**Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba**

**INFLUÊNCIA DO TEOR DE CARBONO NA FORMAÇÃO DE AUSTENITA RETIDA NO AÇO 43XX**

**Eduarda Santos Lima**

**Pindamonhangaba - SP  
2017**

**Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba**

**INFLUÊNCIA DO TEOR DE CARBONO NA FORMAÇÃO DE AUSTENITA RETIDA NO AÇO 43XX**

**Eduarda Santos Lima**

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba para graduação, no Curso Superior de Tecnologia em Processos Metalúrgicos.

Área de Concentração: \_Materiais\_\_\_\_\_

Orientador(a): \_Humberto Lopes Rodrigues\_\_

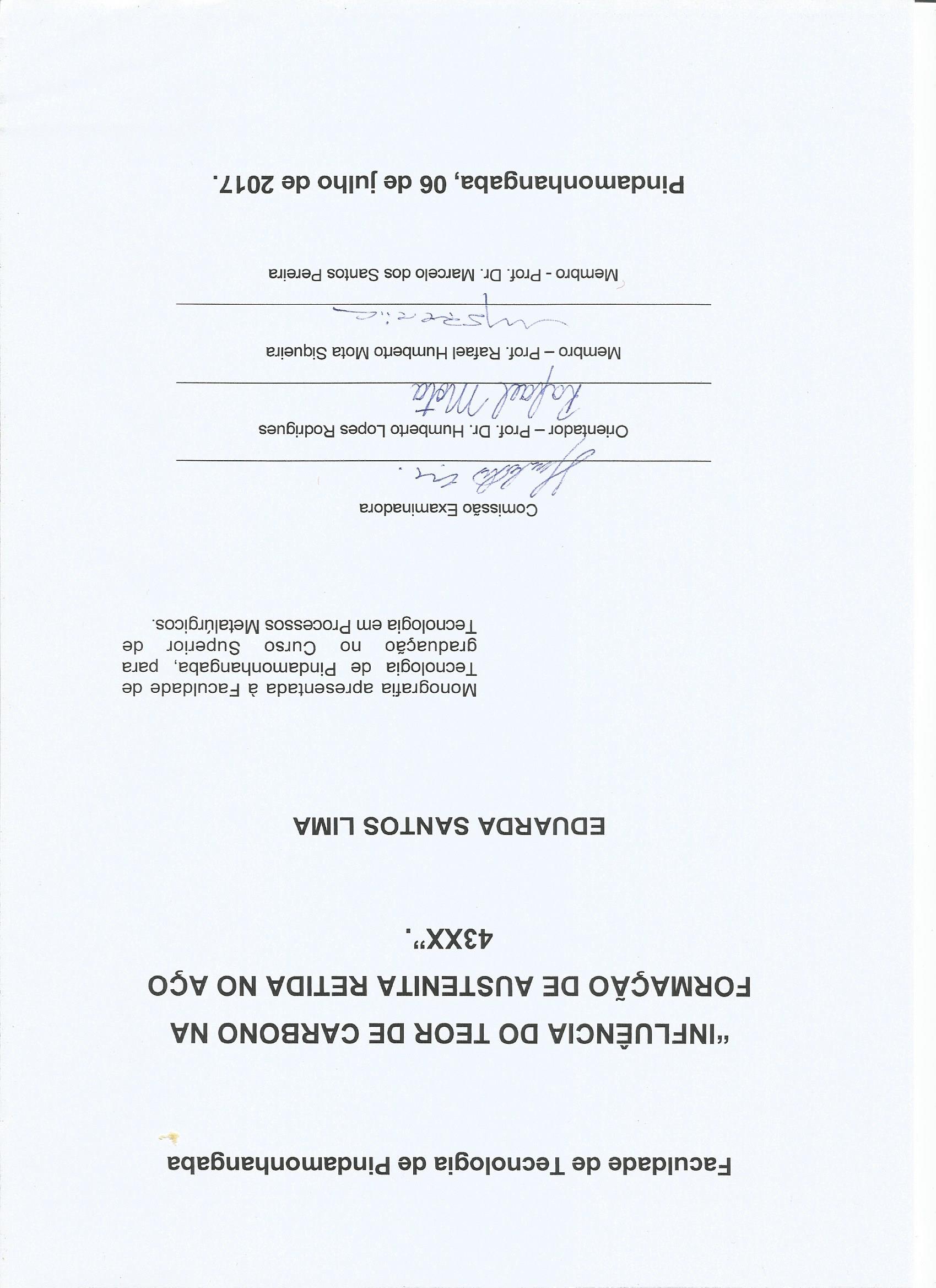
Coorientador(a): Gisélia Alves de Souza\_\_

**Pindamonhangaba - SP  
2017**

:

|  |
| --- |
| L732i Lima, Eduarda Santos.  Influência do teor de carbono na formação de austenita retirada no aço 43XX / Eduarda Santos Lima / FATEC Pindamonhangaba, 2017. 58f.; il.  Orientador: Professor Dr. Humberto Lopes Rodrigues  Co-orientadora: Professora Msc. Gisélia Alves de Souza  Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia de . Pindamonhangaba. 2017   1. ASI 43XX. 2. Caracterização microestrutura. 3. Austenita retida. I. Lima, Eduarda Santos. II. Rodrigues, Humberto Lopes. III. Souza, Gisélia Alves de. IV. Título.   CDD 669 |

Sueli Camargo de Souza – Bibliotecária FATEC Pindamonhangaba – CRB/8 7788

****

**DEDICATÓRIA**

A minha família, em especial a minha mãe, Daniele pelo apoio e encorajamento durante minha jornada.

