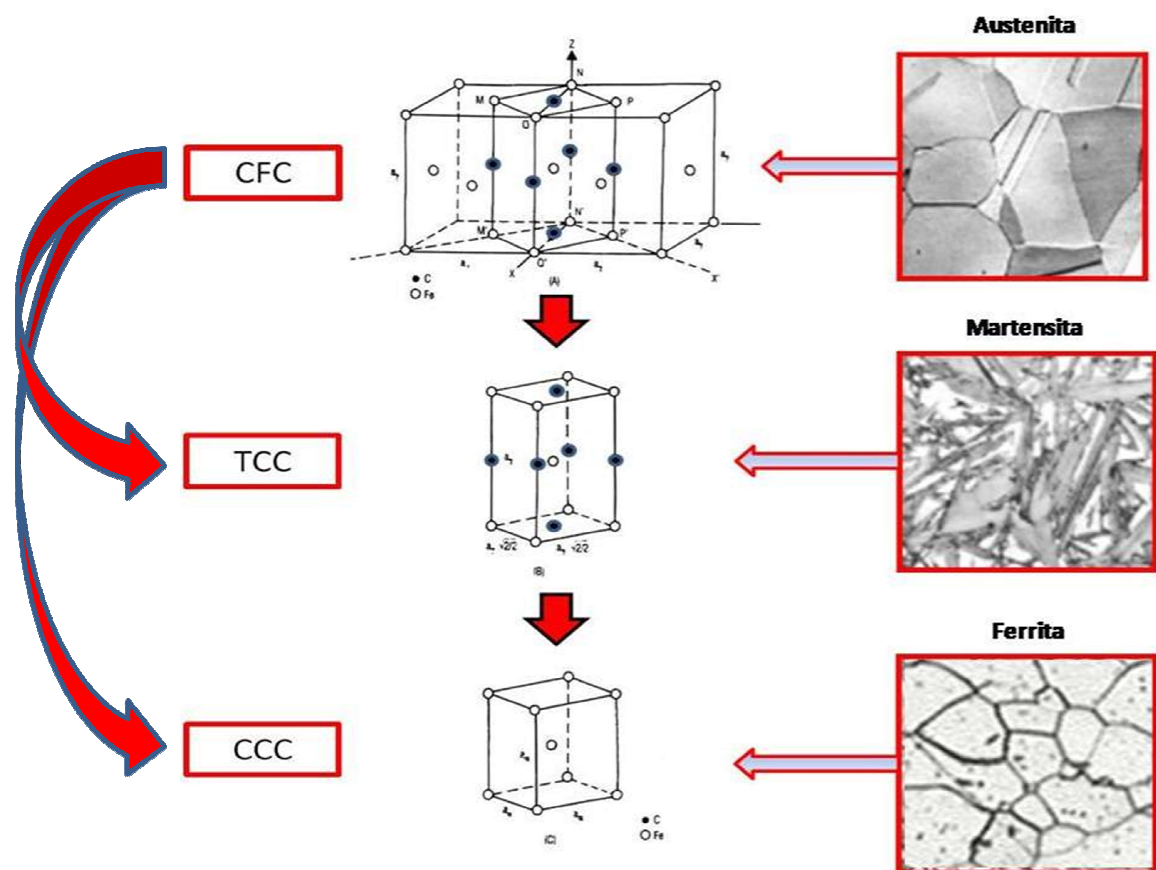


Figura 3.6 - Representação da transformação martensítica (adaptado de Galinari-2005)

Por ser uma transformação que depende da velocidade do superresfriamento abaixo de M_s , que é temperatura de início da transformação martensítica, ela não ocorre numa temperatura constante, como é o caso das transformações isotérmicas^(8,9).

A alta dureza da martensita é associada a elevada densidade de deslocações existente na estrutura, da ordem de $1.000 \text{ deslocações/cm}^2$, e são comparáveis com a densidade que se encontra em um metal severamente deformado a frio ^(10,21).

A presença dos átomos de carbono em solução intersticial na estrutura do ferro está relacionada à alta dureza uma vez que há uma deformação na rede. Esta tende a ser aliviada por uma redistribuição dos próprios átomos de carbono para posições mais favoráveis junto às deslocações ⁽¹¹⁾.

Em aços carbono martensíticos comuns, as duas principais morfologias da martensita são: em ripas e em placas. A martensita em ripas, ou massiva, é formada em aços que apresentam baixos teores de carbono, não superior a 0,6% em peso. Já a morfologia em placas, ou lenticular, o teor de carbono é superior 1%. Entre 0,6 e 1% C ⁽¹²⁾ forma-se uma microestrutura mista, como se pode observar na Figura 3.7.

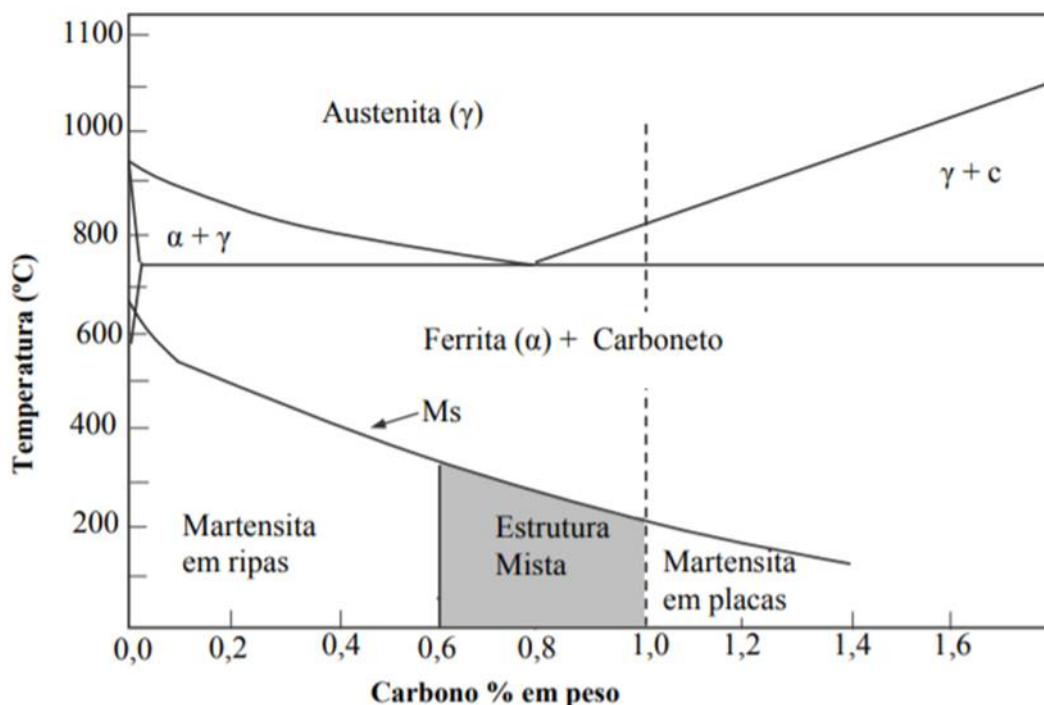


Figura 3.7 – Tipos de martensita formadas em uma liga Fe-C (adaptado de Gracioso - 2003)

A subestrutura característica da martensita em placas é formada por maclas, e na martensita em ripas é constituída de um denso emaranhado de deslocamentos, formando células. A subestrutura indica o modo com que ocorreu a acomodação plástica do sistema, com a finalidade de diminuir a energia gerada pela transformação martensítica ^(11,12).

A microestrutura do aço martensítico AISI 420 na condição de recozido é composto de ferrita e carbonetos dispersos. Dependendo da temperatura e do tempo de austenitização, a quantidade de carbonetos na matriz é variável. Após a têmpera, a fase martensita é majoritária na microestrutura, conforme visualizado na Figura 3.8 ⁽²⁶⁾. Entretanto, carbonetos ainda poderão ser visíveis, especialmente em temperatura de austenitização mais baixa ^(2,7).

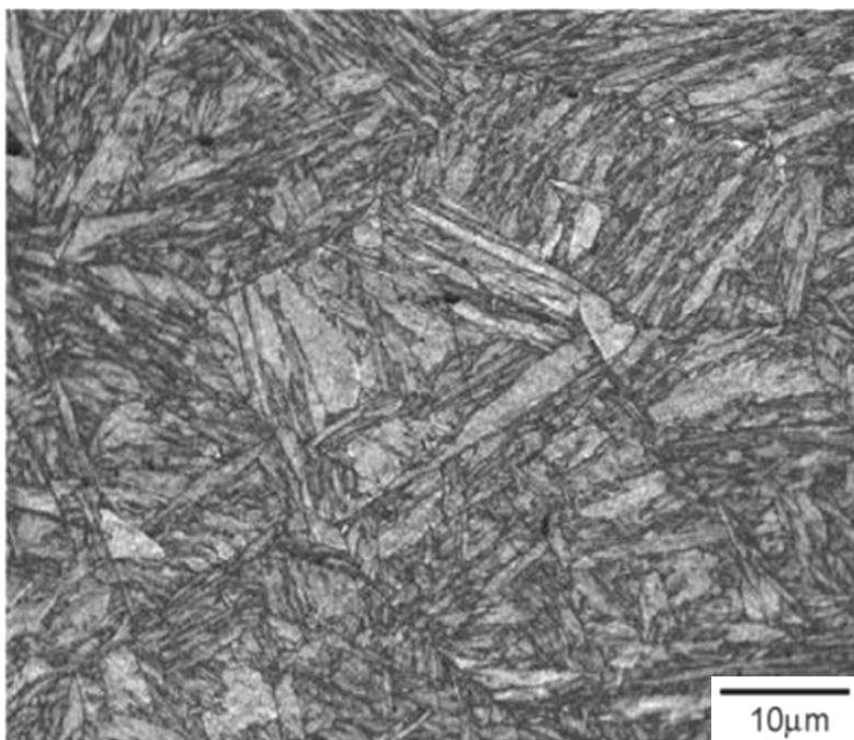


Figura 3.8 – Microestrutura de um aço inoxidável martensítico temperado (Fonte: KITAHARA et all, 2006)

3.7 Tratamentos Térmicos de Têmpera e Revenimento dos Aços Martensíticos

Na austenitização, o aquecimento deve ser tal que se atinja o campo da austenita obtendo o máximo de dissolução do carbono e outros elementos de liga. A austenitização deve ser realizada acima de Ac_3 , temperatura final da transformação da fase ferrita em austenita. Quando temperados a partir de temperaturas intermediárias, ou Intercrítico entre 800 e 930°C, desenvolvem durezas intermediárias entre materiais recozidos e temperados, além de uma estrutura martensítica heterogênea ^(8,14).

No esquema mostrado na Figura 3.9, é possível observar as diversas etapas de um ciclo de tratamento térmico de têmpera e revenimento para um aço AISI 420, típico para aplicação em cutelaria.

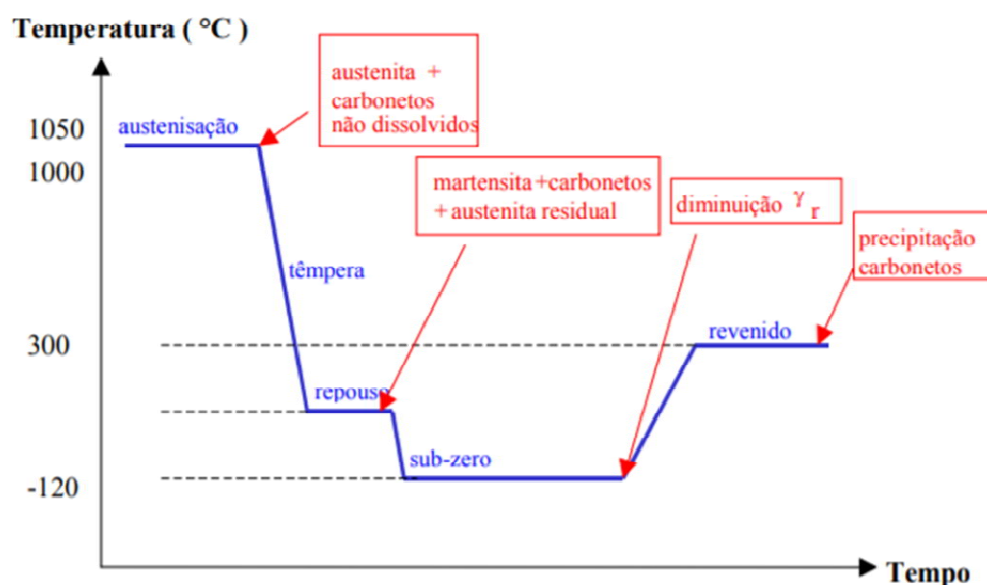


Figura 3.9 – Diagrama típico de um ciclo de tratamento térmico de têmpera e revenimento para um aço AISI 420 aplicado em cutelaria (adaptado de Galinari–2005)

O resfriamento rápido provoca a transformação de austenita em martensita. Essa transformação depende da temperatura de início de transformação martensítica, M_s , e termina em M_f , temperatura final de transformação martensítica. Este processo

usualmente ocorre em meios de resfriamento como água, ar forçado e óleo, principalmente.

Em alguns casos, em função da composição química da liga, a temperatura de MF fica abaixo da temperatura ambiente, o que leva a microestrutura final haver percentuais de austenita retida, não transformada, que deixa a dureza em valores abaixo do esperado. Para que seja alcançado o máximo de dureza do aço, é necessário efetuar um tratamento a baixíssimas temperaturas, subzero, para que obtenha a transformação de austenita retida em martensita logo após o processo de têmpera.

Revenimento é um processo de tratamento térmico executado após o endurecimento por têmpera e consiste no aquecimento dos aços martensíticos a temperaturas abaixo de AC1 para promover o alívio de tensões e melhoria da tenacidade e ductilidade. O revenimento envolve fenômenos de segregação do carbono em defeitos de rede e a precipitação de carbonetos, a decomposição da austenita retida e a recuperação e recristalização da estrutura martensítica podendo causar perdas das propriedades adquiridas no processo de têmpera ⁽²¹⁾

3.8 Propriedades dos Aços Martensíticos

3.8.1 Dureza

A dureza aumenta em função do aumento da temperatura de austenitização e também pode ser atribuída ao incremento do teor de Carbono e Cromo na martensita, devido à dissolução dos carbonetos de Cromo, aumentando a supersaturação da rede de martensita ^(14,16).

Na Figura 3.10 é mostrado o resultado de diversos pesquisadores que estudaram a variação de dureza em função do teor de Carbono, evidenciando que a dureza em ligas temperadas aumenta com o teor de carbono ⁽¹⁴⁾.

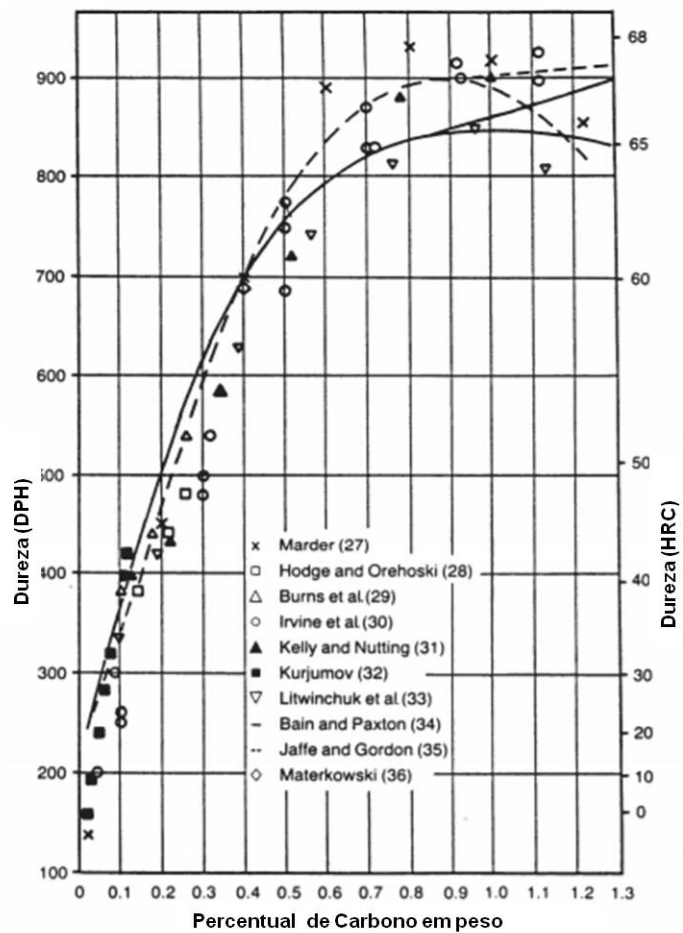


Figura 3.10 – Dureza em função do teor de carbono (adaptado de Krauss,1999)

Na Figura 3.11 têm-se o efeito da temperatura de austenitização na dureza do aço AISI 420. A alta dureza se deve à distribuição homogênea da martensita de ripas na microestrutura material ⁽¹⁷⁾.

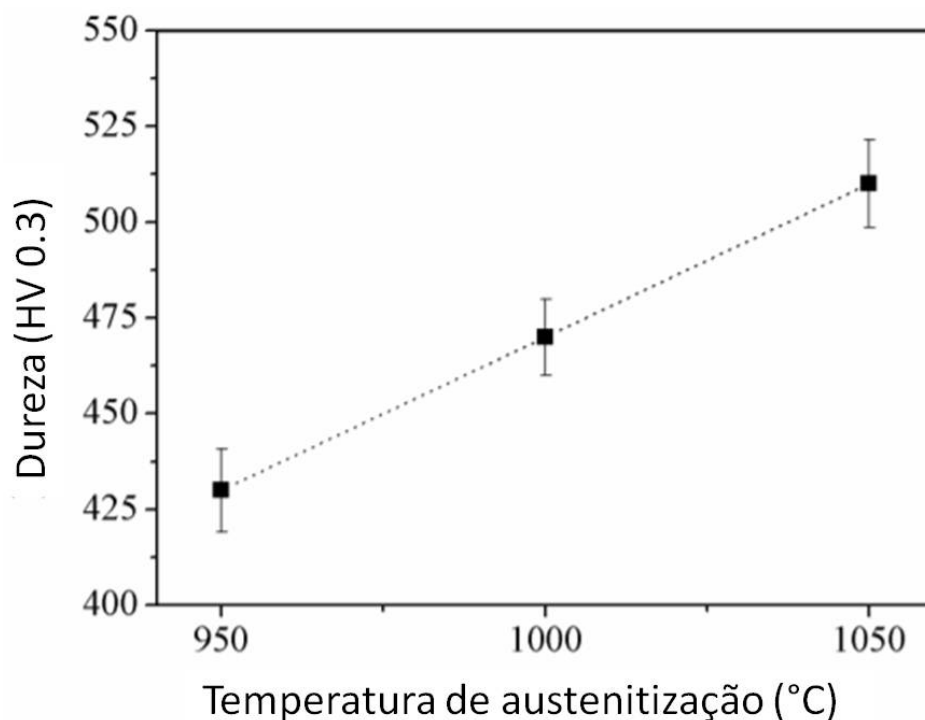


Figura 3.11 – Efeito da temperatura de austenitização na dureza de um aço AISI 420 (adaptado de Cheuer - 2014)

Estudos realizados com tratamentos térmicos de têmpera em temperaturas acima de 1.100 °C mostraram que a dureza do material tende a diminuir, devido à fração retida de austenita formada a partir dessas temperaturas ⁽¹⁶⁾.

3.8.2 Propriedades Mecânicas

A alta dureza e fragilidade dos aços inoxidáveis martensíticos quando somente temperado, é o resultado da transformação martensítica. O aumento da temperatura de austenitização, do teor de Cromo e Carbono dissolvido na martensita e da dissolução dos carbonetos de Cromo, resulta em propriedades mecânicas de elevados valores e alta fragilidade, o que torna a aplicação do aço limitada ^(18,19), necessitando tratamentos térmicos posteriores.

O revenimento realizado nos aços martensíticos em faixas de temperaturas controladas, e abaixo da temperatura crítica de recozimento, alivia as tensões induzidas devido ao processo de têmpera^(20,21).

Entretanto a recuperação da estrutura martensítica começa durante o revenimento, e certamente se torna uma característica importante deste processo e deve ser observada acima de 400 °C, uma vez que temperaturas mais altas tendem a precipitar carbonetos⁽²²⁾.

Na Figura 3.12 são mostrados os efeitos da temperatura de revenimento sobre as propriedades mecânicas de um aço temperado. As propriedades mecânicas, em princípio, não são afetadas significativamente⁽²²⁾.

Com o aumento gradativo da temperatura de revenimento observa-se uma ligeira melhora na ductilidade e sem queda significativa da resistência mecânica. Isto se deve ao fato de haver uma baixa taxa de difusão para formação de carbonetos a essa temperatura^(11,22).

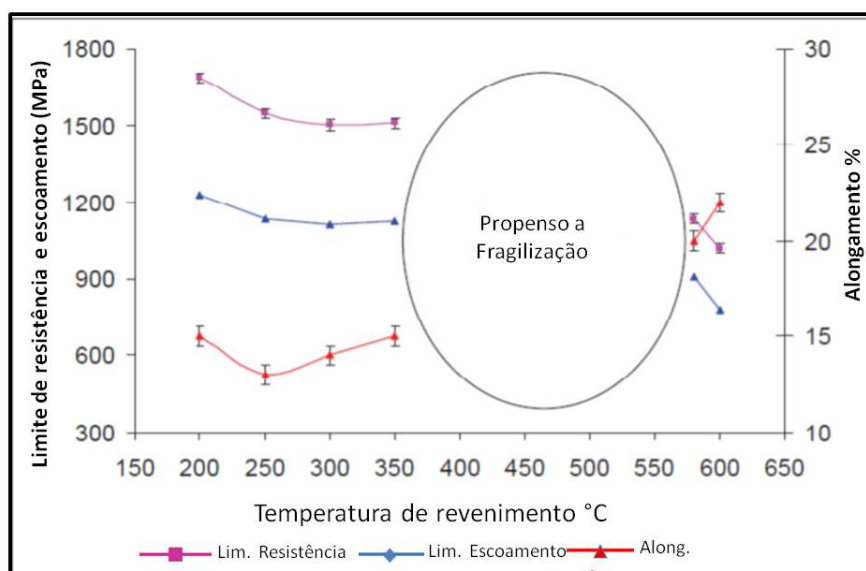


Figura 3.12 – Efeito da temperatura de revenimento sobre as propriedades mecânicas de um aço AISI 420 (adaptado de Amil Kumar - 2012)

3.8.3 Resistência ao Impacto

A tenacidade e a ductilidade dos aços inoxidáveis martensíticos são fortemente influenciados pela temperatura e tempo de austenitização bem como pelo revenimento. A energia de impacto aumenta em função do aumento da temperatura de austenitização. O revenimento da martensita após a têmpera aumenta sensivelmente a tenacidade e a ductilidade e, em alguns casos, sem redução substancial da resistência mecânica^(23,24).

A elevada dureza e resistência da martensita revenida está relacionada com a alta relação de área entre os contornos de grãos da matriz austenítica, pois estes agem como barreiras à movimentação das discordâncias durante a deformação plástica.

Alguns fatores tendem para a melhoria da energia de impacto, como a austenita retida dentro das ripas de martensita que absorve a energia de fratura e a redução da fração volumétrica de carbonetos, bem como a distribuição homogênea devido a temperaturas mais altas de austenitização^(24,30).

Na Figura 3.13 pode-se ver o efeito da temperatura e tempo de austenitização na energia de impacto de um aço AISI 420, onde notadamente, temperaturas maiores promovem a absorção de maior quantidade de energia.

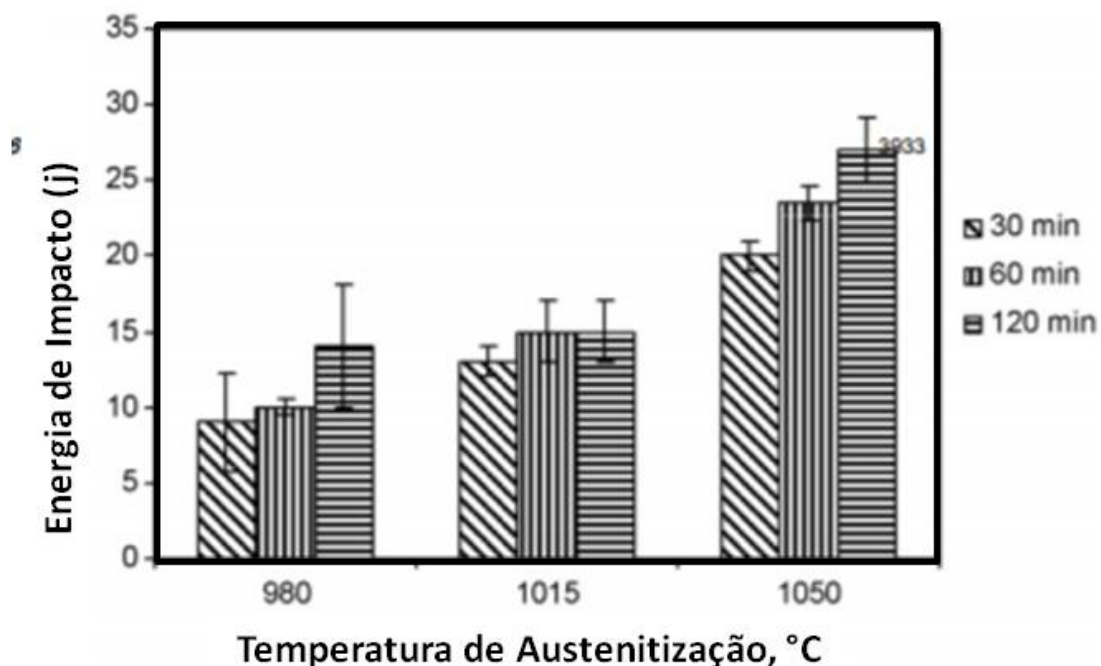


Figura 3.13 – Efeito da temperatura de austenitização sobre a energia de impacto – AISI 420 (adaptado de ISFAHANY - 2011)

A energia absorvida para romper o corpo de prova pode ser utilizado como controle de qualidade desses materiais. O ensaio consiste em tentar romper, por meio de um golpe de um pêndulo oscilando, um corpo-de-prova dotado de um entalhe no centro e apoiado em suas extremidades. A energia absorvida é geralmente determinada em Joules, sendo uma medida da resistência ao impacto do material⁽³³⁾.

3.8.4 Resistência à corrosão

Todos os aços são propensos à corrosão, entretanto os aços inoxidáveis são muito mais resistentes à corrosão que os aços carbono na maioria dos meios devido ao maior teor de Cromo. Assim, as propriedades de aços inoxidáveis martensíticos frente à resistência a corrosão são fortemente influenciados pelo teor de Cromo e Carbono e outros elementos de liga, temperatura de austenitização e revenimento⁽²⁵⁾.

A temperatura de austenitização não deve ser muito baixa devido a não dissolução dos carbonetos e também não deve ser muito alta, para evitar o crescimento acentuado dos grãos austeníticos. Sob esta ótica, atende-se ao objetivo de obter uma martensita homogênea, com excelentes propriedades mecânicas e de resistência à corrosão ^(13,).

Na Figura 3.14 tem-se o efeito da temperatura de austenitização na perda de massa de um aço AISI 420 por corrosão onde, neste estudo ficou evidenciado que numa maior temperatura de austenitização há a tendência de perda de resistência a corrosão e pode estar relacionado ao aumento das discordâncias internas ⁽¹³⁾.

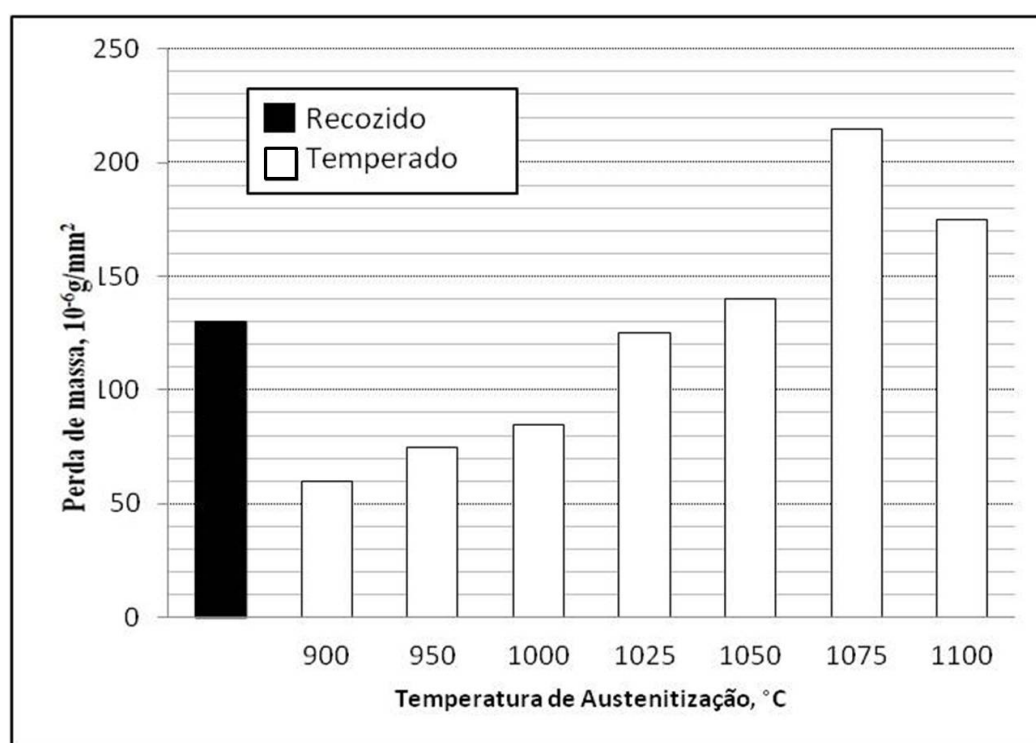


Figura 3.14 – Efeito da temperatura de austenitização na perda de massa por corrosão - AISI 420 (adaptado de Candelária - 2003)

3.9 Produção dos Aços Inoxidáveis Martensíticos

No esquema da Figura 3.15, pode-se ver o fluxo de produção dos aços inoxidáveis na Aperam, onde os aços inoxidáveis martensíticos AISI 420 são produzidos a partir de metal líquido (gusa) proveniente dos altos fornos, ou através de sucata fundida em fornos elétricos a arco. Na Aciaria, este metal líquido passa por acerto de composição

química com adições de elementos de liga que irão transformá-lo em aço inoxidável, sendo posteriormente lingotado em processo contínuo derivando placas com espessura de 200 mm.

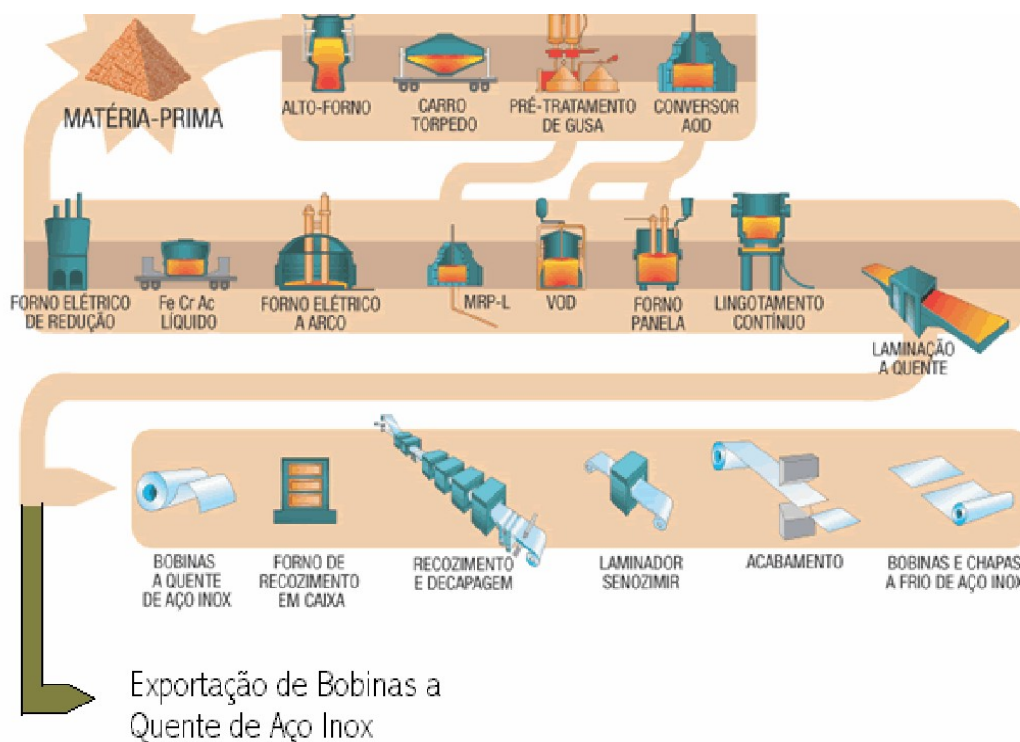


Figura 3.15 – Desenho esquemático da produção dos aços inoxidáveis (Fonte: APERAM, 2019)

A Figura 3.15 mostra o esquema do fluxo de produção dos aços inoxidáveis na Aperam South America ⁽³⁵⁾ Essas placas são destinadas à laminação a quente, e laminadas em um laminador de desbaste tipo “*Rougher*”, seguido de processo em laminador acabador tipo “*Steckel*”, em temperatura acima de 1.000°C para espessuras entre 3 e 8 mm. Após todo o processo de laminação a quente o material é bobinado, recebendo a nomenclatura de BQP, ou bobina preta.

Durante a laminação a quente, o aço inoxidável martensítico é laminado no campo austenítico, e ao ser bobinado, inevitavelmente há a formação de fase martensítica durante o resfriamento, conforme Figura 3.16a. A martensita é descomposta durante o processo de recozimento em caixa (Box) com um ciclo superior a 50 horas,

promovendo a formação de ferrita e distribuição de carbonetos de Cromo, Figura 3.16b, e alívio de tensões, com conseqüente aumento da ductilidade.

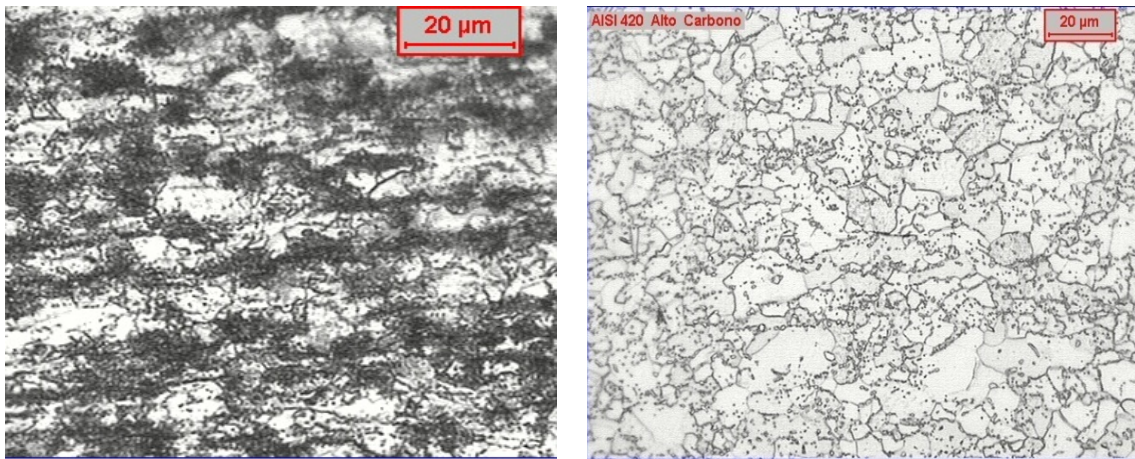


Figura 3.16 – Microestrutura típica do aço AISI 420 (a) Deformado após LTQ e (b) ferrítico após recozimento em caixa (Fonte: autor, 2020)

A BQP, após a etapa de recozimento, é decapada em uma linha contínua com objetivo de retirar todo o oxido formado na superfície, sendo denominada nesta condição BQB, ou bobina branca. Após este processo, o material está apto a ser destinado ao mercado, que é caso das amostras retiradas para este trabalho, ou seguir o processo de laminação a frio para espessuras menores.

4 METODOLOGIA

4.1 Materiais Utilizados

Os materiais para esta pesquisa foram dois aços Inoxidáveis Martensíticos tipo AISI 420⁽³⁶⁾, produzidos pela empresa Aperam South America. A diferença básica entre os dois materiais está no teor de Carbono, sendo que o aço inoxidável denominado internamente de **P420D** tem teor de carbono na ordem de **0,18%** e o aço **P420A** tem teor de carbono na ordem de **0,32%**. A composição química das amostras de ambos os aços está na Tabela 1.

Tabela 1 – Composições químicas dos aços estudados [% em massa].

Aço Aperam	AISI	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	N (PPM)
P420D	420	0,182	0,21	0,37	0,027	0,0014	12,15	0,15	125
P420A	420	0,319	0,28	0,40	0,028	0,0011	12,18	0,19	137

Fonte: Autor

As amostras foram retiradas do meio de bobina, após o processo de recozimento em caixa e decapagem contínua, com espessura nominal de 6 mm. A região escolhida para amostragem foi devido haver menor variação de temperatura decorrente de processos anteriores. De cada aço estudado, foram retirados corpos de prova para a realização dos tratamentos térmicos, ensaios de tração, metalografia e ensaio de impacto Charpy.

4.2 Simulações Termodinâmicas e Planejamento do Processamento Térmico

Para maior assertividade das temperaturas de transformação da fase, ferrita-austenita, sendo a base para as temperaturas de tratamento térmico propostas neste estudo, foram executadas diversas simulações computacionais usando o software ThermoCalc[®].

Baseado na composição química dos aços estudados, a faixa de transição do campo bifásico das fases ferrita-austenita para ao campo somente austenítico AC3 calculada e

no estado de equilíbrio, é em torno de 835 °C para o aço P420D Conforme Figura 4.1 e 820°C para o aço P420A conforme Figura 4.2.

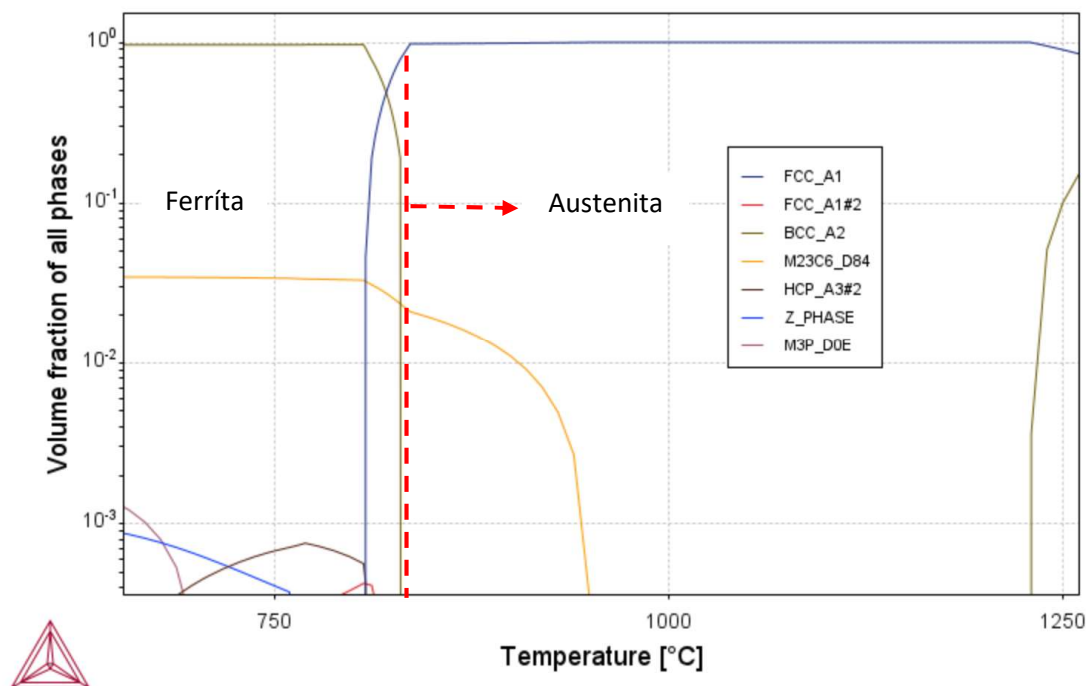


Figura 4.1 – Simulação da transformação de fase do P420D executada por software ThermoCalc.

Para uma completa austenitização dos dois aços, seria necessário objetivar temperaturas superiores a 850 °C, contemplando ambos os aços, com um fator de segurança. Assim sendo, as temperaturas de austenitização foi 950°C, 1000°C 1050°C e 1100°C foram escolhidas para a realização do estudo, garantindo-as dentro do campo austenítico.

O tempo de encharque empregado foi 5 minutos, o que proporcionaria a completa austenitização e conseqüente transformação martensítica durante o processo de têmpera dos materiais. A taxa de aquecimento para as austenitizações estudadas não foi projetada, uma vez que as amostras tinham a mesma espessura e o forno estar sempre na temperatura de ensaio.

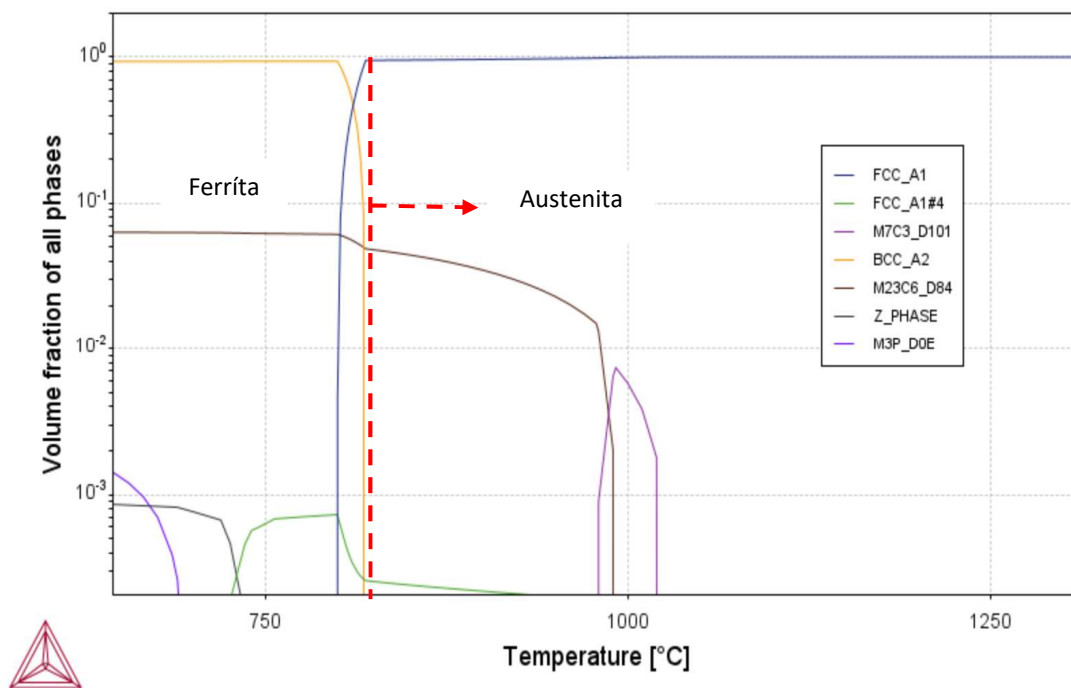


Figura 4.2 – Simulação da transformação de fase do P420A executada por software ThermoCalc.

O processamento térmico das amostras foi realizado em escala laboratorial, utilizando fornos estacionários conforme fluxograma de processamento térmico, Figura 4.3.

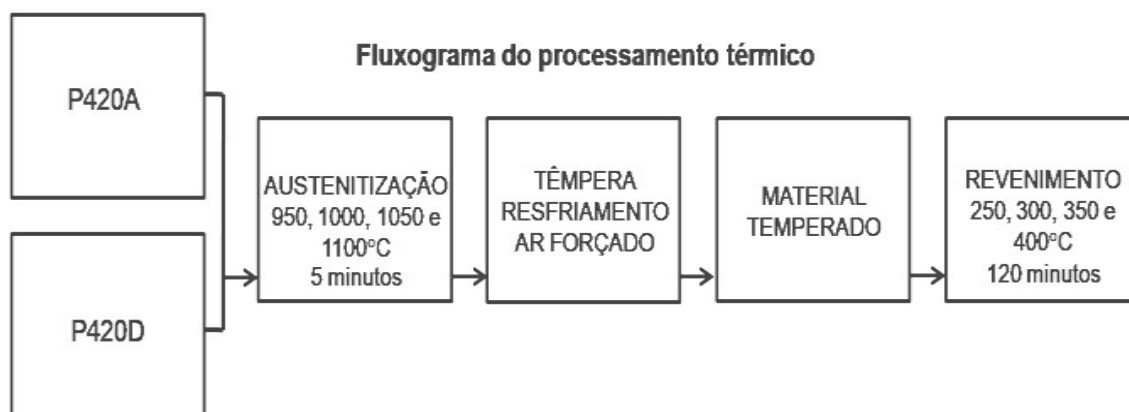


Figura 4.3 – Fluxograma do processamento térmico

4.3 Processos de Austenitização e Têmpera

Para o processo de austenitização e têmpera foi utilizado um forno resistivo, de câmara refratária com atmosfera inerte de gás nitrogênio. A temperatura máxima de operação chega a 1400 °C, da marca Combustol, Figura 4.4.