**AGRADECIMENTO**

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos Professores Humberto e Jorge pela paciência na orientação deste trabalho, aos demais professores da Fatec de Pindamonhangaba pelo conhecimento compartilhado brilhantemente durante as aulas.

A professora Deborah, pela paciência e conhecimento transmitidos.

Aos meus amigos pelo apoio e pelo compartilhamento de tantos momentos, com quem nesses anos de estudo tive a felicidade de conviver.

“IF YOU CAN DREAM IT, YOU CAN DO IT”

Se você pode sonhar, você pode fazer

*Walt Disney*

Lima, E.S**. Influência do teor de carbono na formação de austenita retida no aço 43XX**. 2017. 58p. Trabalho de Graduação (Curso de Processos Metalúrgicos). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2017.

**RESUMO**

A aplicação dos aços da família 43XX é de suma importância para as indústrias aeroespacial e automobilística, sendo o aço 4340 o mais aplicado, devido a sua alta usinabilidade e temperabilidade. Normalmente são tratados termicamente para alterar suas propriedades mecânicas, sendo o processo de têmpera aplicado para o aumento de dureza a partir da transformação da fase austenita em martensita e o revenimento utilizado para aliviar as tensões internas, causadas pela têmpera. Entretanto, está presente, também, a austenita retida ou residual, resultante da não transformação completa, ou seja, a linha de fim de transformação (Mf) não é ultrapassada. Esta fase aumenta a tenacidade do material, podendo retomar um aumento de dureza durante o trabalho mecânico. Neste trabalho foram realizados os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, seguidos da caracterização microestrutural, buscando identificar as fases presentes, com o objetivo de verificar a influência do teor de carbono na formação de austenita retida. Pode-se concluir que, com o aumento do teor de carbono nas amostras de aço 43XX utilizadas nesta pesquisa, cresceu a porcentagem de austenita retida presente.

**Palavras-chave:** ASI 43XX, Caracterização microestrutura e Austenita retida.

Lima, E.S**. The Influence** **of the carbon content on the formation of retained in stell 43XX**. 2017. 58p. Graduation Project (Course of metallurgical processes). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2017.

**ABSTRACT**

The application of the 43XX family steels is of great importance for the aerospace and automotive industries, being 4340 steel the most applied due to its high machinability and hardenability. They are usually heat-treated to change their mechanical properties, being the tempering process applied for the increase of hardness from the transformation of the austenite phase to martensite and the tempering used to relieve internal tensions caused by tempering. However, the arrested and residual austenite is also present, resulting from complete non-transformation, that is, the transformation end line (Mf) is not exceeded. This phase increases the toughness of the material and may resume a hardness increasing during the mechanical work. In this work, the tempering and tempering treatments were carried out, followed by the microstructural characterization in order to identify the influence of the carbon content on the formation of retained austenite. It can be concluded that, with the increase of carbon content in the 43XX steel samples used in this research, the percentage of retained austenite increased.

**Keywords:** ASI 43XX, Microstructural characterization e Arrested austenite.

**LISTA DE TABELAS**

|  |  |
| --- | --- |
| Tabela 1 – Composição química dos aços (%peso)................................................. | 39 |
| Tabela 2 – Temperatura de austenitização aço 43XX............................................... | 44 |