Figura 4.4 - Forno resistivo Combustol usado na austenitização das amostras.

As amostras foram colocadas dentro do forno numa base metálica em aço AISI 310 na região central do forno garantindo que todas as amostras estariam sobre a mesma região do forno e não houvesse variação de temperatura.

Os tratamentos térmicos foram realizados conforme as temperaturas e tempos de austenitização propostos, depois temperadas durante o resfriamento realizado ao ar forçado, utilizando um soprador tipo ciclone de sopro inferior e superior conforme visualizado na figura 4.6.

A opção pelo resfriamento ao ar forçado em detrimento a outros, se deu ao fato de os aços inoxidáveis martensíticos terem elevada temperabilidade, e que resfriamentos muito bruscos poderiam causar trincas e danificar seriamente os corpos de prova.

A Figura 4.5 mostra as curvas obtidas durante a austenitização e têmpera das amostras nas diferentes temperaturas, onde é possível visualizar a rampa de aquecimento, encharque e resfriamento.

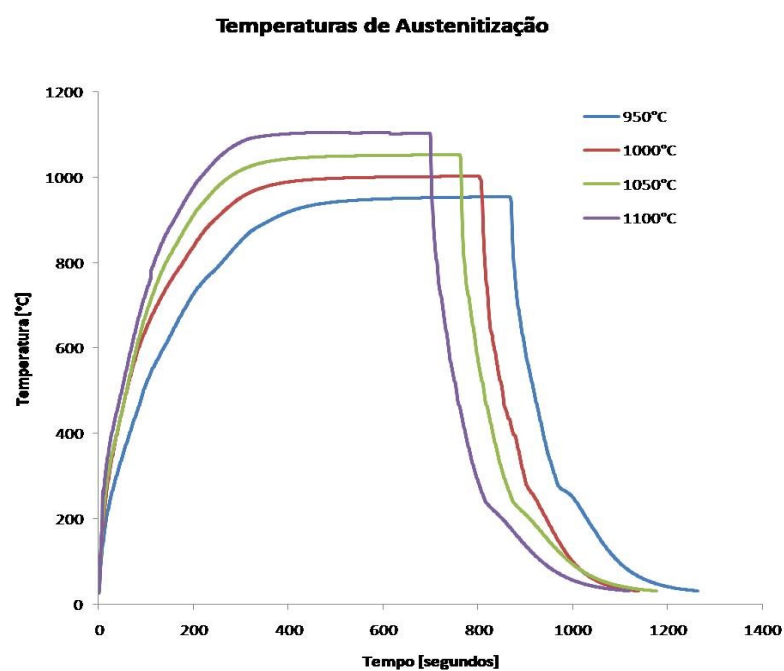


Figura 4.5 – Curvas obtidas durante a austenitização e têmpera das amostras.



Figura 4.6 - Ciclone de ar forçado usado na têmpera das amostras.

4.4 Processos de Revenimento

O revenimento foi realizado em quatro temperaturas sendo 250, 300, 350 e 400 °C, com tempo de encharque de 120 minutos, seguido de resfriamento a ar livre. As temperaturas de revenimento e tempo de encharque escolhidas se deu em função de dois fatores:

- Os produtores que utilizam os aços inoxidáveis martensíticos, utilizam esta faixa de temperatura como receita do seu processo e via de regra usam de forma arbitrária.
- Segundo a literatura, temperaturas acima de 400°C tendem a ser deletéria de propriedades, através da dissociação da fase martensítica e precipitação de carbonetos.

Par a realização do revenimento, foi utilizado um forno elétrico resistivo tipo mulfla da marca EDG, com temperatura máxima de operação a 1200 °C sem atmosfera controlada, onde as amostras foram dispostas de forma separadas umas das outras em uma bandeja. A Figura 4.6 apresenta o forno resistivo EDG usado nos ensaios.



Figura 4.7 - Forno resistivo, usado nos tratamentos térmicos de revenimento.

Todo o ciclo térmico, temperatura e tempo de processamento, foram controlados e registrados através de termopares tipo K de 1,5 mm com bainha de iconel 600 inserido nas amostras através de um registrador de dados da marca Yokogawa MV1000 quatro canais, conforme visualizado na Figura 4.8.



Figura 4.8 - Registrador de dados usado na medição das temperaturas de têmpera e revenimento das amostras.

De modo geral, todo processamento térmico das amostras seguiu conforme o fluxograma proposto. Na Figura 4.9 há uma representação esquemática do ciclo de tratamento térmico usado para o processamento das amostras nas diferentes temperaturas de austenitização e revenimento.

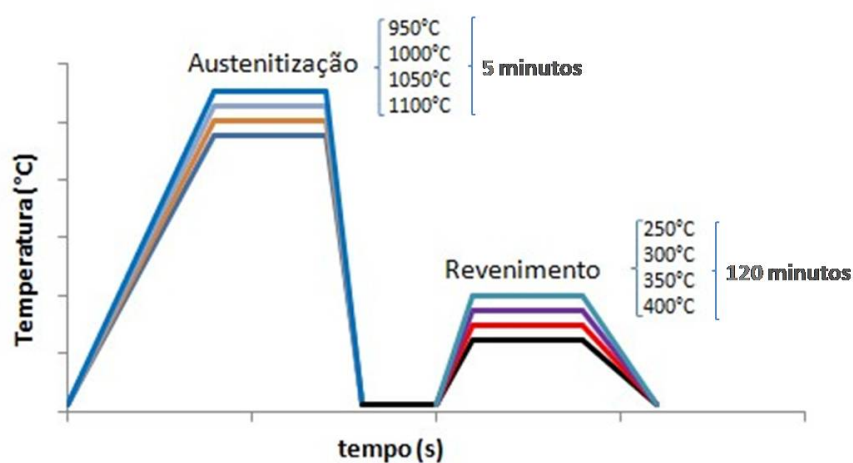


Figura 4.9 – Representação esquemática do ciclo de tratamento térmico usado para o processamento das amostras.

4.5 Caracterizações dos Materiais

4.5.1 Composição Química

A análise química das amostras foi executada pelas seguintes técnicas:

- C e S analisados pela técnica de absorção de infravermelho no equipamento do fabricante Leco, modelo *CS444*[®];
- N analisado pela técnica de termocondutividade no equipamento do fabricante Leco, modelo *TC436*[®];
- Os demais elementos químicos pela técnica de espectrometria de fluorescência de raios x no equipamento do fabricante ThermoARL, modelo 9900;

4.5.2 Ensaio de Tração

Os corpos de prova de secção retangular foram retiradas com o sentido de laminação na cota do comprimento e confeccionados conforme a norma ASTM E8M – 13A⁽³⁷⁾, sendo preparados antes do processamento térmico. Na Figura 4.10 estão as dimensões dos corpos de prova conforme a norma citada acima.

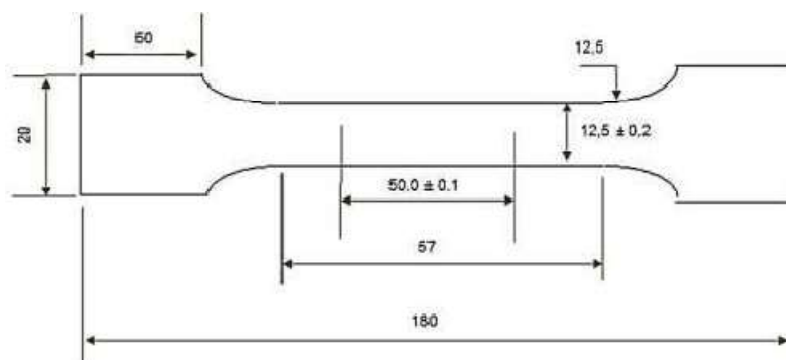


Figura 4.10 - Dimensões em milímetros do corpo de prova para ensaio de tração conforme norma ASTM – E8/E8M-13A.

Foram realizados três ensaios para determinação do valor médio de cada propriedade, sendo utilizada uma máquina de ensaio universal, marca SHIMADZU Corp. na velocidade de deformação de 5mm/min.

4.5.3 Metalografia Ótica

O procedimento de preparação das amostras para a análise metalográfica foi realizado por meio das seguintes etapas: Corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico. Cortou-se um espécime metalográfica da região central da espessura e no sentido longitudinal de cada condição de tratamento térmico realizada, por meio de discos de corte abrasivo.

Para o embutimento a quente, utilizou-se resina tipo baquelite. Em seguida, lixamento com lixas de grana de #120, #220, #320, #500 e #600 na lixadeira da marca Struers Abramin-A, por aproximadamente 150s para cada lixa. Após esta etapa a amostra foi polida com agente polidor de diamante (DP-Spray P) nos tamanhos de 9 , 3 e 1 μm na politriz da marca Struers Abramin-B, durante aproximadamente 420s para cada abrasivo.

As espécimes metalográficas das amostras foram atacadas com reativo Vilella (95 ml de álcool etílico, 1 g de ácido pícrico e 3 ml de HCl), com o tempo de imersão de 50s. Para finalizar a amostra foi lavada com água, álcool e seca ao ar quente.

As amostras foram examinadas na seção longitudinal à direção de laminação, ao longo da espessura. Utilizou-se um microscópio ótico, marca LEICA, equipado com uma câmera digital com resolução de 640 X 480 pixels.

4.5.4 Ensaios de Resistência à Corrosão

Foram executados ensaios para determinação da resistência a corrosão por pite em solução 3,5% NaCl a 25 °C – Ph 8, com cinco amostras em cada condição de

tratamento térmico, avaliado segundo a norma ASTM G-61[37] ⁽³⁹⁾. O equipamento usado foi um potenciostato da marca EG&G modelo 273AA.

4.5.5 Análise MEV- FEG - EBSD

Foi utilizado o MEV-FEG, marca FEI modelo Quanta 250 do Centro de Pesquisa da Aperam South América, com dispositivo de aquisição de EBSD – Difração de Elétrons Retro Espalhados, numa área de varredura de 75 x 150 μm e o passe de 0,20 μm . As análises dos resultados e composição das imagens foram realizadas no software OIM Analysis.

4.5.6 Ensaio de Dureza

Avaliação da dureza dos materiais foi realizada na superfície previamente lixada com lixa #200 e medição se deu pela média de cinco medidas usando a escala em (HRC), utilizando o durômetro da marca INSTRON WOLPERT, modelo Testor 930 do Centro de Pesquisa da Aperam South América.

4.5.7 Ensaio de Impacto – Charpy

Os corpos de prova de secção retangular foram confeccionados conforme a norma ASTM E23-07A ⁽³⁸⁾, sendo preparados antes do processamento térmico.

Na Figura 4.11 estão as dimensões dos corpos de prova conforme a norma citada acima.

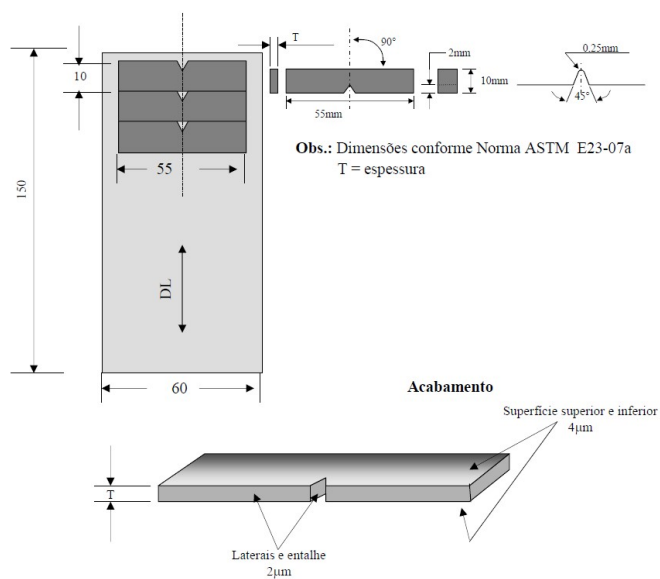


Figura 4.11 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de impacto conforme Norma ASTM E23-07a

Foram ensaiados cinco corpos de prova de cada condição de tratamento térmico para determinação do valor médio de energia absorvida além da determinação da temperatura de transição dúctil-frágil. A espessura utilizada foi ajustada em 5,0 mm através de usinagem.

O entalhe em “V” dos corpos de prova previamente tratados termicamente foi usinado pela técnica de eletroerosão a fio, executado numa máquina modelo EURO FW2 da EUROSTEC, nos laboratórios da UNIFEI – Campus ITABIRA – MG

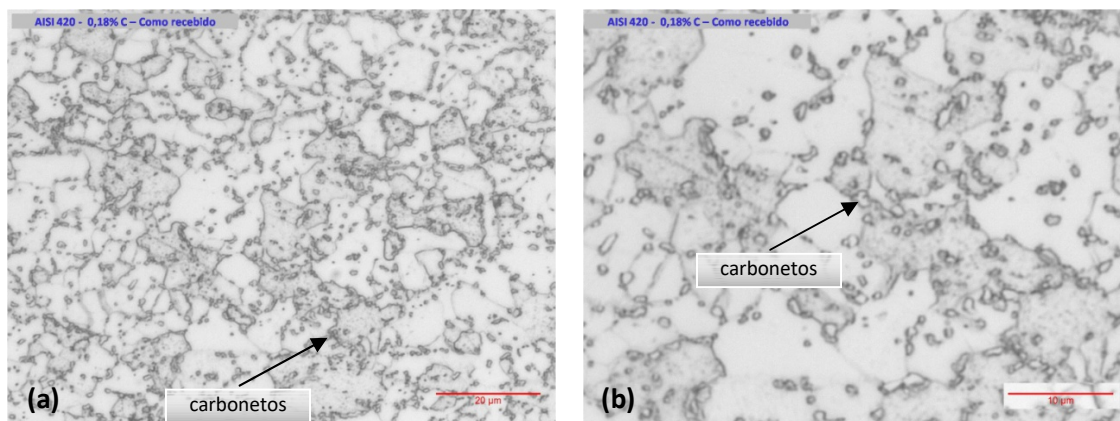
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização do material

5.1.1 Microestrutura como recebido

A microestrutura das amostras dos aços como recebido, é constituída de ferrita e carbonetos esferoidizados e dispersos nesta matriz, resultado do recozimento em caixa no qual foram submetidos em processo industrial.

As imagens das microestruturas podem ser avaliadas na Figuras 5.1 onde o aço P420D, (a) e (b), apresenta os grão ferríticos maiores que o aço P420A, (c) e (d). Entretanto a densidade de carbonetos de Cromo é maior no aço P420A cujo teor de carbono é de 0,32%. Isto se dá em função da maior quantidade de Carbono disponível e a afinidade do mesmo ao Cromo.



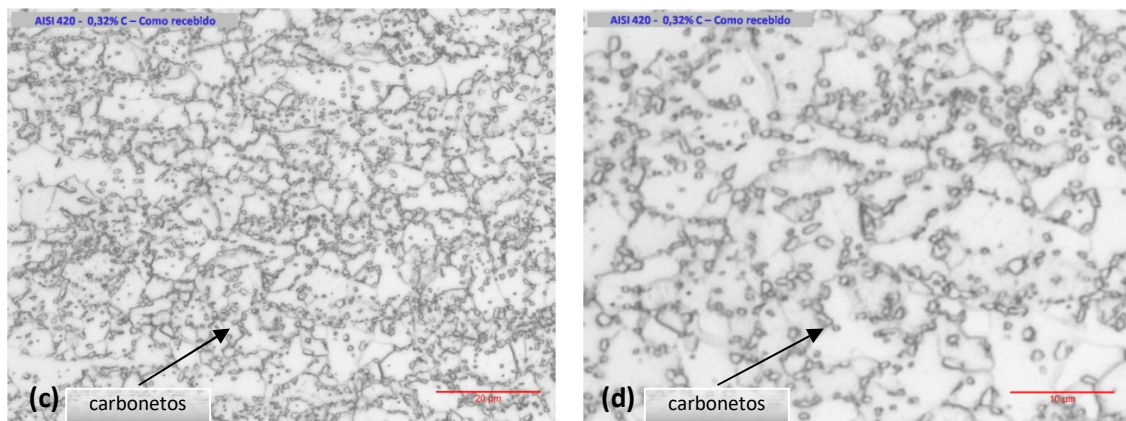
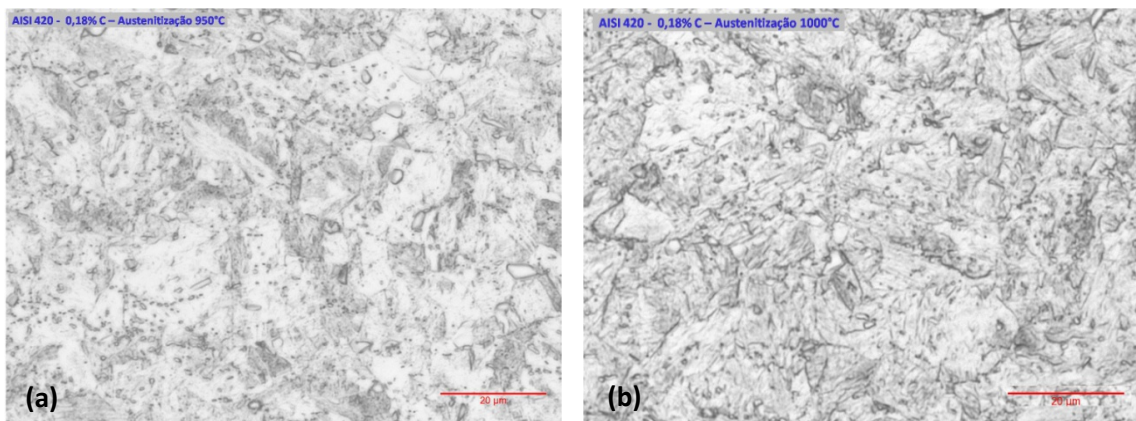


Figura 5.1 – P420D como recebido (a) e (b); P420A como recebido (c) e (d)

5.1.2 Microestrutura após Austenitização e Têmpera

As amostras após serem austenitizadas em quatro temperaturas distintas e submetidas ao processo de têmpera têm de forma geral, microestrutura martensítica fina tipo ripas, com alguns carbonetos esferoidizados e dispersos nesta matriz, quando comparado com a microestrutura das amostras como recebida.

O aço P420D, processado na temperatura de austenitização de 950°C conforme Figura 5.2 (a), apresenta microestrutura martensítica com relevante quantidade de carbonetos. Estes vão diminuindo significativamente com o aumento da temperatura de austenitização, (Figura 5.2 (b)), (Figura 5.2 (c)) e (Figura 5.2 (d)), estando de acordo com a literatura⁽²⁵⁻³¹⁻³²⁾ até desaparecerem a partir da temperatura de 1050°C.



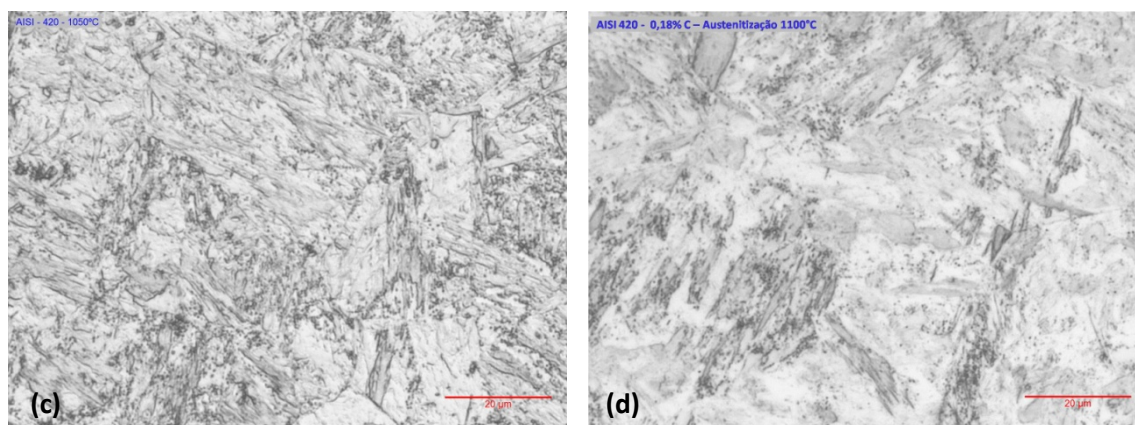


Figura 5.2 – Aço P420D austenitizado nas temperaturas de (a) 950, (b) 1000, (c) 1050 e (d) 1100°C

A temperatura e o tempo de encharque em 1050°C e 1100°C foram suficientes para que houvesse a dissolução completa dos carbonetos de Cromo, e o fato do baixo teor de carbono deste aço, contribuiu nesse fenômeno.

O aço P420A também apresentou à temperatura de austenitização de 950°C, microestrutura martensítica com relevante quantidade de carbonetos, conforme Figura 5.3 (a) e que vão diminuindo com o aumento da temperatura de austenitização, Figura 5.3 (b), Figura 5.3 (c), e Figura 5.3 (d). Porém a partir da temperatura de 1050°C, ao contrário do exemplo ocorrido com o aço P420D, permanecem ainda alguns poucos carbonetos não dissolvidos.

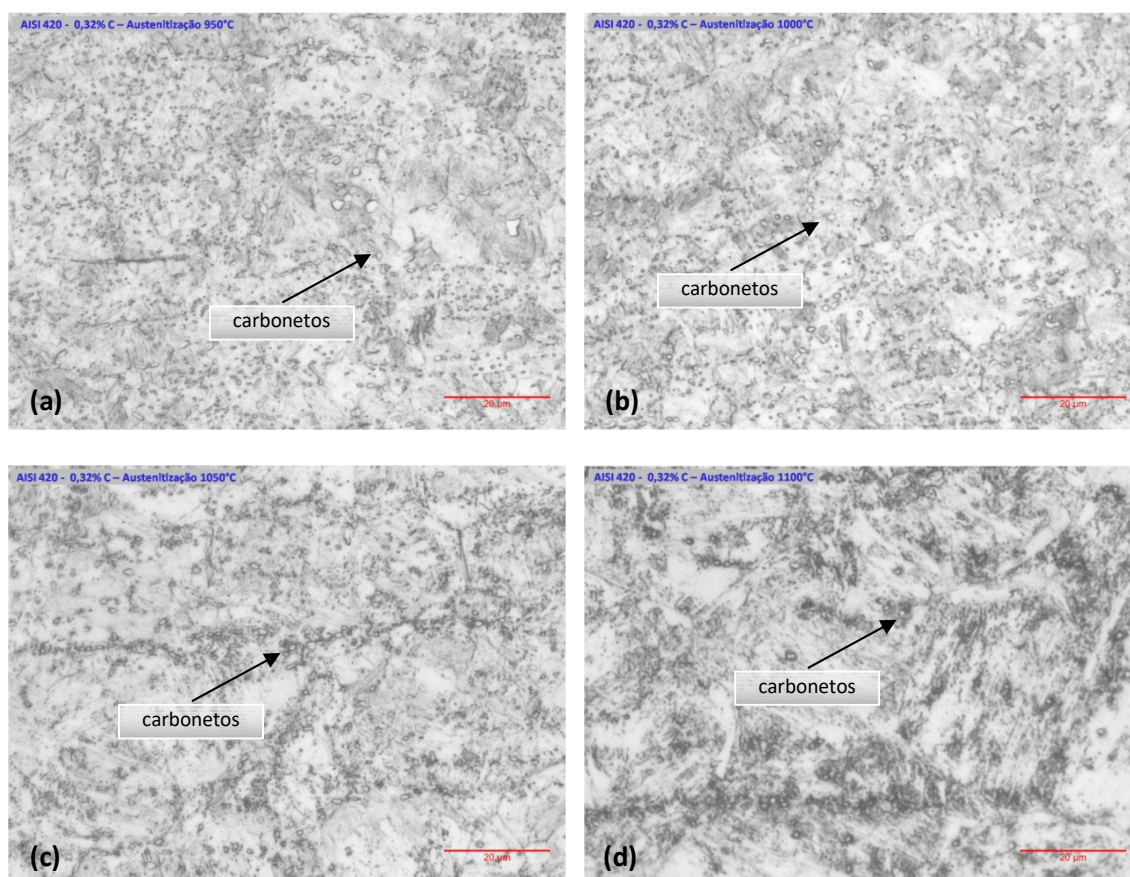


Figura 5.3 – Aço P420A austenitizado nas temperaturas de (a) 950 (b) 1000 (c) 1050 e (d) 1100°C

5.1.3 Microestrutura do aço P420D após Têmpera e Revenimento

O aço P420D após o processo de têmpera e revenimento é mostrado na Figura 5.4, que ilustra a microestrutura das amostras que foram austenitizadas a 950°C e revenidas a 250°C (Figura 5.4 (a)), 300°C (Figura 5.4 (b)), 350°C (Figura 5.4 (c)) e 400°C (Figura 5.4 (d)), onde é possível visualizar que não há uma mudança significativa da microestrutura entre 250 e 400°C, sendo mantida a fase martensítica e carbonetos de cromo não dissolvidos.

A temperatura de revenimento até 450°C não é suficiente para a precipitação de carbonetos, ocorrendo assim somente o alívio de tensões derivadas do processo de têmpera.

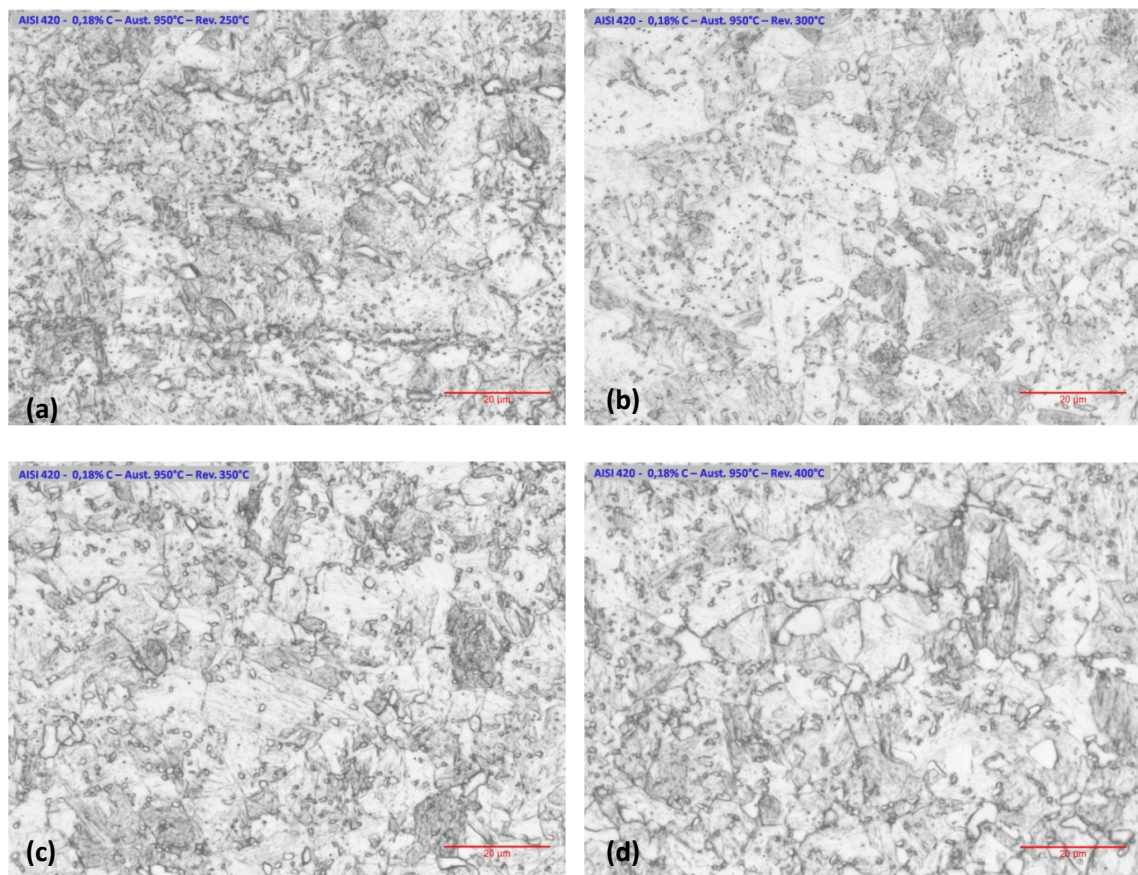


Figura 5.4 – Aço P420D austenitizado em 950°C e revenido em (a) 250 (b) 300 (c)350 e (d) 400°C.

Na Figura 5.5 é mostrado que processo de têmpera e revenimento nas amostras que foram austenitizadas a 1000°C e revenidas a 250°C (Figura 5.5 (a)), 300°C (Figura 5.5 (b)), 350°C (Figura 5.5 (c)) e 400°C (Figura 5.5 (d)) para o aço P420D também não esboçou mudança significativa da microestrutura, sendo mantida a fase martensítica e carbonetos de cromo não dissolvidos.

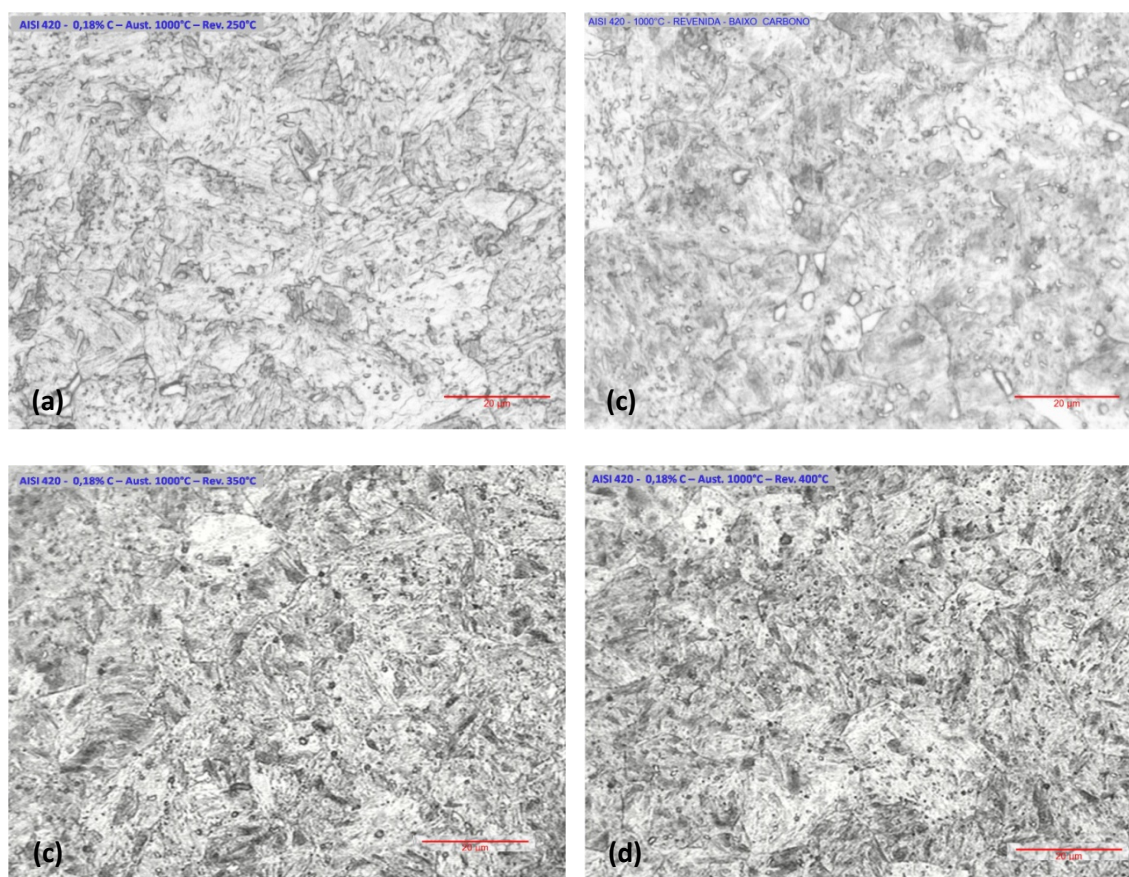


Figura 5.5 – Aço P420D austenitizado em 1000°C e revenido em (a) 250 (b) 300 (c) 350 e (d) 400°C

A Figura 5.6 mostra a microestruturas do aço P420D após o processo de têmpera e revenimento referentes às amostras que foram austenitizadas a 1050°C e revenidas a 250°C (Figura 5.6 (a)), 300°C (Figura 5.6 (b)), 350°C (Figura 5.6 (c)) e 400°C (Figura 5.6 (d)) e Figura 5.7 mostra a microestruturas do aço P420D austenitizadas a 1100°C respectivamente e revenidas a 250°C (Figura 5.7 (a)), 300°C (Figura 5.7 (b)), 350°C (Figura 5.7 (c)) e 400°C (Figura 5.7 (d)).

Elas seguem o mesmo padrão de não alteração microestrutural, entretanto nestas temperaturas de austenitização houve um crescimento do grão prévio da austenita, os contornos dos mesmos foram evidenciados pelo processo de revenimento.

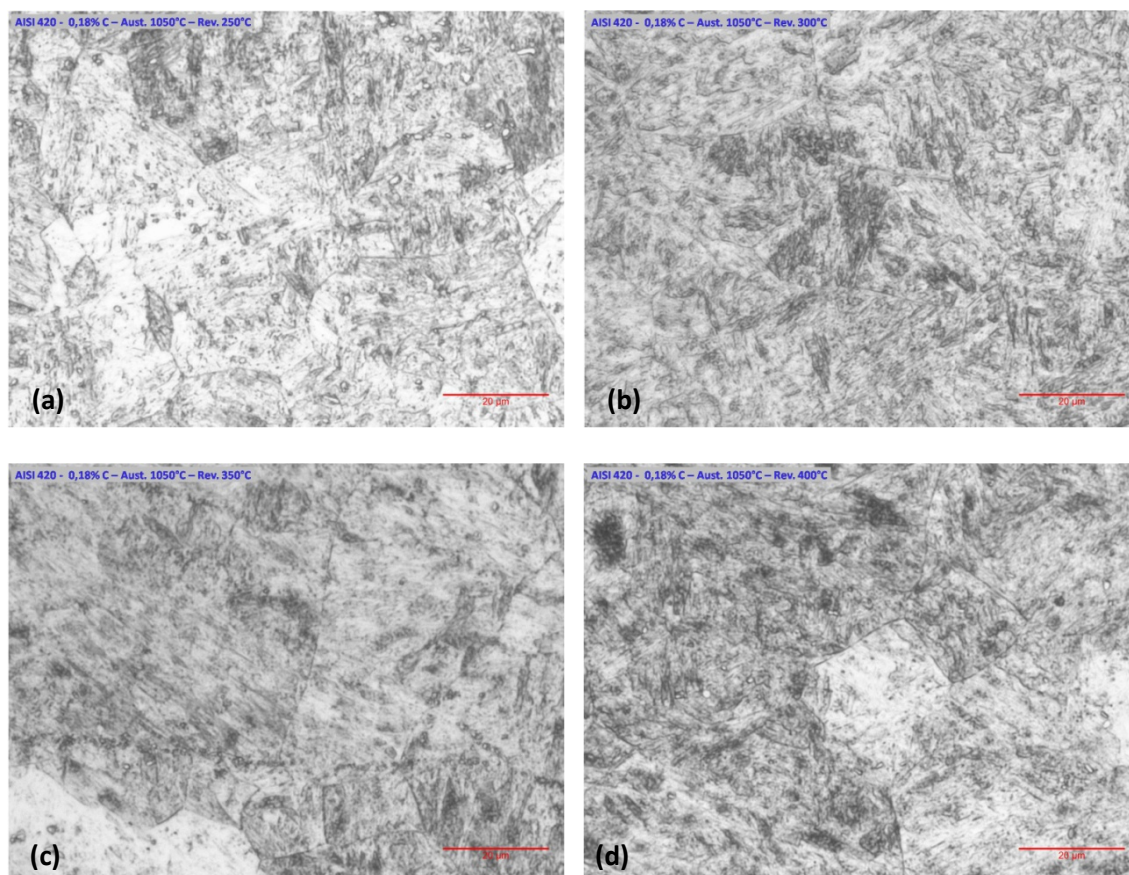


Figura 5.6 – Aço P420D austenitizado em 1050°C e revenido em (a) 250 (b) 300 (c) 350 e (d) 400°C.

Aço P420D revenido em quatro temperaturas distintas a partir da têmpera em 1100 °C de temperatura de austenitização pode ser visualizado na Figura 5.7.

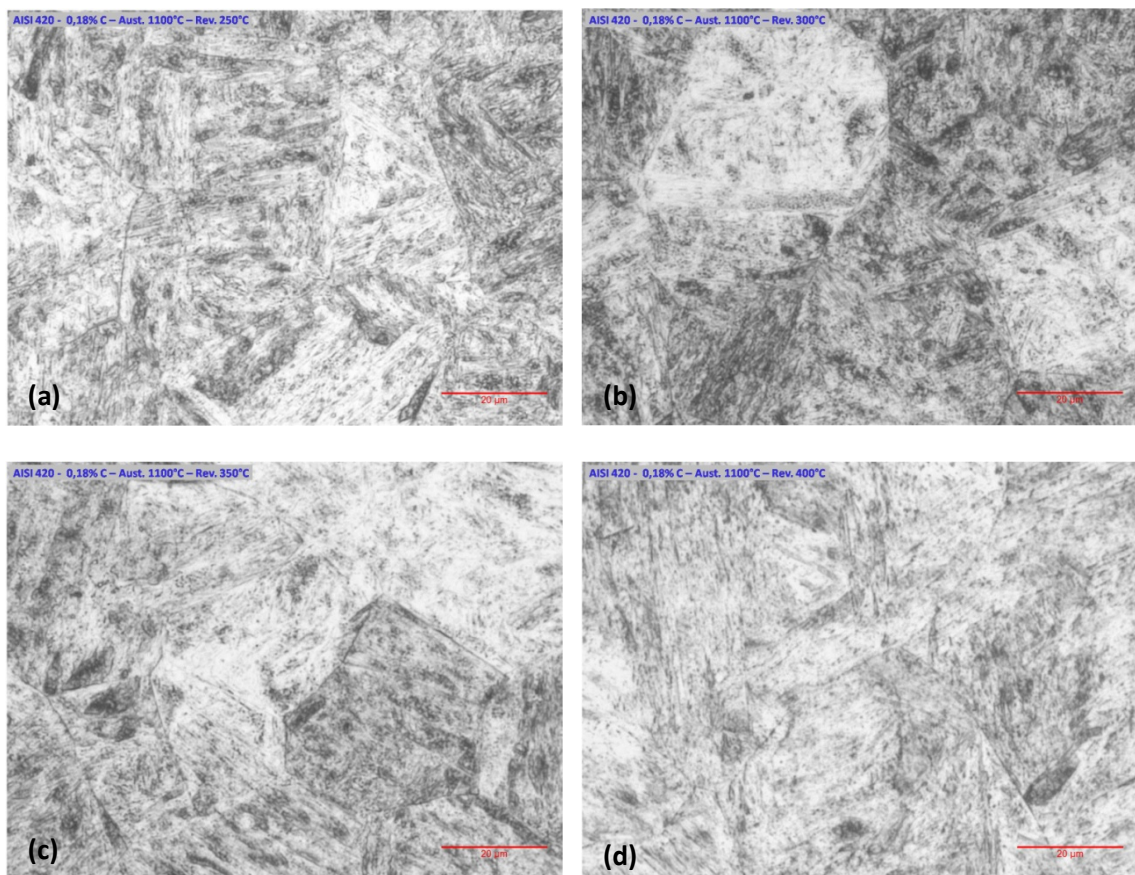


Figura 5.7 – Aço P420D austenitizado em 1100°C e revenido nas temperaturas de (a) 250; (b) 300; (c) 350 e (d) 400°C

5.1.4 Microestrutura do aço P420A após Têmpera e Revenimento

Aço P420A é mostrado na Figura 5.8 onde é possível visualizar, nas amostras que foram austenitizadas na temperatura de 950°C, que não há uma mudança relevante da microestrutura entre 250°C, Figura 5.8 (a) e 400°C, Figura 5.8 (d) sendo mantida a fase martensítica e carbonetos de Cromo não dissolvidos.

Não foi observada via microscopia ótica dado à acuidade e resolução das imagens, a precipitação de carbonetos além daqueles não dissolvidos durante a austenitização.

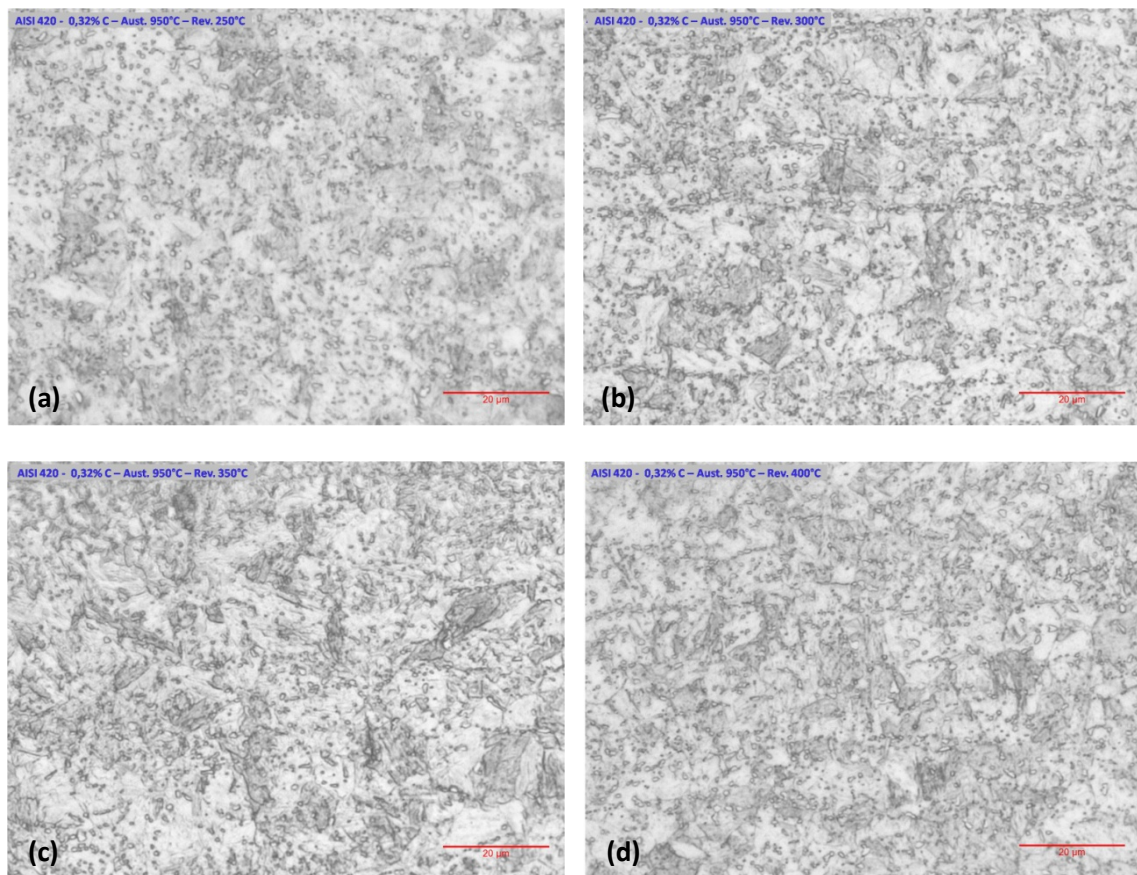


Figura 5.8 – Aço P420A austenitizado em 950 °C e revenido nas temperaturas de (a) 250, (b) 300, (c) 350 e (d) 400 °C

Na Figura 5.9 é possível visualizar a microestrutura do aço P420A austenitizado na temperatura de 1000°C e revenido nas temperaturas de 250°C (Figura 5.9 (a)), 300°C (Figura 5.9 (b)), 350°C (Figura 5.9 (c)) e 400 °C (Figura 5.9 (d)) mostrando que não há uma mudança relevante das microestruturas nestas temperaturas.