**LISTA DE FIGURAS**

|  |  |
| --- | --- |
| Figura 1 - Mudança de fase do ferro puro ............................................................... | 18 |
| Figura 2 – Diagrama de equilíbrio de fases Ferro – Carbono ................................. | 20 |
| Figura 3 – Representações esquemáticas das microestruturas para uma liga ferro – carbono com composição eutetóide, acima e abaixo da temperatura A1 .... | 21 |
| Figura 4 – Diagrama de equilíbrio de fases Ferro – Carbono ................................. | 21 |
| Figura 5 – Transformação de fase a partir do grão de austenita ............................. | 23 |
| Figura 6 – TTT ......................................................................................................... | 25 |
| Figura 7 – Representação esquemática da formação de perlita a partir da austenita; a direção da difusão do carbono está indicada pelas setas ................... | 26 |
| Figura 8 – Esquema de formação de perlita a partir de grãos de austenita ............ | 26 |
| Figura 9 – Formação das subunidade de bainita .................................................... | 28 |
| Figura 10 – Célula unitária tetragonal de corpo centrado (TCC) para o aço martensítico mostrando os átomos de ferro (círculos) e os sítios que podem ser ocupados por átomos de carbono . ......................................................................... | 29 |
| Figura 11 – Mudanças de fases durante o resfriamento de uma liga hipo eutetóide..................................................................................................................... | 31 |
| Figura 12 – Curvas de endurecibilidade para cinco ligas de aço diferentes, todas contendo 0,4% C . ..................................................................................................... | 33 |
| Figura 13 – Esquema de têmpera e revenimento ..................................................... | 34 |
| Figura 14 – Diagrama esquemático representativo das operações de têmpera e revenimento ............................................................................................................... | 35 |
| Figura 15 – Aspecto micrográfico da estrutura mista troosita-martensita, ataque: nital, ampliação: 200x ................................................................................................ | 36 |
| Figura 16 - Aspecto micrográfico da estrutura sorbita, obtida pelo revenimento do aço temperado, ataque: nital, ampliação: 1000x ...................................................... | 37 |
| Figura 17 – Amostras aço 43XX posicionadas para tratamento térmico .................. | 40 |
| Figura 18a – Resina Arotec ....................................................................................... | 41 |
| Figura 18b – Amostras embutindo ............................................................................ | 41 |
| Figura 19a – Software Image J selecionando tonalidade clara da imagem .............. | 42 |
| Figura 19b – Software Image J determinando área a ser analisada ........................ | 42 |
| Figura 20- Amostras do aço 43XX temperadas atacadas com nital 2%.................... | 45 |
| Figura 20a – aço 4320 .............................................................................................. | 45 |
| Figura 20b – aço 4330 .............................................................................................. | 45 |
| Figura 20c – aço 4340............................................................................................... | 45 |
| Figura 20d – aço 4350 .............................................................................................. | 45 |
| Figura 20e - aço 4370............................................................................................... | 46 |
| Figura 21- Amostras do aço 43XX temperadas e revenidas atacadas com nital 2% | 46 |
| Figura 21a – aço 4320 .............................................................................................. | 46 |
| Figura 21b – aço 4330 .............................................................................................. | 47 |
| Figura 21c – aço 4340 .............................................................................................. | 47 |
| Figura 21d – aço 4350 .............................................................................................. | 47 |
| Figura 21e – aço 4370 .............................................................................................. | 47 |
| Figura 22 – Amostras temperadas e revenidas com ampliação de 100x.................. | 48 |
| Figura 22a – Aço 4320 .............................................................................................. | 49 |
| Figura 22b – Aço 4330 .............................................................................................. | 49 |
| Figura 22c – Aço 4340 .............................................................................................. | 49 |
| Figura 22d – Aço 4350 .............................................................................................. | 49 |
| Figura 22e – Aço 4370 .............................................................................................. | 49 |
| Figura 23 - % Austenita Retida ................................................................................. | 50 |
| Figura 24 – Dureza Rockwell C das amostras de aço 43XX .................................... | 51 |

## SUMÁRIO

[1 Introdução 15](#_Toc484186445)

[2 Revisão bibliográfica 17](#_Toc484186446)

[2.1 Aço 17](#_Toc484186447)

[2.1.1 Aço baixo carbono 18](#_Toc484186448)

[2.1.2 Aço médio carbono 19](#_Toc484186449)

[2.1.3 Aço alto carbono 19](#_Toc484186450)

[2.2 Diagrama Ferro Carbono 19](#_Toc484186451)

[2.2.1 Austenita (γ) 22](#_Toc484186452)

[2.2.2 Ferrita (α) 23](#_Toc484186453)

[2.2.3 Cementita (Fe3C) 23](#_Toc484186454)

[2.2.4 Ferro delta (δ) 24](#_Toc484186456)

[2.3 Curva TTT 24](#_Toc484186457)

[2.3.1 Perlita 25](#_Toc484186458)

[2.3.2 Bainita 27](#_Toc484186459)

[2.3.3 Bainita granular 28](#_Toc484186460)

[2.3.4 Martensita 29](#_Toc484186461)

[2.3.5 Austenita Retida (residual) 29](#_Toc484186462)

[2.4 Aço 43XX 30](#_Toc484186463)

[2.4.1 Aço 4320 31](#_Toc484186464)

[2.4.2 Aço 4330 32](#_Toc484186465)

[2.4.3 Aço 4340 32](#_Toc484186466)

[2.4.4 Aço 4350 33](#_Toc484186467)

[2.4.5 Aço 4370 33](#_Toc484186468)

[2.5 Têmpera 33](#_Toc484186469)

[2.6 Revenimento 35](#_Toc484186470)

[2.7 Caracterização microestrutural 37](#_Toc484186471)

[2.7.1 Ataque químico 37](#_Toc484186472)