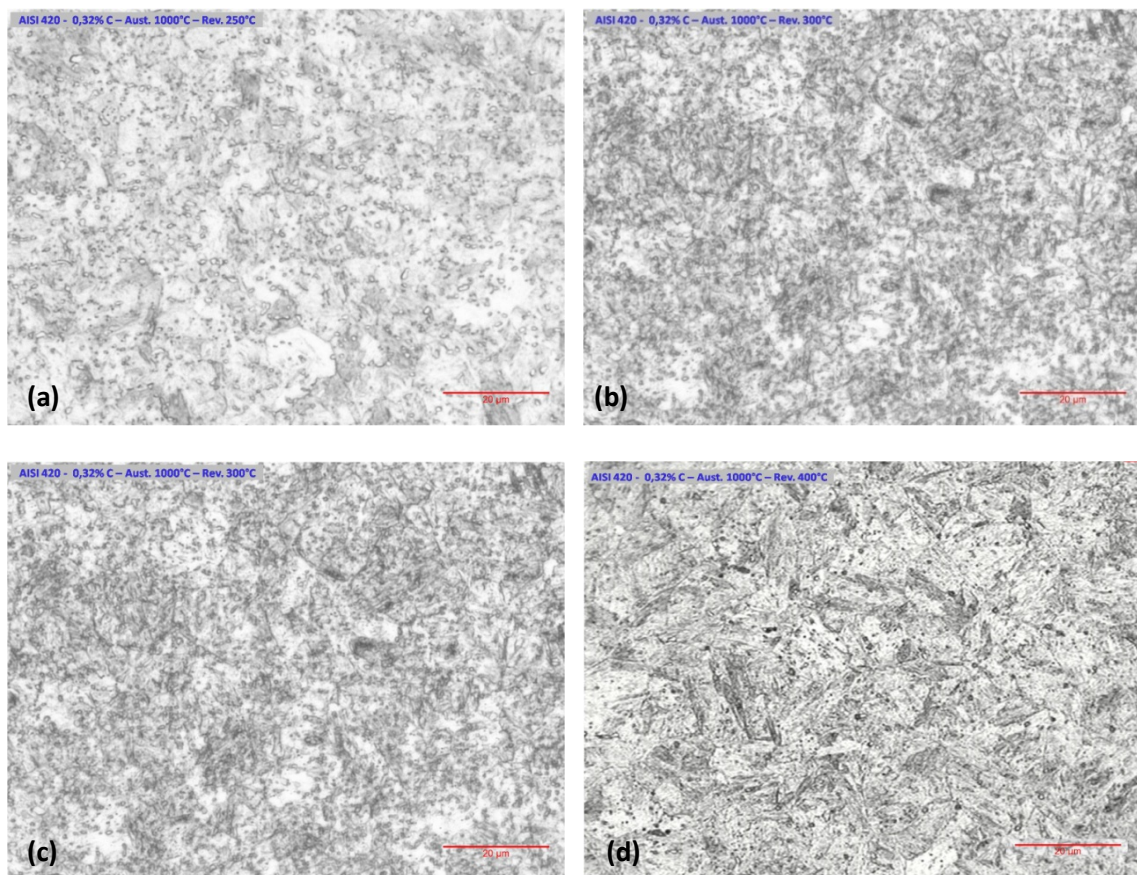


Figura 5.9 – Aço P420A austenitizado em 1000°C e revenido nas temperaturas de (a) 250, (b) 300, (c) 350 e (d) 400 °C

Na Figura 5.10 e Figura 5.11 é possível visualizar que a microestrutura do aço P420A austenitizado na temperatura de 1050 e 1100°C e revenido nas temperaturas de 250, 300, 350 e 400°C °C mostrando que não houve uma mudança relevante das microestruturas nestas temperaturas.

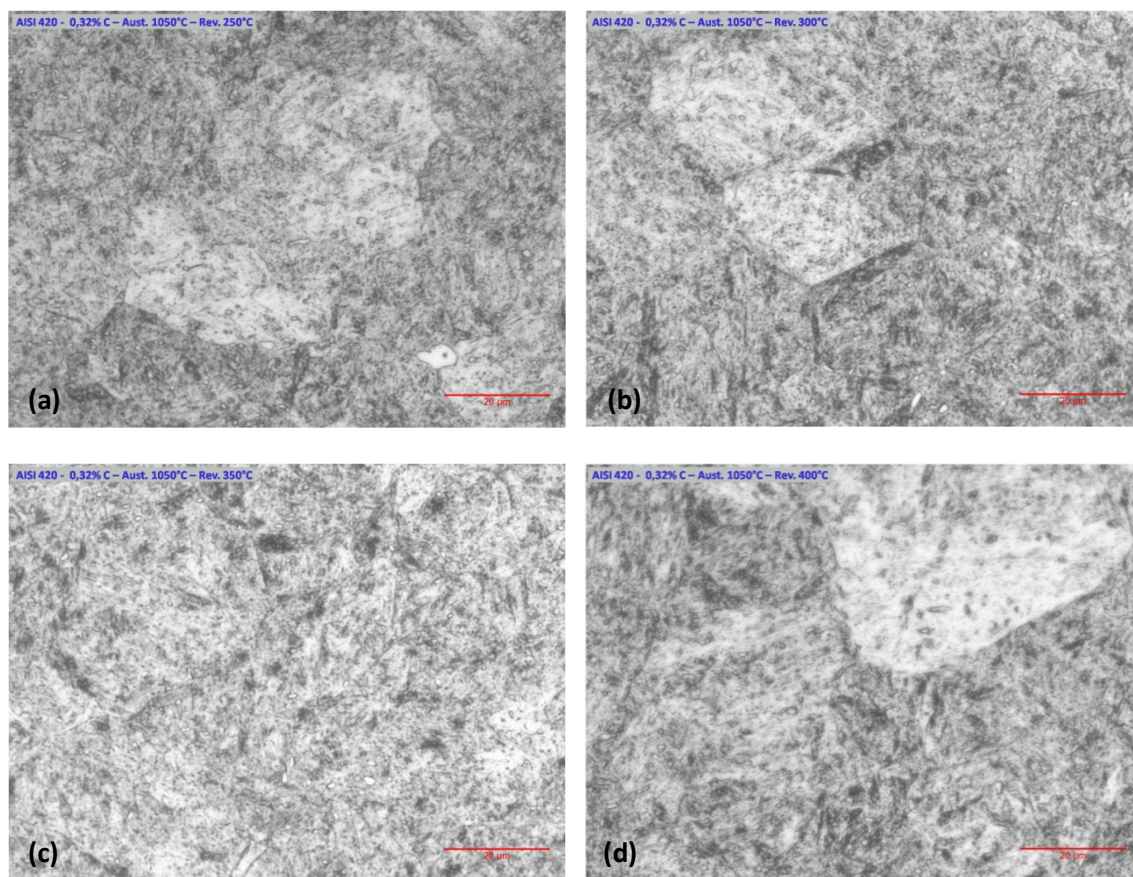


Figura 5.10 – Aço P420A austenitizado em 1050°C e revenido nas temperaturas de (a) 250, (b) 300, (c) 350 e (d) 400 °C

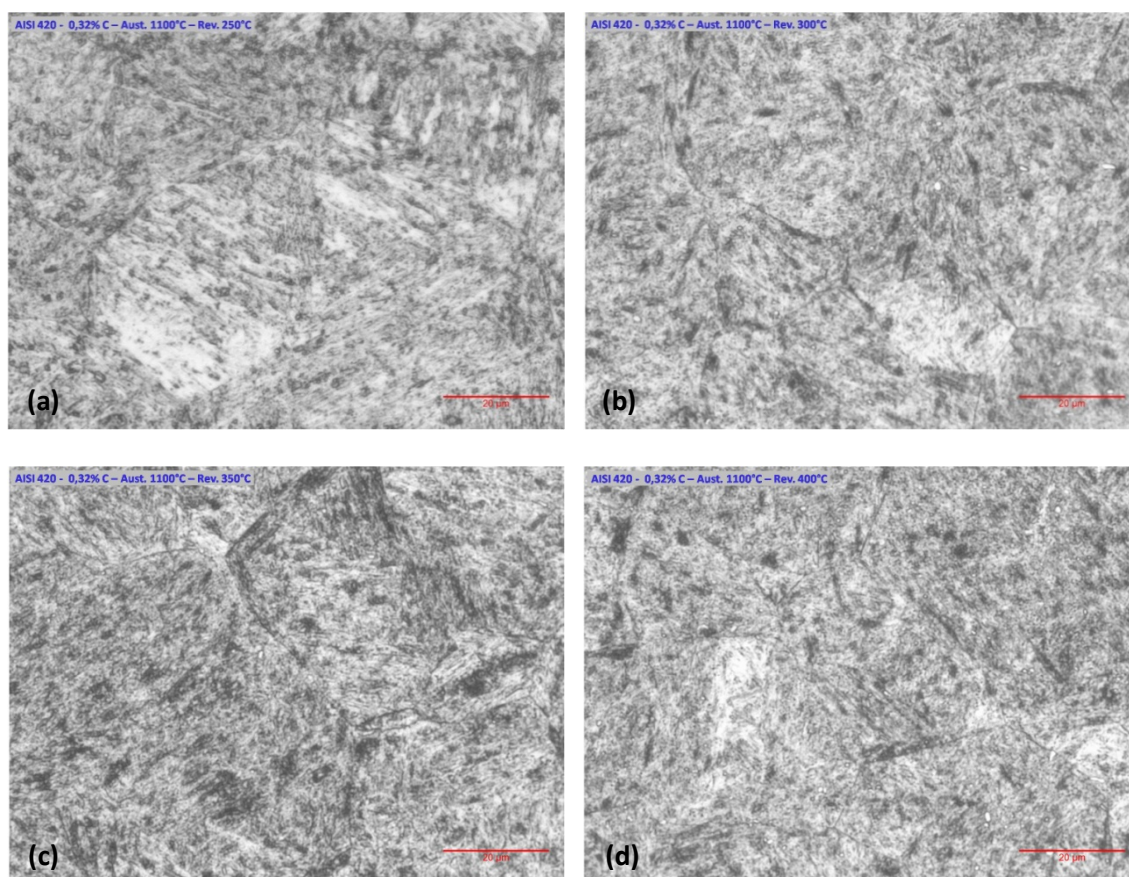


Figura 5.11 – Aço P420A austenitizado em 1100°C e revenido nas temperaturas de (a) 250, (b) 300, (c) 350 e (d) 400 °C

De um modo geral, a análise via microscopia ótica, não revelou mudanças significantes na microestrutura das amostras temperadas e tratadas nas diversas temperaturas de revenimento.

5.2 Análise Microestrutural via EBSD

Para diferenciar a microestrutura entres os materiais como recebido, depois de temperado e após revenimento, foram realizadas análises utilizando a técnica de EBSD, que é gerada via microscopia eletrônica. Foi escolhida a temperatura de austenitização de 1050°C nos dois aços estudados devido a mesma já apresentar a dissolução dos carbonetos via microscopia ótica, e por ser uma analise demorada opto-se por priorizar essa temperatura.

Na Figura 5.12 (a), para o aço P420D, observa-se a microestrutura do material sem temperar, onde é possível visualizar os grãos ferríticos e na Figura 5.12 (b) a transformação martensítica completa ocorrida após a austenitização a 1050°C. Na seqüência as Figuras 5.12 (c) e Figura 5.12 (d) é possível notar que o revenimento nas temperaturas entre 250 e 400 °C não alteraram os pacotes de martensita.

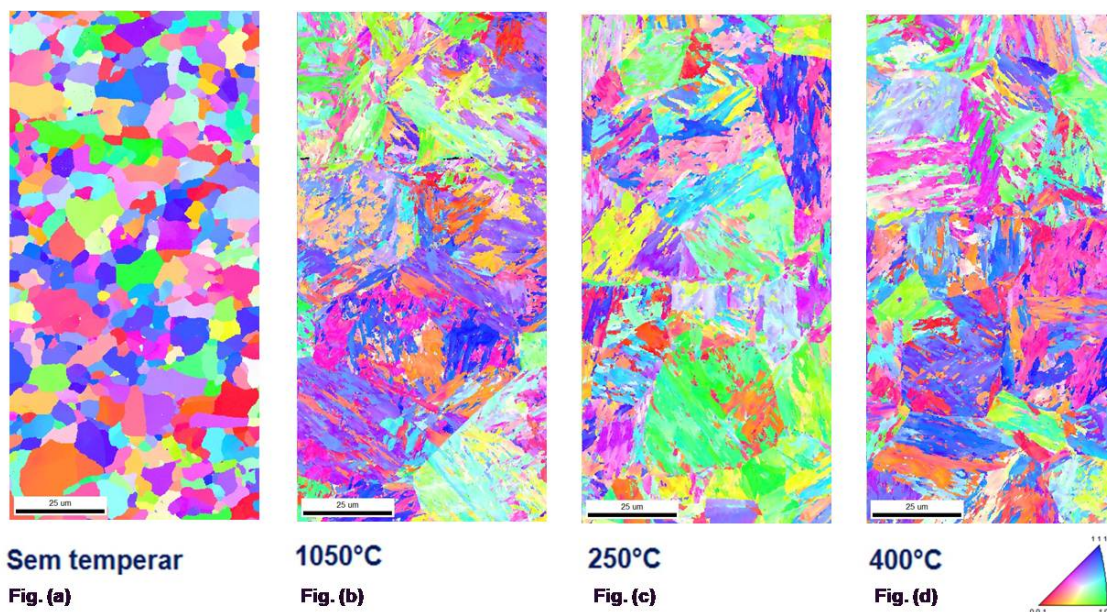


Figura 5.12 – Microestrutura observada via técnica de EBSD do aço P420D nas diferentes condições de tratamento. (a) Condição sem temperar (b), austenitizada a 1050°C, (c) revenida a 250 e (d) a 400 °C.

Na Figura 5.13 (a), para o aço P420A, observa-se a microestrutura do material sem temperar onde é possível visualizar os grãos ferríticos mais refinados que o aço P420D.

Na Figura 5.13 (b), visualiza-se a transformação martensítica completa ocorrida após a austenitização a 1050°C. Na Figura 5.13 (c), e Figura 5.13 (d), é possível notar que o revenimento nas temperaturas 250 e 400 °C não provocou mudanças relevantes na microestrutura.

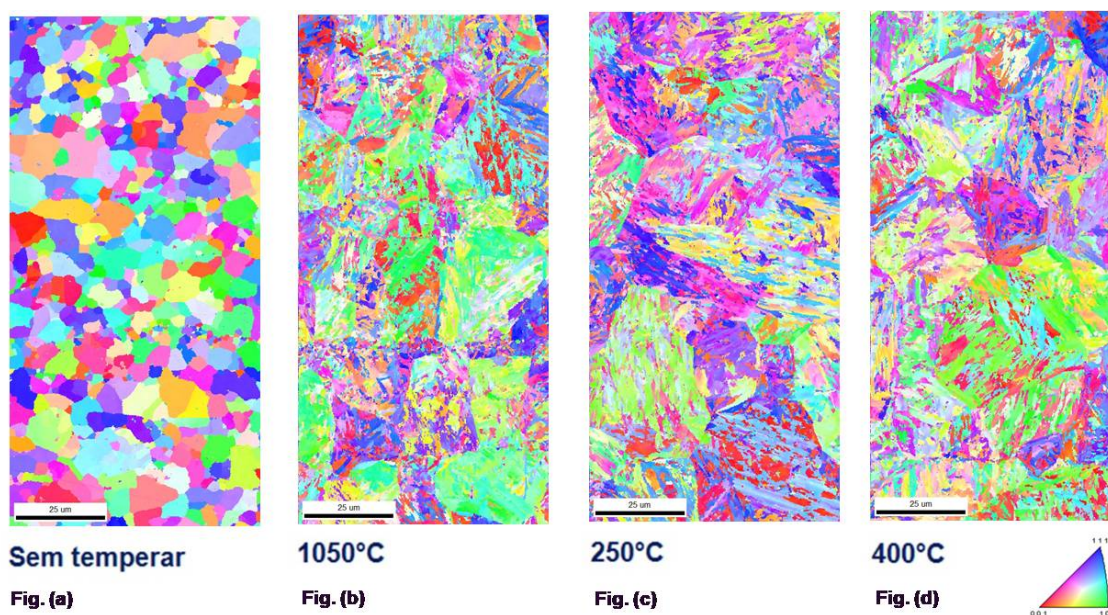


Figura 5.13 – Microestrutura observada via técnica de EBSD do Aço P420A nas diferentes condições de tratamento: (a) Condição sem temperar (b), austenitizada a 1050°C, (c) Revenida a 250 e (d) a 400 °C.

5.3 – Dureza

5.3.1 – Efeito da Temperatura de Austenitização e Têmpera na Dureza

Para avaliar o efeito da temperatura de austenitização e têmpera, medidas de dureza foram realizadas ao longo da espessura do material. Os resultados de dureza nas amostras do Aço P420D e P420A austenitizados nas temperaturas de 950, 1000, 1050 e 1100°C estão dispostos na Figura 5.14, onde se percebe que o aço P420A apresenta maiores valores de dureza em função do maior teor de carbono quando comparado ao aço P420D, ou seja, maior quantidade de carbono disponível permite maior distorção da rede da martensita contribuindo para a maior dureza.

Constatou-se ainda que o menor valor de dureza ocorreu na temperatura de austenitização em 950°C, sugerindo que os carbonetos não dissolvidos nesta temperatura deixaram a matriz martensítica pobre de Carbono, entretanto a dureza aumenta à medida em que se aumenta a temperatura de austenitização.

A dureza atinge o valor máximo para os dois aços na temperatura de austenitização de 1100 °C, O aumento da dureza é resultado da maior concentração de carbono e de elementos de liga na solução sólida austenítica, que por sua vez é o resultado de uma maior dissolução de carbonetos durante o aquecimento e encharque que libera o Carbono, supersaturando matriz martensítica ⁽²⁸⁾.

Estudos realizados por Krauss ⁽¹⁴⁾ mostraram que os valores de dureza aumentam em função do teor de carbono, corroborando com os resultados obtidos neste trabalho, onde o aço P420A apresenta dureza mais elevada que seu par de menor teor de Carbono.

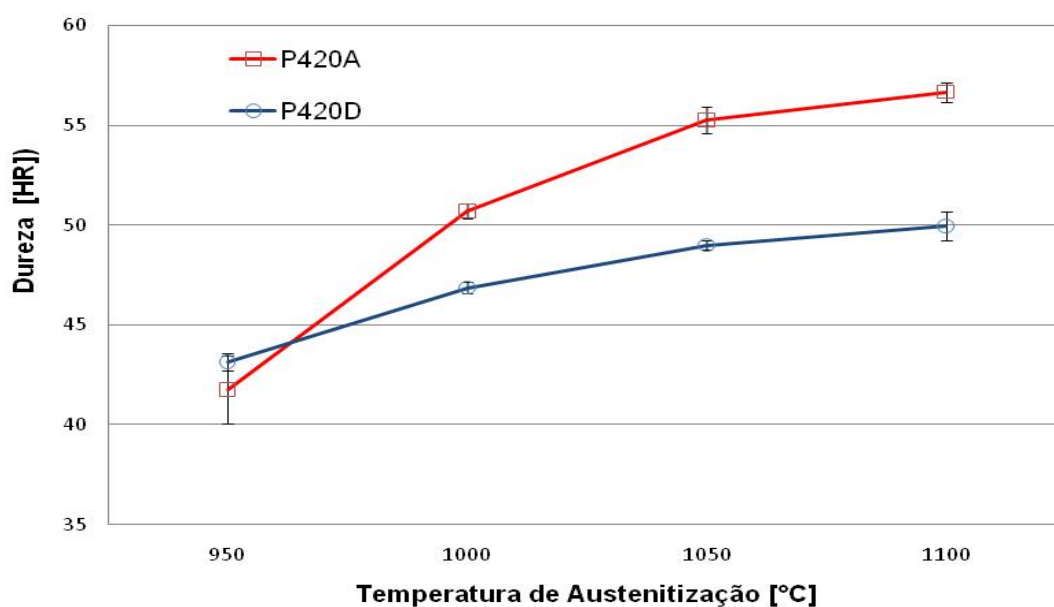


Figura 5.14 – Dureza dos aços Aço P420D e Aço P420A em função da temperatura de Austenitização.

5.3.2 – Efeito do Revenimento na Dureza

Os resultados dos ensaios de dureza realizados em amostras do aço P420A e P420D realizados após o tratamento térmico em quatro temperaturas de austenitização, seguidas de revenimento em temperaturas distintas, estão expostos nesta seção.

É observado na Figura 5.15 que, para a temperatura de austenitização de 950°C, os valores de dureza para ambos os aços permanecem quase que inalterados após o revenimento nas diferentes temperaturas, mantendo-se num mesmo patamar. Entretanto o aço P420D apresenta tendência de decréscimo.

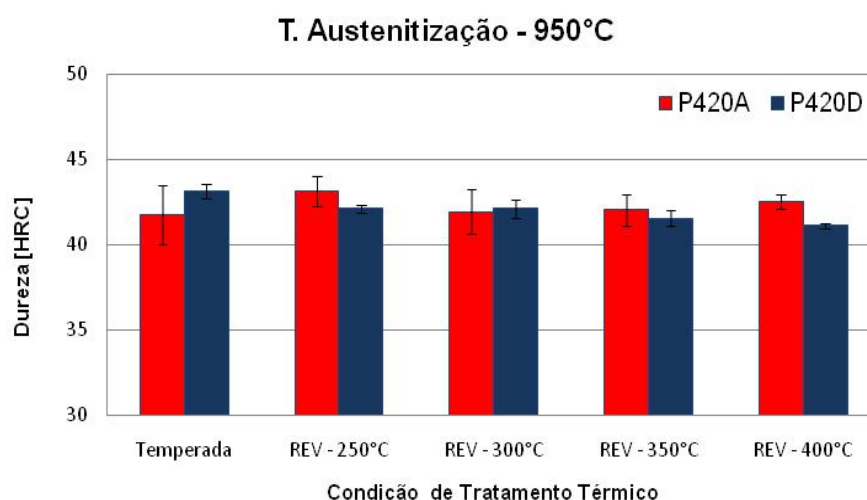


Figura 5.15 – Dureza dos aços Aço P420D e Aço P420A após austenitizado a 950°C e revenido em diferentes temperaturas.

Na Figuras 5.16 é mostrada a dureza após o revenimento dos aços P420D e P420A, austenitizados na temperatura de 1000°C. Nele é possível observar que não houve decréscimo dos valores do aço P420D em 250°C, entretanto em 300°C houve a queda e voltou a subir novamente na temperatura de 400°C. O aço P420A teve o decréscimo considerável da dureza em 250°C e manteve o patamar de valor nas demais temperaturas de revenimento.