[3 Materiais e métodos 39](#_Toc484186473)

[3.1 Material 39](#_Toc484186474)

[3.2 Tratamentos térmicos realizados 39](#_Toc484186475)

[3.3 Caracterização microestrutural 40](#_Toc484186477)

[3.4 Fração volumétrica da Austenita Retida 41](#_Toc484186478)

[3.5 Análise de dureza do material 42](#_Toc484186479)

[4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 44](#_Toc484186480)

[4.1 Determinação da temperatura 44](#_Toc484186481)

[4.2 – Caracterização microestrutural 44](#_Toc484186482)

[4.3 Fração volumétrica de Austenita Retida 47](#_Toc484186483)

[4.4 Análise de dureza 50](#_Toc484186484)

[5 CONCLUSÃO 52](#_Toc484186485)

[REFERÊNCIAS 53](#_Toc484186486)

[GLOSSÁRIO 56](#_Toc484186486)

## 1 Introdução

Os átomos são constituídos de neutros, prótons e elétrons. Em ligações químicas ocorrem ligações entre os elétrons de determinados elementos, tendo alguns um menor número de elétrons livres na camada de valência, tendendo assim a receber elétrons de outros átomos durante uma ligação química, as quais ocorrem naturalmente ou por algum tipo de incentivo do meio, como o calor e inserção de energia. Os materiais metálicos possuem uma maior quantidade de elétrons livres, de até três. Esses elétrons livres fazem o metal ser um bom condutor de eletricidade e de calor e possuir elevadas propriedades mecânicas e de resistência (CALLISTER, 2006).

Quando ocorre ligação com metais, a tendência de eles compartilharem seus elétrons, o qual tiver mais elétrons livres emprestara para o que precisa de elétrons para se estabilizar, como em ligações com o oxigênio, onde o metal tende a voltar a sua forma original, reagindo assim e oxidando (COLPAERT, 2008).

Normalmente os materiais metálicos consistem na combinação de elementos metálicos, como por exemplo o latão, que é formado de ligas de cobre e zinco, e o aço é o ferro com teor de carbono de ate 2,4 %. Muitos metais são adicionados a outros em baixa quantidade, sendo assim considerados elementos de liga, isso para auxiliar o material a adquirir uma propriedade mecânica diferenciada no material de acordo com o desejado, geralmente são adicionadas ligas para aumento da resistência mecânica, como a dureza e elevada tenacidade e aumento da resistência à corrosão (SHACKELFORD, 2010; SILVA, 2006).

Em metais a ligação atômica é metálica, não existindo assim restrição para quantidade e posição dos átomos na estrutura cristalina do material, a qual é a junção de átomos de forma ordenada. Na maioria dos metais a estrutura cristalina é cúbica de corpo centrado (CCC), como o ferro, cúbica de face centrada (CFC), como o alumínio ou hexagonal compacta (HC), como o titânio.

Materiais com estrutura CCC tem uma elevada dureza e geralmente alta ductilidade, já a CFC tem uma maior tenacidade, enquanto a estrutura HC tem alta dureza e fragilidade.

Os materiais são formados por grãos, os quais são compostos de átomos organizados em uma estrutura cristalina, (CCC, CFC, HC, entre outras) e em uma orientação cristalográfica, sendo os grãos em diferentes direções, formando assim os contornos de grão (CALLISTER, 2006; SILVA, 2006).

Os grãos podem ser constituídos de diferentes fases do material, as quais tem papel fundamental nas propriedades mecânicas do material. Essas fases são formadas no processo de fabricação do material, podendo variar com ela. Também é possível realizar a transformação de uma fase para outra através de tratamentos térmicos. As propriedades são determinadas a partir da quantidade de cada fase presente no material na temperatura desejada (CHIAVERINI,2005; ERISIR, 2013).

Os aços podem ter varias fases presentes, as quais são formadas durante a produção do material e alteradas em processos de tratamento térmico, como por exemplo, a têmpera, as fases se alteram de acordo com a taxa de resfriamento após o tratamento. Uma das fases presente no aço é a austenita, a qual quando tratada termicamente e variando o resfriamento pode se transformar em outras fases, completamente ou parcialmente, quando não transformada totalmente tem-se a fase conhecida como austenita retida (ABDALLA, 2006; SOUZA, 2008).

Este trabalho tem como objetivo comparar cinco amostras de aços com mesma composição química, porém com diferença na porcentagem de carbono presente em cada aço, tratadas termicamente por têmpera e revenimento de forma a mostrar a influência do teor de carbono na formação da fase austenita retida. Devido à austenita retida estar presente na estrutura do material temperado, sendo uma fase metaestável, a qual pode se transformar durante algum processo, influenciando nas propriedades mecânicas do material.

## 2 Revisão bibliográfica

## 2.1 Aço

“Materiais metálicos são normalmente combinações de elementos metálicos. Eles possuem um número grande de elétrons não localizados; isto é, estes elétrons não estão ligados a qualquer átomo em particular” (CALLISTER, 2006).

Os Aços carbono têm como principal elemento da composição o Carbono (entre 0,008% a 2,14%) e o Ferro como elemento primário, tendo elementos de liga como o Silício, Manganês, Cobre, Enxofre e Fósforo. Outros elementos existem apenas em quantidades residuais, residentes do processo de produção do material.

O aço é obtido através do refino (do ferro gusa), onde são retirados elementos indesejados através de alguns processos, como a retirada do fósforo pela desfosforação, retirada do enxofre e até mesmo do oxigênio, que além de ser obtido no contato com a atmosfera, também vem do ferro em sua forma original, mais estável, a de óxido. Nesta etapa é feito o ajuste da composição química para se obter o material necessário (LEANDRO, 2013).

O ferro é dividido em três fases, sendo ferro alfa (α), conhecido como ferrita, a qual é estável em temperatura ambiente (25º C) e tem estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) até aproximadamente 912º C, onde ocorre transformação de fase, tornando-se assim a fase ferro gama (γ), denominado austenita, de estrutura cúbica de face centrada (CFC), a qual tem mais interstícios, conseguindo conter nela um maior teor de carbono, já com temperatura acima de 1394º C ocorre nova transformação de fase, formando Ferro delta (δ), de estrutura cristalina cúbica de corpo centrada (CCC) até cerca de 1538º C onde o ferro se torna liquido, conforme é ilustrado na figura 1 (SILVA, 2006).

|  |
| --- |
| Figura 1 - Mudança de fase do ferro puro |
|  |
| Fonte: Autor |

O teor de Carbono adicionado ao ferro tem como uma das principais consequências a formação de novas fases de acordo com sua proporção, como a cementita (Fe3C) que suporta em sua estrutura ate 6,7% de carbono, enquanto a ferrita suporta no máximo 0,022%. Na formação do aço, de acordo com o percentual de carbono é possível definir as fases presentes no mesmo, podendo o mesmo material conter várias fases ao mesmo tempo (CALLISTER, 2006).

A quantidade de carbono presente no material define a classificação dos aços, sendo: aço com baixo teor de carbono, apresentando ate 0,30% de carbono em sua estrutura, aço médio carbono, que possui entre 0,30% a 0,60% de carbono e aço alto teor de carbono, que possui a partir de 0,60% do mesmo (CALLISTER, 2006).

## 2.1.1 Aço baixo carbono

Este aço possui elevada ductilidade e tenacidade, porem baixa dureza e resistência, isso devido a pouca quantidade de carbono presente em sua estrutura. É um aço de alta soldabilidade e usinabilidade, porem pouco tratado termicamente. Ele é aplicado na indústria automobilística para fabricação de chapas, na construção civil, na produção de tubos, entre outra (METALURGICA, [s.d.]).

## 2.1.2 Aço médio carbono

Este aço possui uma maior resistência e dureza, e uma média tenacidade e ductilidade. Ele é extremamente usado em tratamentos térmicos. È aplicado na indústria ferroviária, para fabricação de rodas e equipamentos, é usado em engrenagens e em outras peças que exijam um material com elevada resistência mecânica e resistência ao desgaste. (METALURGICA, [s.d.]).

## 2.1.3 Aço alto carbono

Este aço possui elevada dureza e resistência, devido à alta concentração de carbono nos interstícios da estrutura, porém são materiais de elevada fragilidade devido a baixa ductilidade. Geralmente eles são usados em tratamentos térmicos como têmpera e revenimento. É aplicado em folhas de serrote, martelo, entre outros materiais e ferramentas devido sua alta dureza e boa propriedade de corte (METALURGICA, [s.d.]).

## 2.2 Diagrama Ferro Carbono

“Corretamente interpretado, um diagrama de equilíbrio indica o número de fases presentes, suas composições e a porcentagem de cada fase, em função da temperatura, da pressão e da composição global do material.” (SHACKELFORD, 2010).

O diagrama de equilíbrio de fases Ferro-Carbono apresenta as fases do material de acordo com sua composição (teor de carbono) na horizontal, eixo X e no eixo Y, a temperatura referente a cada ponto em equilíbrio, na vertical. O material é analisado em seu ponto de equilíbrio para avaliação de cada fase, o qual é realizado um resfriamento extremamente lento para que cada fase esteja em sua forma estável nestes determinados parâmetros (temperatura e composição). Geralmente este diagrama varia o teor de carbono em até 6,7% onde ocorrem maiores transformações das fases, com a fase cementita (Fe3C) tento maior solubilidade de carbono, suportando 6,7%, sendo também conhecido como diagrama ferro – grafita, devido a não ocorrer solubilização completa. Este diagrama é apresentado na figura 2. (CALLISTER, 2006; RIOS, 2007).

|  |
| --- |
| Figura 2 – Diagrama de equilíbrio de fases Ferro – Carbono |
|  |
| Fonte: Callister (2006) |

Neste diagrama são apresentadas as fases estáveis do aço em sua determinada temperatura e composição, nele é apresentada a fase α (ferrita), a fase γ (austenita), a fase ferro- δ (delta), o Fe3C (cementita) e a fase líquida.