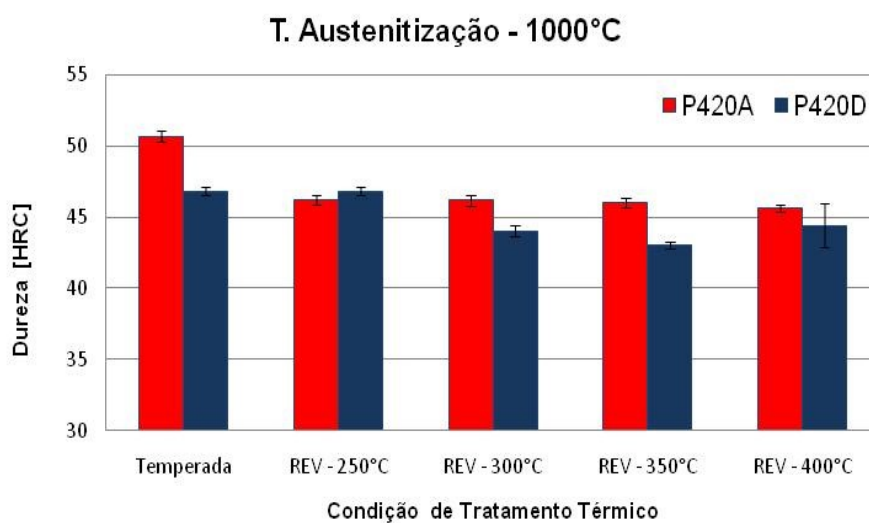


Figura 5.16 – Dureza dos aços Aço P420D e Aço P420A após austenitizado a 1000°C e revenido em diferentes temperaturas.

Na Figura 5.17, são mostrados os valores de dureza após o revenimento dos aços P420D e P420A, austenitizados na temperatura de 1050°C. Observa-se que houve decréscimo dos valores de dureza de ambos os aços, entretanto há a estabilização destes valores nas temperaturas seguintes. O aço P420D teve o decréscimo da dureza no revenimento a 250°C, e manteve-se esta queda de forma discreta nas demais temperaturas de revenimento.

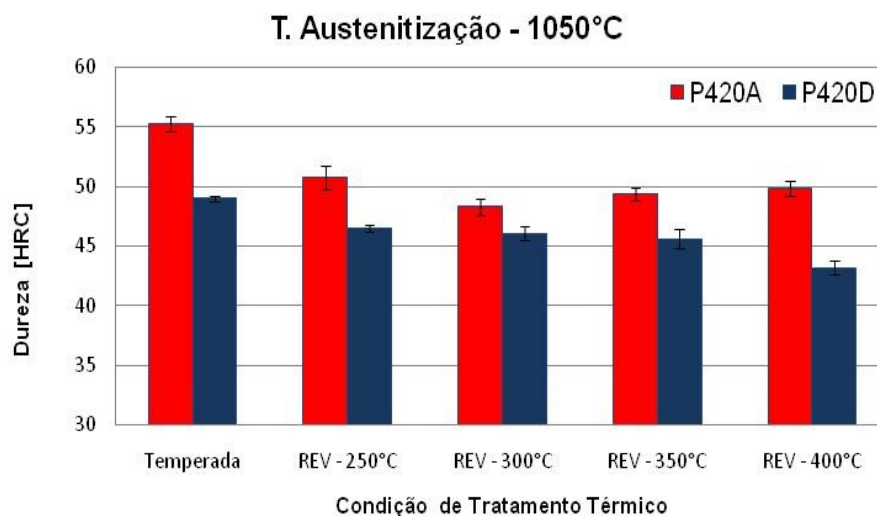


Figura 5.17 – Dureza dos aços Aço P420D e Aço P420A após austenitizado a 1050°C e revenido em diferentes temperaturas.

A Figura 5.18 mostra a dureza após o revenimento dos aços P420D e P420A, austenitizados na temperatura de 1100°C. Observa-se também que houve decréscimo dos valores do aço P420D e P420A, entretanto há estabilização destes valores nas temperaturas seguintes, tendo o P420D um leve incremento de valor na temperatura de revenimento a 400°C.

Quanto mais alta a temperatura de austenitização, torna-se mais fácil a visualização da queda da dureza em função do revenimento. Outro ponto importante, a temperatura de revenimento de 250°C é a mais importante sob o ponto de vista de abaixamento da dureza, as demais temperaturas de revenimento abaixam a dureza mas num patamar próximo.

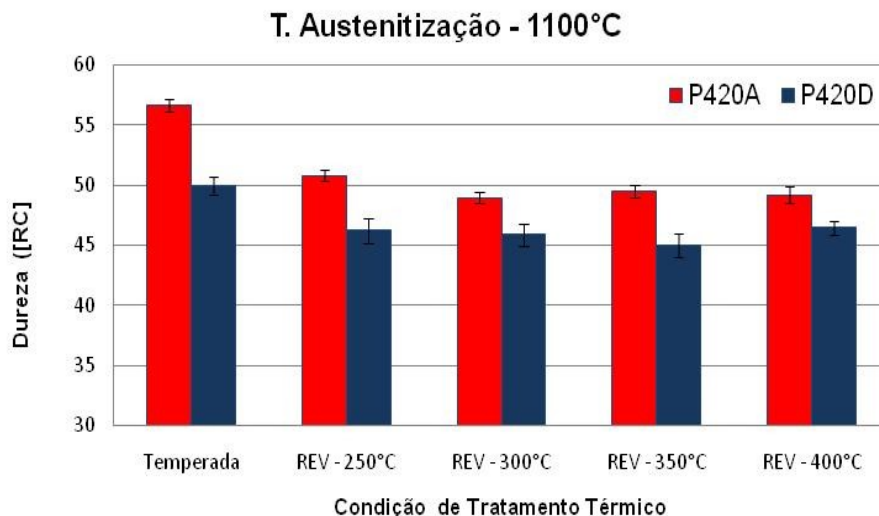


Figura 5.18 – Dureza dos aços Aço P420D e Aço P420A após austenitizado a 1100°C em função da temperatura de revenimento

5.4 Propriedades Mecânicas

5.4.1 Limite de Escoamento e de Resistência à Tração após Austenitização e Têmpera

A Figura 5.19 e Figura 5.20 mostram os resultados de limite de escoamento e de resistência dos aços P420A e P420D após austenitização em diferentes temperaturas, onde o limite de resistência do Aço P420A foi maior em relação ao Aço P420D, indicando diferentes comportamentos de encruamento dos aços para temperatura de austenitização de 950°C.

Para temperaturas de austenitização superiores a 1000°C, o Aço P420A apresentou maiores valores de limite de escoamento e limite de resistência. Esse resultado evidencia o efeito do teor de carbono nas propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis martensíticos estudados.

A densidade de carbonetos deve ser considerada, e embora não tivesse sido medida, mas observada via microscopia ótica para o aço P420A, esta foi maior em relação ao o

aço P420D. Entretanto, pode se assumir que o Aço P420A apresenta maior teor de carbono em solução sólida. Outra possibilidade é a microestrutura mais fina no Aço P420A onde o aumento do teor de carbono em solução sólida causa o refinamento da microestrutura, conseqüentemente, aumento da resistência mecânica.

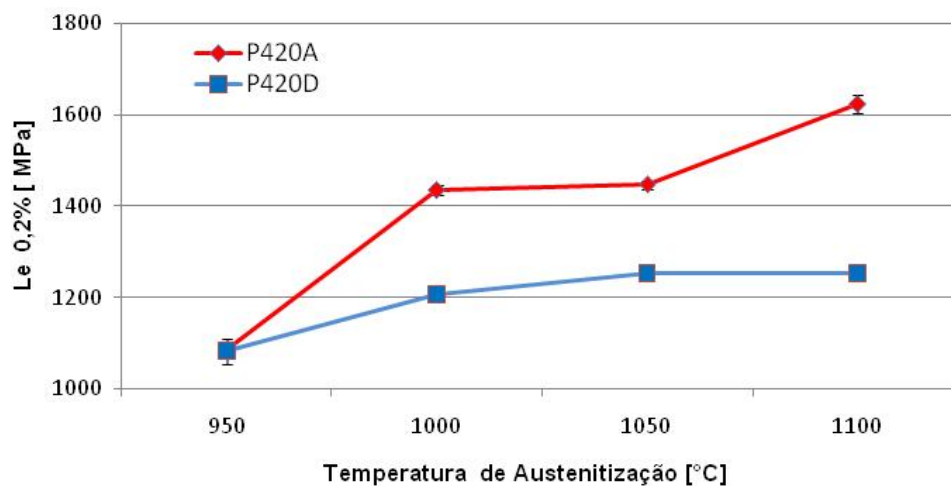


Figura 5.19 - Limite de Escoamento dos aços P420A e aço P420D em função da temperatura de austenitização.

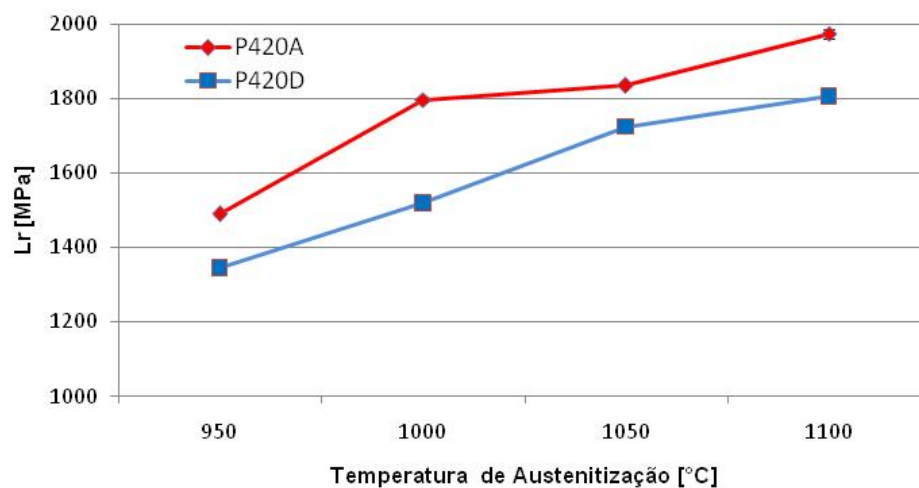


Figura 5.20 - Limite de Resistência dos aços P420A e aço P420D em função da temperatura de austenitização.

5.4.2 Limite de Escoamento e Limite de Resistência à Tração após Revenimento

Limite de Escoamento após Revenimento

As mudanças que acontecem no revenimento ocorrem na subestrutura dos materiais e mesmo com a técnica de análise via EBSD não foi possível observar mudanças microestruturais com o revenimento executado nas amostras deste estudo.

Além do alívio de tensões, o revenimento também provoca o rearranjo e diminuição da densidade de discordâncias em seqüência ao processo de recuperação da microestrutura. Neste caso, supõe-se que deva existir um link entre a energia armazenada após a têmpera e a recuperação no processo de revenimento.

Os resultados dos ensaios mecânicos no que tange ao limite de escoamento, realizados em amostras do aço P420A e P420D após tratamento térmico em quatro temperaturas de austenitização, seguidas de revenimento em temperaturas distintas, estão expostos nesta seção.

É observado na Figura 5.21 que, para a temperatura de austenitização de 950°C, os valores de limite de escoamento para ambos os aços tem um incremento de aproximadamente 10% quando revenido a 250°C e permanece neste patamar de valor para o aço P420A nas temperaturas seguintes. O mesmo não acontece com o aço P420D, que após o incremento de valor, tem queda relevante em 300 e 350°C e vindo a subir novamente em 400°C.

Supõe-se que essa variação de valores pode ter sido provocada pela não dissolução de carbonetos e possível presença de fase ferrítica pela baixa temperatura de austenitização.

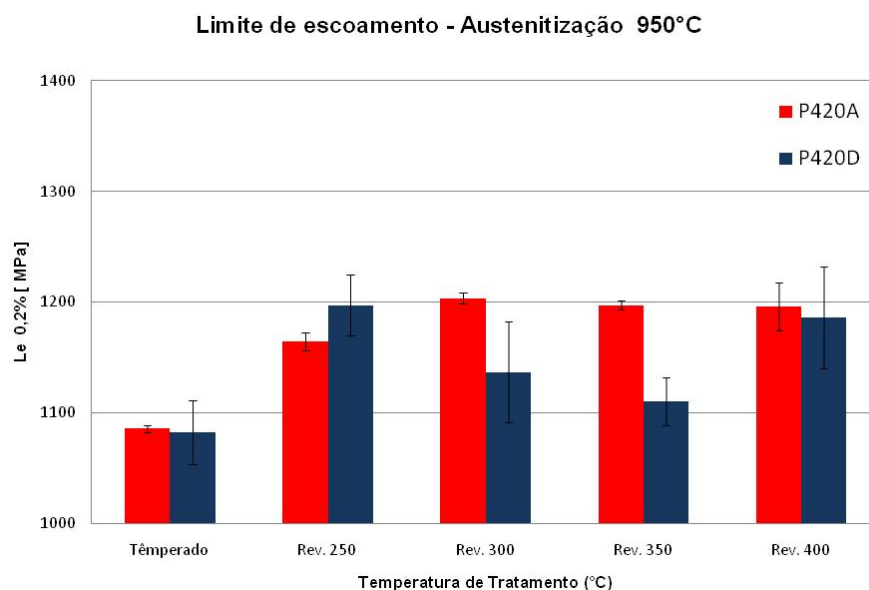


Figura 5.21 – Limite de Escoamento dos aços P420A e P420D após austenitizado a 950°C e revenido em diferentes temperaturas.

Na Figura 5.22, observa-se que, para a temperatura de austenitização de 1000°C, os valores de limite de escoamento do aço P420A têm queda considerável de valor quando revenido a 250 e 300°C e permanece neste patamar na temperatura de 350°C e vindo a subir novamente em 400°C.

O aço P420D apresenta valor de limite de escoamento aproximado ao de têmpera, quando revenido na temperatura de revenimento de 250°C e vai decrescendo à medida que se aumenta a temperatura de revenimento.

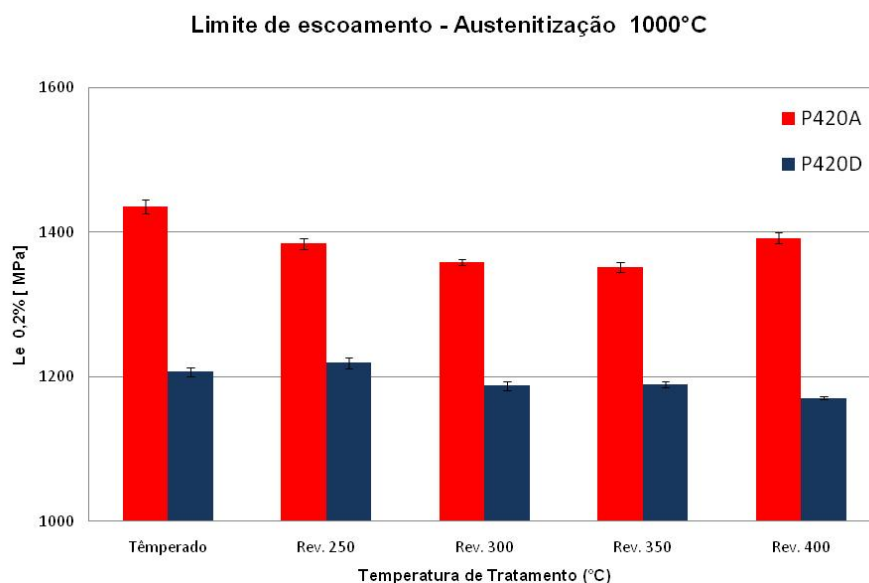


Figura 5.22 – Limite de Escoamento dos aços P420A e P420D após austenitizado a 1000°C e revenido em diferentes temperaturas.

Na Figura 5.23, observa-se que, para a temperatura de austenitização de 1050°C, os valores de limite de escoamento do aço P420A e P420D têm queda considerável de valor quando revenido a 250 e 300 e 350°C. Entretanto o aço P420A tem o valor aumentado expressivamente na temperatura de revenimento em 400°C, sugerindo que possa estar iniciando nesta temperatura a ocorrência de precipitados, mesmo que de ordem nanométricas, que o ensaio de microscopia ótica não tenha tido resolução para encontrar isso.

O valor do aço P420D tem um aumento discreto e permanece neste patamar na temperatura de 350°C e vindo a subir novamente em 400°C.

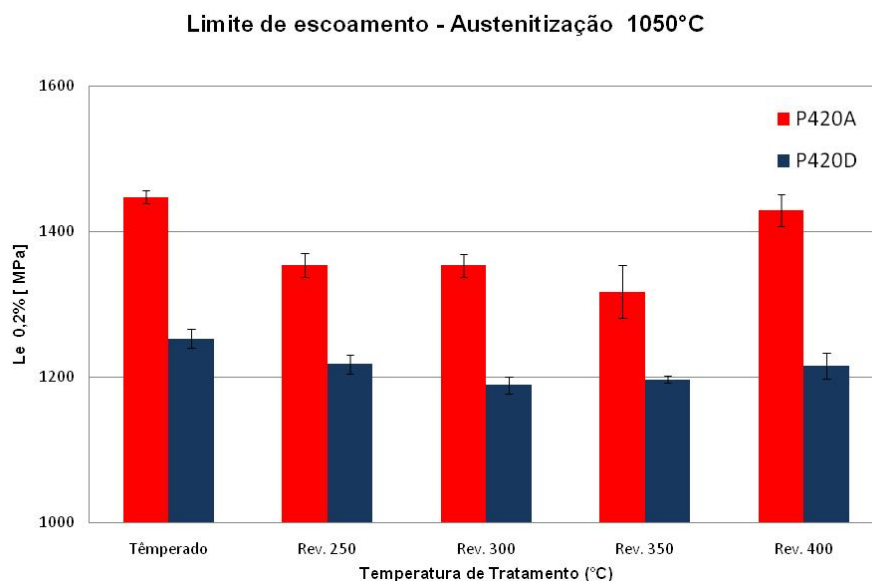


Figura 5.23 – Limite de Escoamento dos aços P420A e P420D após austenitizado a 1050°C e revenido em diferentes temperaturas.

Na Figura 5.24, são mostrados os valores de limite de escoamento das amostras que foram tratadas na temperatura de austenitização de 1100°C, onde os valores de limite de escoamento do aço P420A têm queda considerável de valor quando revenido a 250°C, vindo a subir nas temperaturas seguintes de revenimento.

O aço P420D tem queda de valor nas temperaturas de 250 e 300°C, mas volta a subir discretamente nas temperaturas seguintes de revenimento, estando os valores dentro de um mesmo patamar de incerteza.

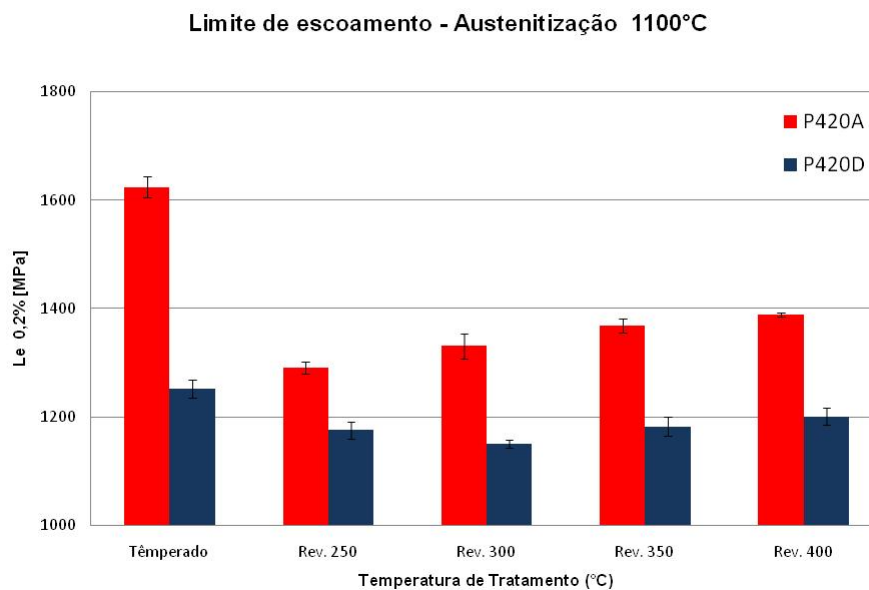


Figura 5.24 – Limite de Escoamento dos aços P420A e P420D após austenitizado a 1100°C e revenido em diferentes temperaturas.

Limite de Resistência após revenimento

Os resultados dos ensaios mecânicos no que tange ao limite de resistência, realizados em amostras do aço P420A e P420D realizados após tratamento térmico em quatro temperaturas de austenitização, seguidas de revenimento em temperaturas distintas, estão expostos nesta seção.

É observado na Figura 5.25 que, para a temperatura de austenitização de 950°C, os valores de limite de resistência para ambos os aços tem queda quando revenido a 250°C e permanece neste patamar de valor nas temperaturas de revenimento seguintes.

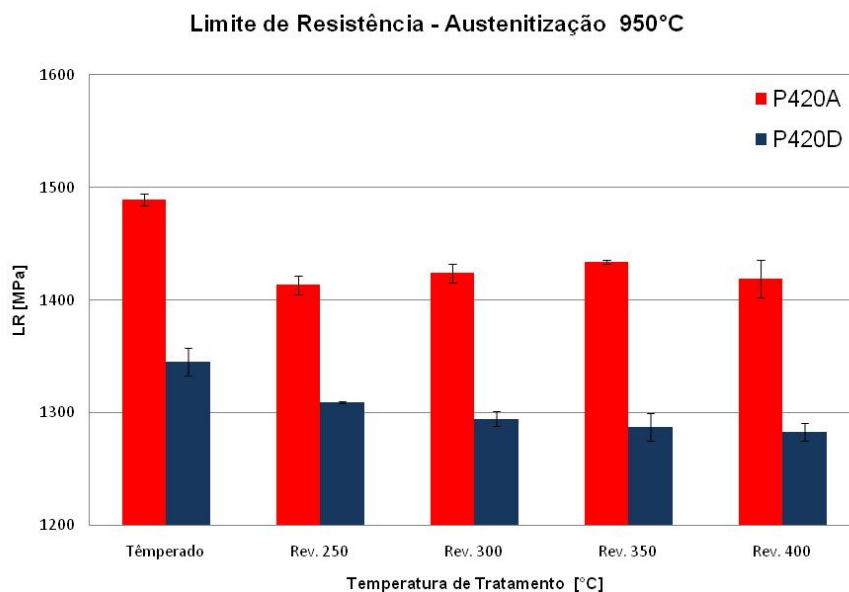


Figura 5.25 – Limite de Resistência dos aços P420A e P420D após austenitizado a 950°C e revenido em diferentes temperaturas.

Na Figura 5.26, observa-se que, para a temperatura de austenitização de 1000°C, os valores de limite de resistência do aço P420A têm queda discreta quando revenido a 250°C permanecendo neste patamar até 400°C. O aço P420D apresenta valor de limite de resistência aproximado ao de têmpera, quando revenido na temperatura de revenimento de 250°C, permanecendo neste patamar à medida que se aumenta a temperatura de revenimento.

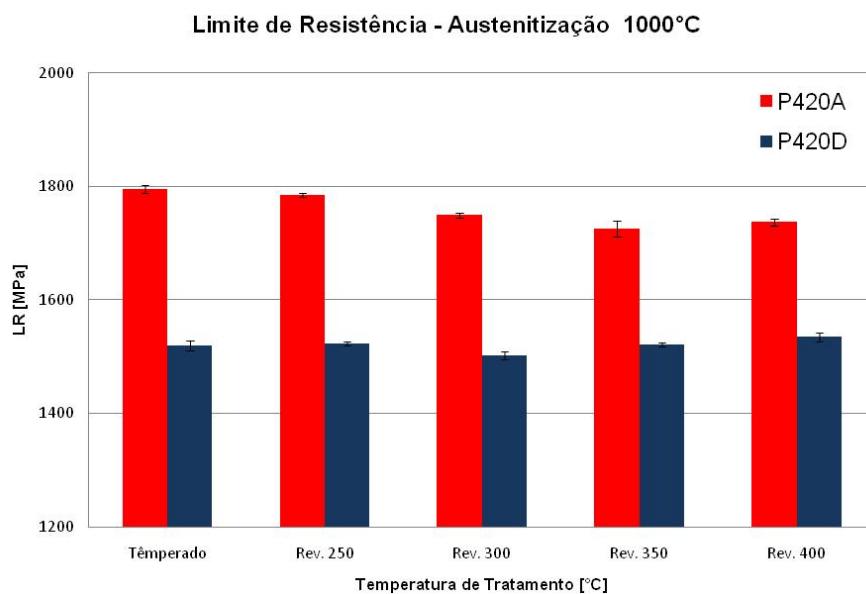


Figura 5.26 – Limite de Resistência dos aços P420A e P420D após austenitizado a 1000°C e revenido em diferentes temperaturas.

Na Figura 5.27, é observado que na temperatura de austenitização de 1050°C, os valores de limite de resistência do aço P420A têm queda discreta quando revenido a 250 e 300 e 350°C e novamente sobe na temperatura de revenimento de 400°C.

Entretanto o aço P420D tem queda de valor de resistência acentuado quando revenido a 250°C, mas permanece neste patamar de valor até 400°C.

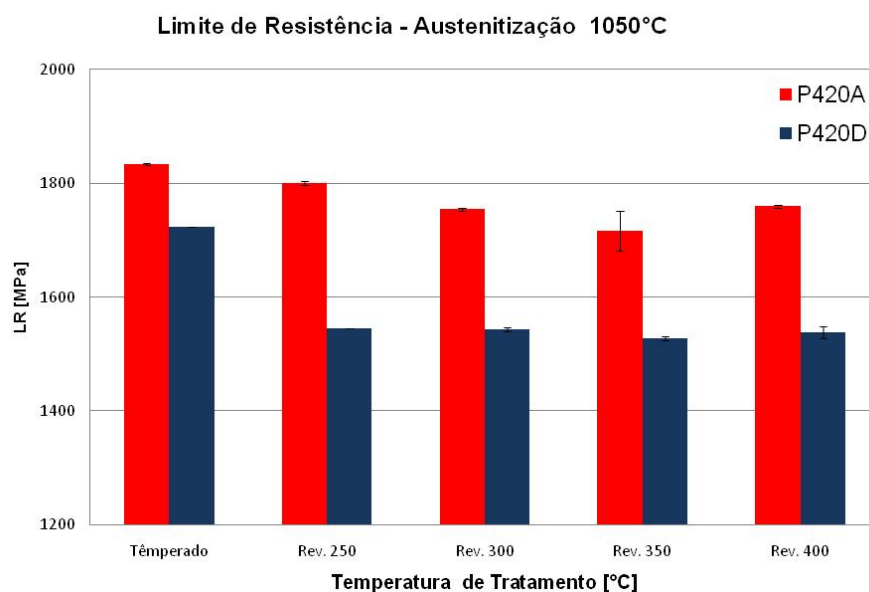


Figura 5.27 – Limite de Resistência dos aços P420A e P420D após austenitizado a 1050°C e revenido em diferentes temperaturas.

Na Figura 5.28, são mostrados os valores de limite de resistência das amostras que foram tratadas na temperatura de austenitização de 1100°C, onde os valores de limite de resistência do aço P420A têm queda considerável de valor quando revenido a 250°C e se mantém em queda nas temperaturas seguintes de revenimento. O aço P420D tem queda de valor nas temperaturas de 250°C, permanecendo neste patamar de valor até a temperatura de 400°C.

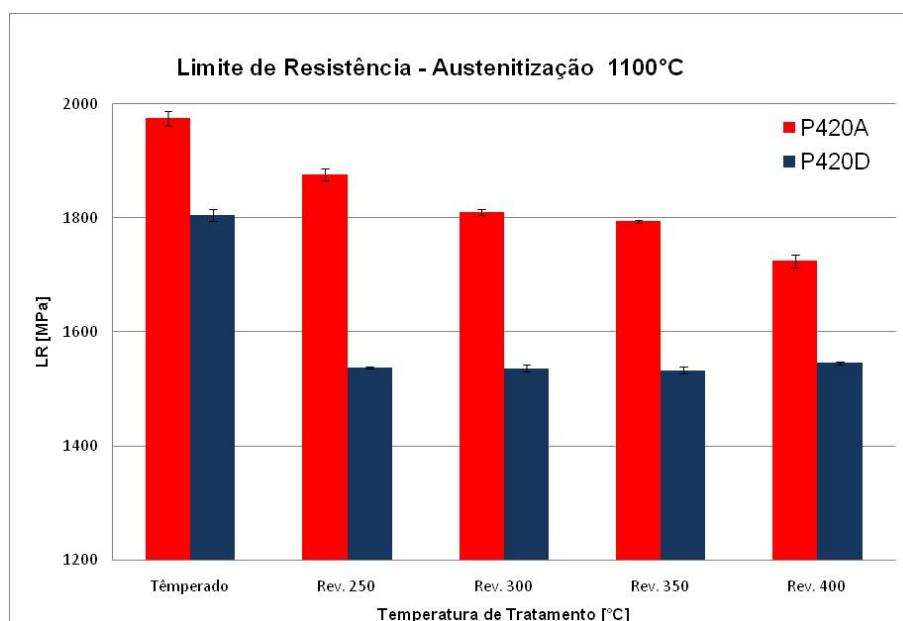


Figura 5.28 – Limite de Resistência dos Aços P420A e P420D após austenitizado a 1100°C e revenido em diferentes temperaturas.

As mudanças que acontecem no revenimento ocorrem na subestrutura, ou seja, nível de transmissão. Kennet e colaboradores ⁽⁴⁰⁾, observaram uma redução na densidade de discordância após o revenimento. Além do alívio de tensões, o revenimento também provoca o rearranjo e diminuição da densidade de discordâncias, processo de recuperação. Neste caso, sugere-se que deva existir um link entre a energia armazenada após a têmpera e a recuperação no processo de têmpera.

Os autores observaram que a redução da densidade de discordâncias apresentou diferentes comportamentos quando duas temperaturas de revenimento são comparadas, 200°C e 600°C respectivamente, onde a redução da densidade de discordância foi maior para temperatura de revenimento de 600°C.

Aços com menor tamanho de grão austenítico prévio apresentam maior densidade de discordância após têmpera devido aos aspectos cristalográficos da transformação martensítica. Observa-se que a redução da densidade de discordâncias também é maior para essa condição após revenimento a 600°C e resultado indica que o aço com maior densidade de discordância após têmpera apresentou maior energia para o processo de

recuperação. Nos seus resultados, é possível observar essa redução do limite de resistência em decorrência da recuperação no revenimento.

O aço P420A por ter maior teor de carbono e microestrutura mais refinada, tem maior sensibilidade à maiores temperaturas, com respectiva diminuição das propriedades mecânicas pelo aumento da temperatura de revenimento.

5.5 Resistência ao Impacto

5.5.1 Efeito da Austenitização na Resistência ao Impacto

Os aços martensíticos geralmente têm uma alta resistência mecânica, e melhorar a tenacidade dos aços martensíticos é uma grande preocupação, especialmente para aplicações em baixas temperaturas. A tenacidade da maioria dos aços pode ser melhorada através do processo de revenimento.

Os resultados de ensaios de impacto realizados nas amostras austenitizadas a 950, 1000, 1050 e 1100°C estão dispostos na Figura 5.29. O ensaio foi realizado à temperatura ambiente e resultou em baixos valores de energia de impacto, coerente com aços temperados e de alta resistência. O Aço P420A obteve valores mais baixos que o aço P420D em todas as temperaturas de austenitização.

Os valores têm a tendência de queda nas temperaturas de 1000 e 1050 °C subindo discretamente na temperatura de 1100 °C. A temperatura de austenitização de 950 °C apresenta valores melhores que as demais sugerindo que seja em função não transformação completa da estrutura ferrítica em austenítica durante a austenitização, que ajudaria na absorção da energia do impacto.

Já a temperatura de austenitização de 1100 °C apresenta a recuperação do valor maior de energia sugere ser em função da dissolução de carbonetos. Todavia, estes valores encontrados são muito baixos e impossibilitam a utilização dos aços nestas condições sem que haja o tratamento de revenimento.

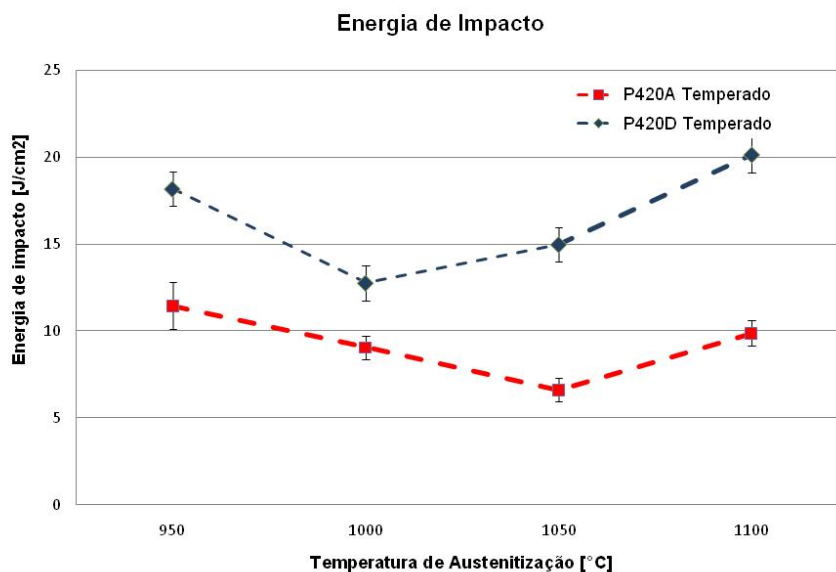


Figura 5.29 – Energia de Impacto dos Aços P420A e P420D em função da temperatura de austenitização

5.5.2 Efeito do Revenimento na Resistência ao Impacto

Os resultados dos Ensaios de Impacto das amostras do aço P420A e P420D realizados após tratamento térmico em quatro temperaturas de austenitização, seguidas de revenimento em temperaturas distintas, estão expostos nesta seção.

É observado na Figura 5.30 que, para a temperatura de revenimento de 250°C, os valores de energia de impacto para ambos os aços houve um discreto incremento na temperatura de austenitização de 950°C, quando comparados com os mesmos na condição de somente temperados. Entretanto o aço P420D se mostrou melhor que o aço P420A, absorvendo maior quantidade de energia em todas temperaturas de austenitização.

Embora o aço P420A tenha apresentado pequena variação no valor de energia de impacto, considera-se que houve uma melhoria da tenacidade nas temperaturas seguintes de austenitização

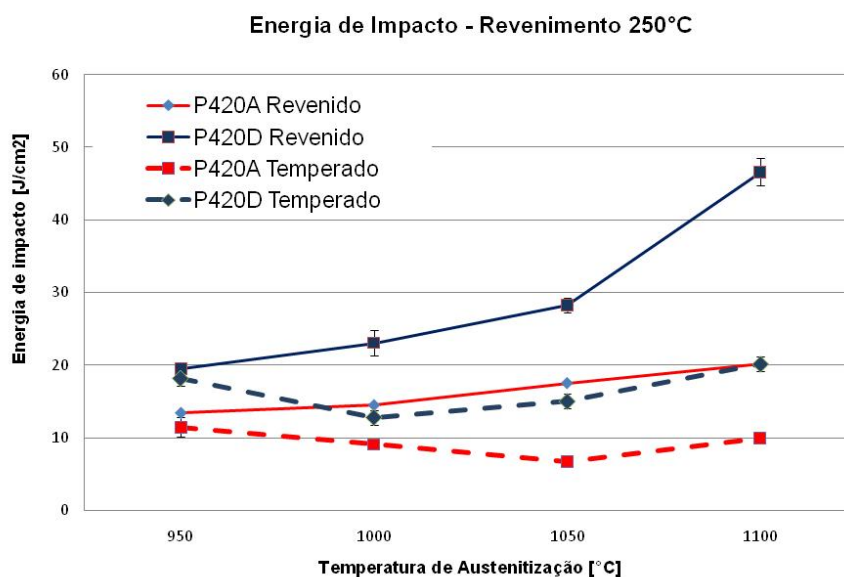


Figura 5.30 – Efeito da temperatura de revenimento em 250°C na energia de impacto dos aços P420A e P420D após austenitização em diferentes temperaturas.

A Figura 5.31 mostra que, para a temperatura de revenimento de 300°C, os valores de energia de impacto para ambos os aços não houve incremento na temperatura de austenitização de 950°C, quando comparados com os mesmos na condição de somente temperados. Novamente o aço P420D se mostrou melhor que o aço P420A, absorvendo maior quantidade de energia em todas temperaturas de austenitização.

O aço P420A além de apresentar pequena variação de no valor de energia de impacto, este veio a diminuir com a temperatura de austenitização de 1100°C.

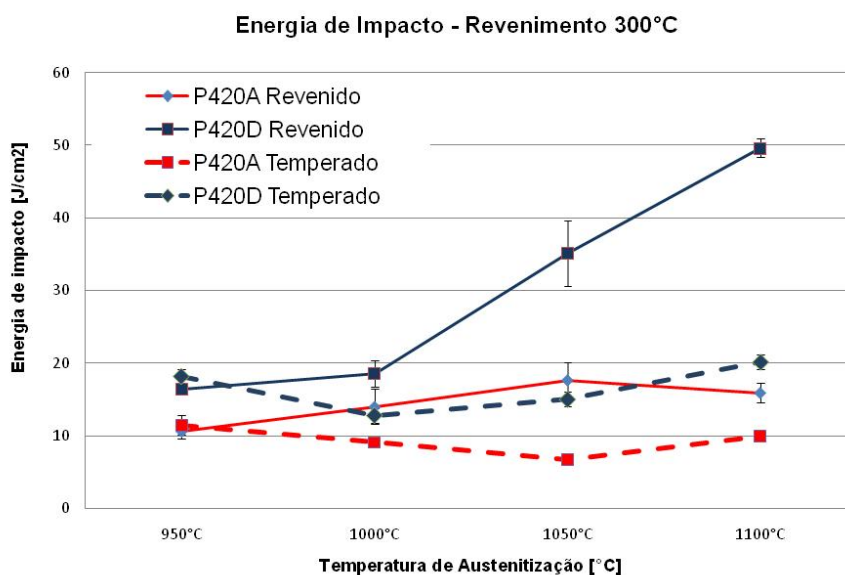


Figura 5.31 – Efeito da temperatura de revenimento em 300°C na energia de impacto dos aços P420A e P420D após austenitização em diferentes temperaturas.

Na Figura 5.32 é observado que a temperatura de revenimento de 350°C, o aço P420D mantém-se melhor que o aço P420A nas temperaturas de 1000, 1050 e 1100°C.

O aço P420A, além de apresentar pequena variação no valor de energia de impacto, tem o valor diminuído com a temperatura de austenitização de 1100°C.

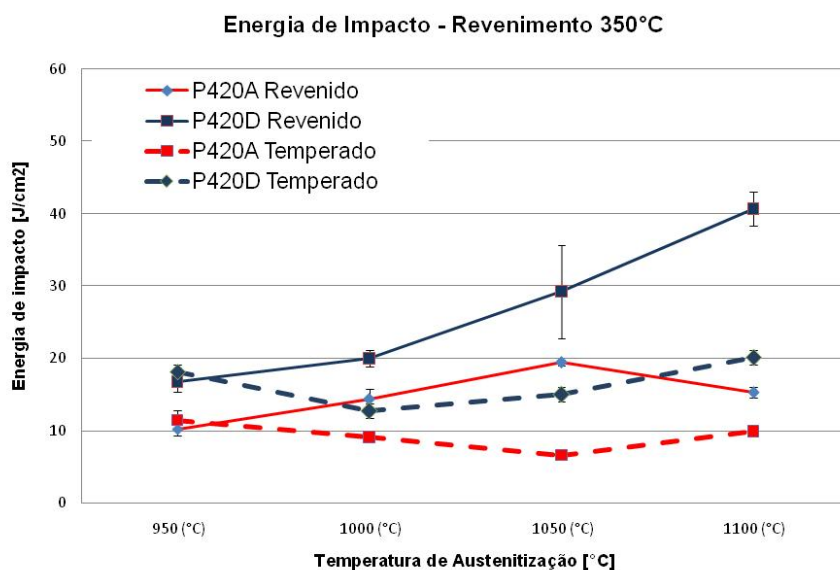


Figura 5.32 – Efeito da temperatura de revenimento em 350°C na energia de impacto dos aços P420A e P420D após austenitização em diferentes temperaturas.

Na Figura 5.33, são mostrados os valores de Resistência ao Impacto das amostras que foram revenidas na temperatura de austenitização de 400°C, os valores de energia de impacto para ambos os aços não houve incremento na temperatura de austenitização de 950°C, quando comparados com os mesmos na condição de somente temperados. Entretanto a energia absorvida nesta condição de revenimento é baixa quando comparada com a observada nas temperaturas de revenimento abaixo desta.

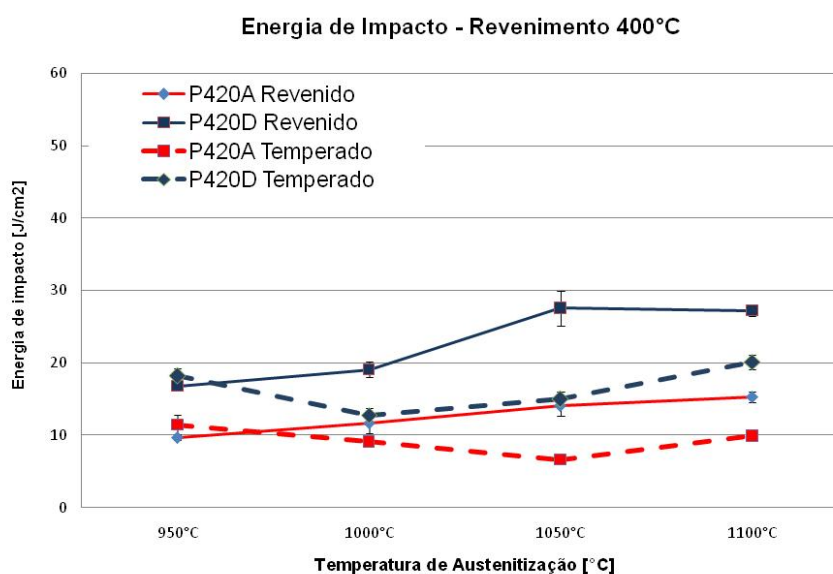


Figura 5.33 – Efeito da temperatura de revenimento em 400°C na energia de impacto dos aços P420A e P420D após austenitização em diferentes temperaturas.

5.6 Resistência à Corrosão

5.6.1 Resistência à Corrosão após Austenitização e Têmpera

Os resultados de ensaios de corrosão com solução a 3,5% de NaCl e Ph 8 obtidos após o tratamento térmico em quatro temperaturas de austenitização e têmpera para os aços estudados, estão dispostos nesta seção, onde é possível observar que a resistência à corrosão dos dois aços estudados segue uma tendência de aumento na medida em que se aumenta a temperatura de austenitização, sendo menor nas amostras sem tratamento térmico.

O aço P420D visualizado na Figura 5.34, sem tratamento térmico de têmpera, apresenta baixos valores de potencial de pite, devido o mesmo ser composto de microestrutura ferrítica e com carbonetos dispersos. O elemento Cr, que confere ao aço inoxidável a resistência a corrosão, estando sob a forma de carbonetos empobrece a liga deixando-o mais vulnerável à corrosão.

Após o processo de austenitização na temperatura de 950°C, embora esteja com a microestrutura martensítica, ocorre dissolução parcial dos carbonetos. Este fenômeno é responsável pelo baixo valor de potencial de pite mostrado no gráfico, comparável ao material não temperado. Entretanto em temperaturas de austenitização de 1000, 1050 e 1100 °C apresentam altos valores de potenciais de pite, pois com o aumento da temperatura e tempo de encharque, ocorre maior dissolução dos carbonetos e aumenta a quantidade de Cr na matriz, aumentando a resistência à corrosão.

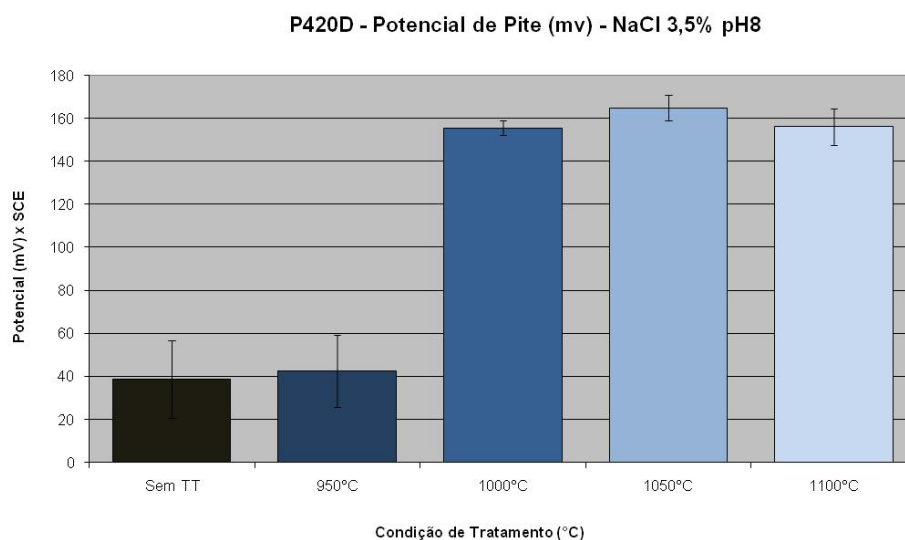


Figura 5.34 - Aço P420D, ensaio de potencial de pite com solução a 3,5% de NaCl e Ph 8.