O ponto eutetóide é quando o material esta na temperatura A1 (temperatura eutetóide, 727ºC), tendo na composição exatamente 0,76% C, nele estão presentes três fases no aço, sendo elas α + γ + Fe3C. O material eutetóide quando resfriado lentamente apresenta a fase perlita (α + Fe3C), como apresentado na figura 3. Os aços com até 0,76% C são conhecidos como hipoeutetóides, entre 0,76% C e 2,14% C como hipereutetóide, e a partir de 2,14% C são denominados ferro fundido.

O patamar de divisão das fases presentes no diagrama ferro – carbono é mostrado na figura 4, onde são exemplificadas as linhas A1, A3 e Acm.

|  |
| --- |
| Figura 3 – Representações esquemáticas das microestruturas para uma liga ferro – carbono com composição eutetóide, acima e abaixo da temperatura A1 |
| http://s3.amazonaws.com/magoo/ABAAAAGDUAJ-3.jpg |
| Fonte: Callister (2006) |
| Figura 4 – Diagrama de equilíbrio de fases Ferro – Carbono |
| diagrama.png |
| Fonte: Adaptado de Callister (2006) |

A zona de austenitização é a área do diagrama onde o aço se transforma todo na fase austenita. A fase γ (austenita) são formadas por grãos com solubilidade de carbono de ate 2,14%, sendo geralmente instável em temperatura ambiente, tendo estrutura cristalina CFC e como principal característica não ser magnética. Os grãos de austenita se transformam em outras fases geralmente através do processo de difusão do carbono presente no material durante o resfriamento do mesmo (RIOS, 2007; CALLISTER, 2006; SILVA, 2006).

A linha A1 é o patamar de transformação da temperatura eutetóide, tendo a linha Ac1 a ser analisada para um material o qual passará por algum tratamento térmico que exija o conhecimento da mesma. A Ar1 é analisada para um material que passará por um processo de resfriamento.

A linha A3 é usada para identificar no aço hipoeutetóide onde se inicia a zona critica, sendo adicionada a letra c para representar a analise da temperatura quando o material for passar por um tratamento de aquecimento, sendo Ac3, e a letra r para processo de resfriamento, Ar3.

A linha Acm é um patamar para indicar ao aço hipereutetóide a linha de transformação de fases do material, apresentando a letra c como identificação de um processo de aquecimento e a letra r para resfriamento.

## 2.2.1 Austenita (γ)

“É a forma estável do ferro puro entre 910ºC (1670ºF) e 1400ºC (2550ºF)” (VAN VLACK, 2000, p. 243). Sendo geralmente instável em temperatura ambiente, os grãos de austenita se transformam em outras fases do aço geralmente através da difusão do carbono presente no material durante o resfriamento do mesmo, como apresenta o esquema na figura 5 (CALLISTER, 2006; RIOS, 2007; SILVA, 2006).

A fase ferro gama (γ) é denominada austenita são formadas dentro da zona de austenitização, por grãos de dimensão irregulares com solubilidade máxima de carbono de ate 2,14% com temperatura de 1147ºC, ocorrendo transformação de fase de acordo com a temperatura, tendo solubilidade mínima de 0,76% de C à 727ºC, devido a isso, como são denominados aços os materiais com até 2% C, todo material de aço passa pela fase austenita em temperaturas elevadas (CHIAVERINI, 2005; VAN VLACK, 2000).

|  |
| --- |
| Figura 5 – Transformação de fase a partir do grão de austenita |
|  |
| Fonte: Silva (2006) |

Na temperatura de estabilidade, a austenita tem como principais propriedades ser dúctil e mole, sendo útil durante os processos de fabricação do aço, pois muitos materiais são laminados acima de 1100ºC, pois nesta fase ele tem estrutura cúbica de face centrada (CFC) e não é magnético (VAN VLACK, 2000).

## 2.2.2 Ferrita (α)

A fase alfa (α) é conhecida como ferrita, formada geralmente por grãos equiaxiais, gerada através da transformação da austenita, tendo baixa solubilidade, suportando em temperatura ambiente até 0,008% de carbono, tendo solubilidade máxima de 0,022% C na temperatura eutetóide. Devido a sua baixa solubilidade é conhecido comercialmente como ferro puro, tendo baixa dureza, baixa resistência a tração e alta ductilidade (CHIAVERINI, 2005; RIOS, 2007).

## 2.2.3 Cementita (Fe3C)

A fase Fe3C, carbeto de ferro, conhecido como cementita, o qual suporta até 6,7% de carbono em sua composição, tendo formato de grãos equiaxiciais quando formado acima da temperatura eutetóide, de 727°C, e formato de lamelas quando formado abaixo da mesma. Tendo a dureza e a fragilidade elevada. (RIOS, 2007; VAN VLACK, 2000).