Os resultados do potencial de pite das amostras aço P420A são mostrados na Figura 5.35 onde é possível visualizar que na amostra sem tratamento térmico de têmpera, apresente valores mais baixos de potencial de pite quando comparado como o aço P420D. Nota-se que na temperatura de austenitização de 950°C já ocorre um incremento do potencial de pite, entretanto a partir de 1000 °C o valor de potencial de

pite é maior que as demais temperaturas, e segue aumentando na medida em que se aumenta a temperatura de austenitização, indicando que a dissolução de carbonetos tenha ocorrido e incrementado a resistência a corrosão.

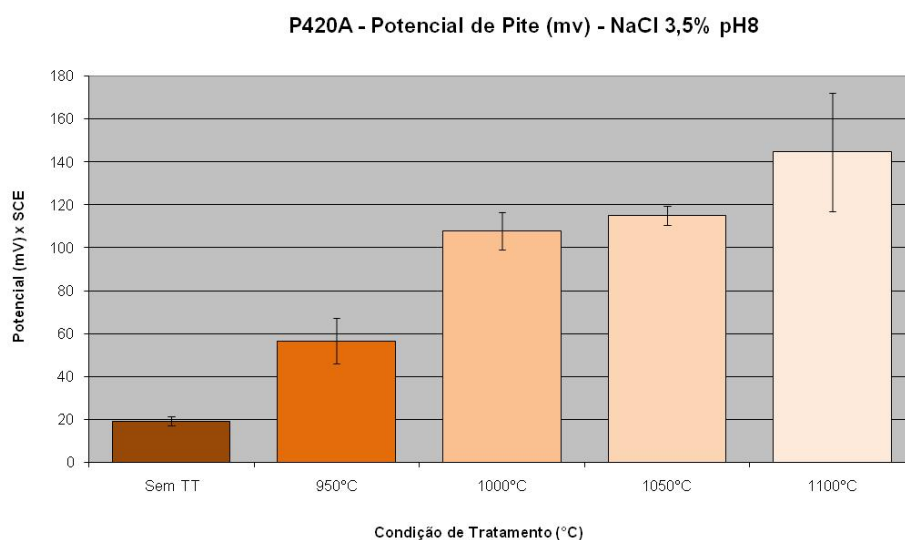


Figura 5.35 - Aço P420A, ensaio de potencial de pite com solução a 3,5% de NaCl e Ph 8.

Comparando os resultados de potencial de pite dos dois aços estudados, e notável que o Aço P420D comporta-se de maneira melhor que Aço P420A com valores de potenciais de pite maiores que este, uma vez que o mesmo tem o teor de carbono mais baixo em sua composição química, De modo geral, as amostras austenitizadas acima de 1000 °C apresentaram um melhor resultado de resistência à corrosão, tal incremento é resultado da dissolução dos carbonetos de Cromo, que disponibiliza Cr na matriz martensítica.

Nesta faixa de temperatura, o efeito benéfico da dissolução de carboneto, e enriquecimento de cromo da matriz, é maior do que o efeito deletério das tensões da rede interna. Para temperaturas mais altas, as tensões internas desempenham o papel mais importante no controle da resistência à corrosão ⁽⁷⁾.

Esse resultado corrobora com as imagens obtidas na microscopia ótica, que ilustra a quase ausência de carbonetos nesta condição nas amostras que foram austenitizadas respectivamente a 950 e 1000°C, pequena quantidade de carbonetos não dissolvidos revelando uma resistência à corrosão inferior nestas condições.

5.6.2 Resistência a Corrosão Após Revenimento

A temperatura de revenimento é um fator que influencia no processo de degradação do material por corrosão⁽⁷⁾. Quanto maior a temperatura do revenimento, maior a quantidade de re-precipitação de carbonetos, ou seja, menor a resistência à corrosão.

Ensaio de resistência a corrosão em amostras do aço P420D realizados após o tratamento térmico em quatro temperaturas de austenitização, e revenidas em temperaturas diferentes estão expostos nesta seção onde é observado na Figura 5.36 (a) que, para a temperatura de austenitização de 950°C, os valores de potencial de pite são relativamente baixos, mas tendem a crescer com o aumento da temperatura do revenimento, atingindo o máximo em 350°C e reduzindo em 400 °C.

A Figura 5.36 (b) mostra que na temperatura de austenitização de 1000°C, os valores de potencial de pite são maiores quando comparado às amostras austenitizadas a 950°C, e que tendem a permanecer estáveis mesmo com o aumento da temperatura do revenimento.

Na temperatura de austenitização de 1050 °C conforme Figura 5.36 (c) os valores de potencial de pite não evidencia melhorar com o aumento da temperatura de revenimento, permanecendo num mesmo patamar estável até 300°C, mas reduz consideravelmente nas temperaturas de 350 e 400°C.

A Figura 5.36 (d) mostra o potencial de pite para o aço austenitizado na temperatura de 1100°C, onde os valores aumentam a partir de 250 °C, porém ocorre a sua diminuição a partir de 300 °C da temperatura do revenimento.

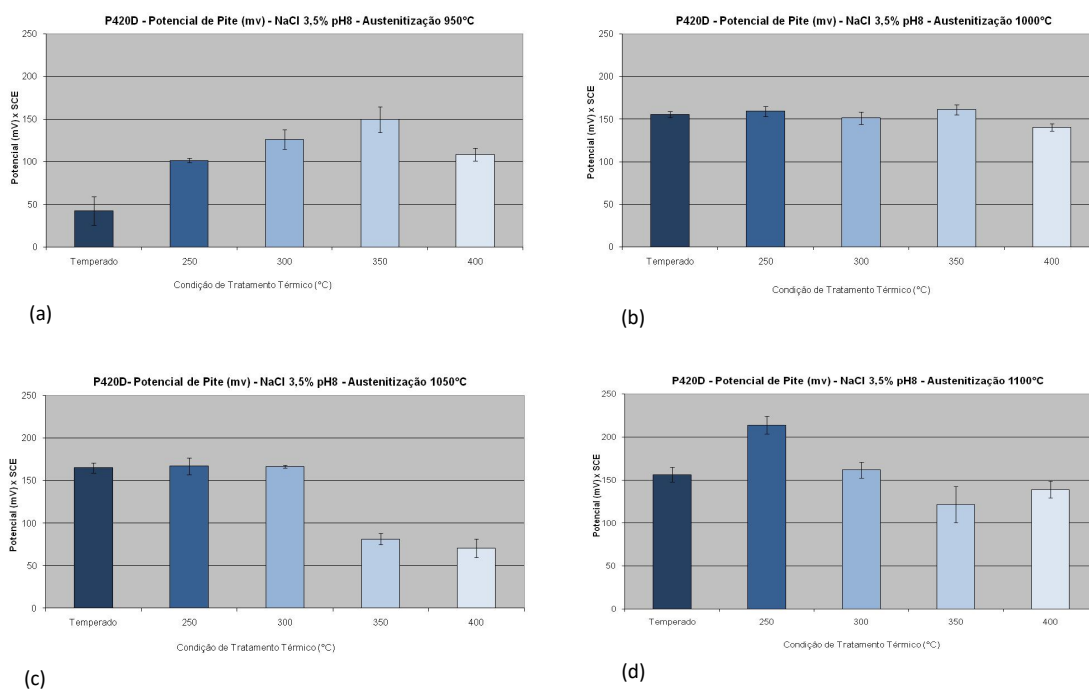


Figura 5.36 - Potencial de Pite com solução a 3,5% de NaCl e Ph 8 para o aço P420D austenitizado e revenido em diferentes temperaturas.

Os resultados de ensaios de corrosão para o aço P420A são mostrados nesta seção onde na temperatura de austenitização a 950°C observa-se na Figura 5.37 (a), que o valor do potencial de pite é baixo e cresce com a temperatura do revenimento de 250 °C, entretanto ocorre a redução nas demais temperaturas de revenimento.

Na temperatura de austenitização de 1000 °C, conforme observado na Figura 5.37 (b), os valores de potencial de pite são significativamente melhores que as amostras austenitizadas 950°C e revenidas. Há uma ligeira melhora em 300 e 350°C vindo a decrescer na temperatura de 400°C.

Os resultados de potencial de pite na temperatura de austenitização de 1050 °C é mostrado na Figura 5.37 (c), onde o valor de potencial de pite decresce na temperatura de revenimento de 250°C, entretanto aumenta na temperatura de 300°C e novamente decresce consideravelmente nas temperaturas de 350 e 400°C.

Na Figura 5.37 (d) são mostrados os resultados de potencial de pite em amostras do aço P420A processado na temperatura de austenitização de 1100 °C, percebe-se que há uma pequena melhoria do valor de potencial de pite na temperatura de revenimento de 250°C quando comparado como material somente temperado, e que piora em 300°C, e depois melhora novamente a partir de 350 °C .

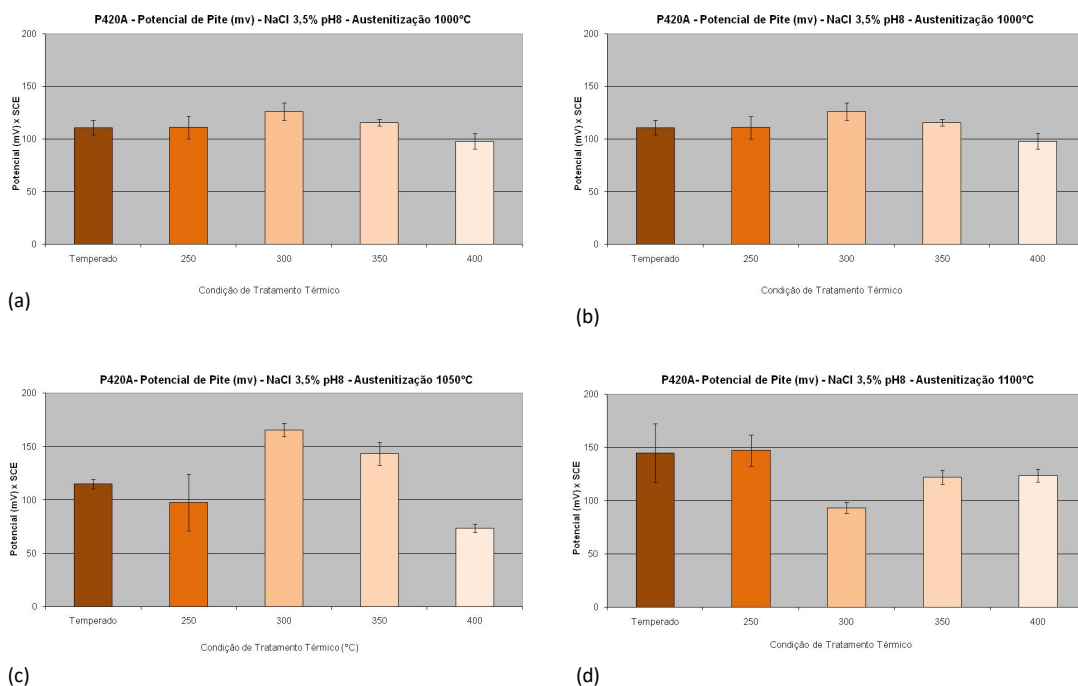


Figura 5.37 - Potencial de Pite com solução a 3,5% de NaCl e Ph8 para o aço P420A austenitizado e revenido em diferentes temperaturas.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados e das análises realizadas neste estudo, as principais conclusões obtidas são:

- A microestrutura dos aços P420A e P420D após serem austenitizados e temperados, apresentaram microestrutura martensítica fina, com alguns carbonetos não dissolvidos e dispersos na matriz, que foram diminuindo com o aumento da temperatura de austenitização.
- Houve o crescimento aparente de grãos da austenita prévia nos dois aços estudados a partir da temperatura de austenitização de 1050°C
- As diferentes temperaturas de revenimento, não provocaram mudanças significativas na microestrutura dos aços estudados.
- O aço P420A apresentou maiores valores de dureza que o aço P420D, onde o maior teor de Carbono do mesmo influenciou esta variável nas diferentes condições de tratamento.
- Os resultados das propriedades mecânicas mostraram elevados valores de limite de resistência e escoamento nas duas ligas estudadas após os tratamentos térmicos realizados. Entretanto o aço P420A apresenta maiores valores que o aço P420D dado ao maior teor de carbono desta liga.
- A temperatura de austenitização de 950°C, para ambos os aços, apresenta baixos valores de propriedades mecânicas. Isto se deve ao fato de haver uma transformação incompleta da fase ferrítica em martensita provocada pelo tempo e temperatura de austenitização insuficientes.

- Os aços P420A e P420D apresentam melhoria dos valores de propriedades mecânicas quando são submetidos às diferentes temperaturas de revenimento.
- Os aços P420A e P420D apresentam baixos valores de energia de impacto quando somente temperados, entretanto o aço P420D tem uma melhoria expressiva dessa propriedade quando submetido às temperaturas de revenimento.
- A melhoria da resistência a corrosão ocorre como aumento da temperatura de austenitização para os dois aços estudados, entretanto o aço P420D apresenta melhores valores de resistência ao pite devido este ter menor teor de carbono que o aço P420A.

7 RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

De acordo com a literatura, os aços inoxidáveis martensíticos quando processados termicamente em temperaturas e tempo suficientes para que haja completa austenitização e dissolução dos carbonetos, devem obter ao final do superresfriamento (têmpera) e revenimento, microestrutura martensítica, e propriedades como limite de escoamento e de resistência, tenacidade e resistência a corrosão de tal forma que possibilite o emprego destas ligas ao usuário final.

Dessa forma, os resultados alcançados nesse estudo validaram essa afirmativa, onde relação estruturas-propriedade de aços inoxidáveis martensíticos P420A e P420D produzidos comercialmente, subsidiam oferecer ao mercado, informações otimizadas de processamento para aplicações específicas e/ou customizadas.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar o efeito da temperatura de revenimento acima de 400°C nas propriedades mecânicas de tração e resistência ao desgaste

Avaliar da possibilidade de austenita retida através do processo de partição nestes aços utilizando a técnica de Difração de raios X (DRX) visando melhoria nas propriedades mecânicas de tração e resistência ao desgaste.

Avaliar a resistência ao desgaste dos materiais estudados neste trabalho

9 BIBLIOGRAFIA

1. COSTA, R.J.G, Substituição parcial do titânio pelo nióbio em um aço ASTM 409: efeito na microestrutura, textura e estampabilidade. UFMG, 2017, Belo Horizonte, MG.
2. MAGALHÃES, C. H. X. M, Efeito do processamento térmico nas transformações de fase ferrita-austenita em um aço inoxidável duplex do tipo UNS S32304. UFOP, 2017, Ouro Preto, MG.
3. LABIAPARI, W.S, influência de diferentes tipos de Acabamentos e lubrificantes na Estampagem de aços inoxidáveis. UFMG, 2003, Belo Horizonte, MG.
4. VIEIRA, F.B.E., Análise microestrutural e de resistência à corrosão de aço inoxidável ferrítico AISI 430. UFF 2016 Niterói Em <https://app.uff.br/riuff/handle/1/2301>
5. N. A. MARIANO; J. P. MUROLO, Efeito do Tratamento Térmico na Microestrutura e Resistência à Corrosão da Liga 12Cr1,8Ni0,1C, Revista Matéria, v. 11, n. 2, pp. 138 – 145, 2006
6. HASSAN, A.F, JAWAD,Q.A, Experimental study of the effect of austenitizing temperature and Multiple Tempering on the microstructure of AISI 410 martensitic stainless steel. The Iraqi Journal ForMechanical And Material Engineering, Vol.1, No18, May 2015
7. A PINEDO, C.E. Estudo Morfológico e Cinético da Nitretação por Plasma Pulsado do aço Inoxidável Martensítico AISI 420. Ph.D. Thesis, Energetic and Nuclear Research Institute — São Paulo University, São Paulo, SP, Brazil, 2000
8. GALINARI, C.M., Estudo Microestrutural de Aço Inoxidáveis Martensíticos com aplicações em Cutelaria Profissional. UFMG, 2005, Belo Horizonte, MG.
9. H. K. D. H. Bhadeshia, Honeycombe. Robert, Steels Microstructure and Properties 3. ed. 2006
10. PORTER, D.A, ESTERLING, K. Phase Transformation in Metals and Alloys. 2. ed. Nova York: Van Nostraned Reinhold, 1981. 520 p. 2.
11. KRAUSS, G. Steels: Heat Treatment Martesite steels :Microstructural Systems for Advanced Manufacture

12. GRACIOSO, J.F.F. Efeito das Condições de Têmpera na Microestrutura e Propriedades Mecânicas de um Aço Inoxidável Martensítico Fundido ca6nm UFSC 2003, Florianópolis,SC.
13. CANDELÁRIA, A.F., PINEDO, C.E. Influence of the heat treatment on the corrosion resistance of the martensitic stainless steel type AISI 420. *Journal of Materials Science Letters*, v. 22, p. 1151 – 1153, 2003.
14. KRAUSS, G. Martensite in steel: strength and structure, *Materials Science and Engineering*, Elsevier, 12-1999. Volumes 273–275, Pages 40-57
15. RUICHENG FAN, MING GAO, YINGCHE MA , XIANGDONG ZHA, XIANCHAO HAO AND KUI LIU, Effects of Heat Treatment and Nitrogen on Microstructure and Mechanical Properties of 1Cr12NiMo Martensitic Stainless Steel, *Journal of Materials Science and Technology*. November 2012
16. C.J SCHEUER E ALL. Effects of Heat Treatment Conditions on Microstructure and mechanical Properties of AISI 420 Steel. 21° CBECIMAT— Cuiabá, MT, SP, Brazil, 2014.
17. DIETER, G. E. *Mechanical Metallurgy*. 3. ed. McGraw-Hill Book Co., 1988. 751 p.
18. MORALES, L. F. G., HINRICHS, R., FERNANDES, L. A. D. A técnica de Difração de Elétrons Retro-Espalhados (EBSD) em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e sua Aplicação no Estudo de Rochas Deformadas. *Revista Pesquisas em Geociências*, n. 34, p. 19-34, 2007.
19. JON L. DOSSETT, HOWARD E. BOYER, *Practical Heat Treating: Second Edition* ASM International, 2006p. 185-189.
20. MA, D., CHI, H., ZHOU, J., YONG, Q. Microstructure and Mechanical Properties of Martensitic Stainless Steel 6Cr15MoV. *Journal of Iron and Steel Research, International*, n.19, p.56-61, 2012.
21. SPEICH, G.R, LESLIE, W.C, *Tempering of Steel* Speich Metallurgical Transactions volume 3, pages1043–1054 (1972)
22. ANIL KUMAR, R.K. Gupta. Comparative Study on tempering Response of Martensitic Grade AISI420 stainless Steel With Varying Carbon Content. *Materials Science Forum*, 2012.
23. KRAUSS, G. *Steels: Processing, Structure, and Performance*, Ed. ASM International, First printing, 2005.

24. ISFAHANY, N.A., SAGHAFIAN, H., BORHANI, G. The effect of heat treatment on mechanical properties and corrosion behavior of AISI420 martensitic stainless steel. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 509, p. 3931-3936, 2011
25. MARCUCI, J. R, SOUZA, E. C., CAMILO, C.C., DI LORENZO, Microstructural characterization of martensitic stainless steels submitted to industrial thermal processes for use in surgical tools DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/rbeb.2014.025>
26. KITAHARA, H. , UEJI ,A., TSUJI, N., MINAMINO, Y., Crystallographic features of lath martensite in low-carbon steel, *Acta Materialia* 54 1279–1288 (2006)
27. LIPPOLD C. J., DAMIAN K. J. *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*. Canada. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken. 2005
28. ANDRÉS, C.G., CARUANA, G., ALVAREZ, L.F. Control of M₂₃C₆ carbides in 0.45C–13Cr Martensitic Stainless Steel by means of three representative heat treatment parameters. *Materials Science and Engineering: A*, v. 241 (1-2), pp. 211-215, 1998.
29. FERREIRA, J.S. Efeito da Fração Volumétrica de Martensita, Formada no Resfriamento após Recozimento Intercrítico, no Grau de Estriamento, Propriedades Mecânicas e Estampabilidade de um Aço tipo AISI 430. UFMG, 2005, Belo Horizonte, MG
30. DUBEY, J.S., WADEKAR, S.L., CHAKRAVARTTY, J.K. Elevated temperature fracture toughness of AISI 403 martensitic stainless steel. *Journal of Nuclear Materials*, v. 254, pp. 271–274, 1998.
31. MA, D., CHI, H., ZHOU, J., YONG, Q. Microstructure and Mechanical Properties of Martensitic Stainless Steel 6Cr15MoV. *Journal of Iron and Steel Research, International*, n.19, p.56-61, 2012.
32. CABALLERO, F.G., CAPDEVILA, C., ALVAREZ, C., ANDRÉS, C. Thermoelectric Power Studies on a Martensitic Stainless Steel. *Scripta Materialia*, v. 50, p. 1061-1066, 2004
33. LIMA, L.S.G, Análise da influência da camada refundida nos valores de energia absorvida nos corpos de prova para ensaio mini charpy. Universidade federal de uberlândia – UFU, 2019, Uberlandia, MG
34. RAGGER,K.S., PANZENBOCK, M. CHLADIL, H. CLEMENS, H. A Novel Preparation Method for Lean Duplex Steels. *Microscopy Society of America* 2011

35. APERAM SOUTH AMERICA. Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações. Disponível em: <http://brasil.aperam.com/wp-content/uploads> - Acesso em: 01 dez. 2019
36. ASTM A240/A240M - 12. Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications. ASTM Internacional, 2012.
37. ASTM E8/E8M – 13a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM Internacional, 2013.
38. ASTM E 23 – 07a, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. ASTM Internacional, 2007.
39. ASTM G 5 – 94 (Reapproved 2004), Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements. ASTM Internacional, 2004.
40. KENNETT S.C, KRAUSS G., FINDLEY K.O. Prior austenite grain size and tempering effects on the dislocation density of low-C Nb–Ti microalloyed lath martensite. *Scripta Materialia* v.107 p.123–126, 2015.