## 2.2.4 Ferro delta (δ)

A fase delta (δ), ferro delta é similar ao ferro α, porém ela é obtida apenas em altas temperaturas, acima de 1394ºC, não tendo forma estável em temperatura ambiente, com solubilidade máxima de 0,09% Ca 1495ºC (SILVA, 2006; VAN VLACK, 2000).

## 2.3 Curva TTT

O diagrama de transformação de fases, o TTT é a curva de transformação, tempo e temperatura de um material, tendo uma diferente curva para cada composição. Nele a temperatura é medida em ºC (Celsius) e/ou º F (Fahrenheit), o tempo é calculado em segundo, apresentado por uma escala logarítmica (100, 101, 102, 103, 104, 105), sendo apresentado até 105, já que este valor representa aproximadamente 27,78 horas, e a transformação ocorre através do resfriamento, já que o material deve estar na zona de austenitização para ocorrer transformação de fase a partir da austenita, para ocorrer a transformação o material deve atravessar a linha de inicio de alguma fase, podendo variar de acordo com a taxa de resfriamento.

As fases que podem ser formadas em um aço hipoeutetóide são ferrita; perlita grossa; perlita fina; bainita superior; bainita inferior; martensita e austenita retida. A divisão das fases é apresentada na figura 6, na curva TTT de uma aço eutetóide.

|  |
| --- |
| Figura 6 – TTT |
|  |
| Fonte: Callister (2006) |

## 2.3.1 Perlita

“A reação eutetóide do sistema Fe-C envolve a formação simultânea de ferrita e cementita a partir da austenita” (SILVA, 2006), já Chiaverini (2005) define a perlita como “a mistura mecânica de 88,5% de ferrita e 11,5% de cementita, na forma de lâminas finas dispostas alternadamente. Suas propriedades são intermediárias às da ferrita e da cementita”. A transformação se inicia no contorno de grão da austenita, formando ferrita, a qual tem baixa solubilidade, ocorrendo assim a difusão do carbono para regiões vizinhas, formando assim lamelas de Fe3C, de maior solubilidade, sendo assim lamelas variando entre Fe3C e α, tendo uma distribuição homogênea das fases de acordo com a solubilidade das mesmas em equilíbrio, como é apresentado na figura 7 (RIOS, 2007).

|  |
| --- |
| Figura 7 – Representação esquemática da formação de perlita a partir da austenita; a direção da difusão do carbono está indicada pelas setas. |
| http://s3.amazonaws.com/magoo/ABAAAeiygAI-157.jpg |
| Fonte: Callister (2006) |

No aço hipoeutetóide a fase perlita se forma durante o resfriamento do material a partir da fase austenita onde inicia a formação de ferrita a partir do contorno de grão, como essa fase suporta baixo teor de carbono ocorre difusão do mesmo, iniciando a formação de cementita intercalando com as lamelas formadas de ferrita para aços hipoeutetóides, enquanto para aços hipereutetóides forma inicialmente lamelas de cementita (Fe3C) intercalando com lamelas de ferrita, como é apresentado na figura 8, com um aço hipereutetóide, iniciando a transformação de fases pela formação de Fe3C no contorno de grão da austenita, intercalando com lamelas de ferro-α.

|  |
| --- |
| Figura 8 – Esquema de formação de perlita a partir de grãos de austenita |
|  |
| Fonte: Colpaert (2008) |

A perlita quando formada logo abaixo da temperatura eutetóide, com um resfriamento lento, é chamada de **perlita grossa**, ou grosseira por alguns autores, tendo como característica suas camadas mais grossas, tanto da fase ferrita, quanto da fase cementita, devida a alta taxa de difusão o carbono consegue se difundir em um maior espaço, pelo maior tempo e temperatura de processo, resultando em lamelas mais grossas. Já com a redução da temperatura, como obsevada na curva TTT representada pela figura 6, é formada a **perlita fina**, a qual tem como característica a formação clássica da perlita, porém com lamelas finas, isso devido a redução da temperatura, o que acaba por reduzir a taxa de difusão do carbono.

## 2.3.2 Bainita

Assim como a perlita, outros microconstituintes são formados a partir da transformação austenítica, como por exemplo, a **bainita.** A bainita é constituída pelas fases perlita e cementita, com formato de agulhas ou placas, sendo formado por uma matriz de ferrita e partículas alongadas de cementita através de um processamento isotérmico, onde se resfria rapidamente o material durante um processamento térmico e se cria um patamar em uma determinada temperatura para ocorrer a transformação para fase desejada.

Para Bhadeshia (2001) o microconstituinte bainita é uma forma lamelar constituído das fases ferrita e cementita, sendo classificadas em dois principais tipos: bainita superior e bainita inferior, tendo como principal diferença a distribuição dos precipitados, como apresenta a figura 9, onde a esquerda observa-se a perlita superior, a qual é formada abaixo da temperatura de transformação de perlita, um pouco abaixo do cotovelo da curva, quando a austenita se transforma em matrizes de ferrita, e entre estas ripas formadas se precipita os carbonetos de cementita, intercalando as fases, obtendo um material com dureza elevada devido aos precipitados intercalando a matriz e uma tenacidade relativamente boa pela matriz ferrítica. No lado direito da figura observa-se o esquema de formação da bainita inferior, a qual ocorre um pouco acima da linha de transformação de martensita, formando matrizes de ferrita, intercalando com precipitados de cementita, e apresentando também precipitados de cementita dentro da matriz de ferrita, devido a menor taxa de difusão do carbono essas lamelas se formam mais finas, e devido aos precipitados dentro da matriz e intercalando com a mesma o material tem como característica uma dureza mais elevada.

|  |
| --- |
| Figura 9 – Formação das subunidade de bainita |
|  |
|  |

## 2.3.3 Bainita granular

“...Outras formas de bainita, além das variações clássicas de bainita superior e inferior, podem ser encontradas como a bainita granular, a bainita colunar, a bainita inversa, bainita livre de carbonetos, as quais estão restritas às distintas condições de temperatura de transformação e composição do aço.” (SOUZA, 2008)

“Na bainita granular os feixes podem ser maiores e, quando observados no microscópio ótico, parecem blocos de bainita e austenita, por isso é chamada de bainita granular. Uma das características é a ausência de carbonetos na microestrutura. O carbono proveniente da partição da ferrita bainítica estabiliza a austenita residual e a microestrutura final contém austenita retida e martensita com alto teor de carbono além da ferrita bainítica.” (BRANDÃO, 2007)

Ela é obtida através de resfriamento continuo, sem a necessidade de o material passar por um processamento isotérmico em busca da formação de bainita, porém essa característica é dada a esta fase pelos elementos de liga presentes na liga, o qual distorcem a curva TTT, possibilitando a sua formação sem necessidade de patamares de temperatura durante o processo.

## 2.3.4 Martensita

Outro microconstituinte possível de se formar no aço é a martensita, sendo transformado sem difusão a partir do material austenitizado resfriado rapidamente. Sendo uma estrutura monofásica fora do equilíbrio, pois é uma solução sólida supersaturada ( com excesso de carbono na estrutura) de extrema dureza e com elevado níveis de tensão interna, devido a ser formada de uma estrutura austenítica de estrutura cristalina CFC (cúbica de face centrada) em martensita com estrutura cristalina TCC (tetragonal de corpo centrado), como apresentado na figura 10, com maior espaço entre os átomos de ferro, suportando em seus interstícios supersaturação de átomos de carbono, obtendo assim um material de extrema dureza e fragilidade, que ao ser aquecido pode sofrer difusão.

|  |
| --- |
| Figura 10 – Célula unitária tetragonal de corpo centrado (TCC) para o aço martensítico mostrando os átomos de ferro (círculos) e os sítios que podem ser ocupados por átomos de carbono. |
| Resultado de imagem para transformação CFC para TCC |
| Fonte: Callister (2006) |

## 2.3.5 Austenita Retida (residual)

Com determinados tratamentos térmicos seguidos de resfriamento relativamente rápido realizados em aço carbono pode se obter na microestrutura do material a fase austenita retida, a qual é obtida devida a uma transformação de fases não ser completo, como por exemplo, um aço médio carbono temperado e resfriado até temperatura ambiente pode conter austenita retida, pois para transformação completa em martensita seria necessário no resfriamento levar o material a uma temperatura muito inferior a 0º Celsius. Sendo uma fase metaestável a temperatura ambiente, quando deformada plasticamente, pode ocorrer transformação em martensita.

Para Gobbi (2009) a austenita retida tem influência direta em algumas propriedades mecânicas do material, ela reduz a resistência ao desgaste e aumenta a formação de microcarbonetos em aço ferramenta austenitizado à baixa temperatura, sendo necessário tratamento de criogenização, que auxilia na transformação de martensita, para que tenha transformação de fase praticamente total, transformando também parte da austenita retida em martensita. Enquanto Sakuma (1991) faz uma ligação entre a austenita retida com a resistência - ductilidade do aço, pois a presença de austenita retida na microestrutura, em especial martensitica, alivia a fragilidade do material, o deixando mais dúctil.

## 2.4 Aço 43XX

Aços contendo 0,20% C ou menos geralmente não recebem nenhum tratamento térmico. Se necessário realizar a têmpera, o material depende de alguns requisitos de propriedades específicas, como a porcentagem de carbono e elementos de liga presentes no mesmo para formação de novas fases desejadas (ASM, 1991).

Nos aços hipoeutetóide são formadas estruturas de ferrita nodular no contorno de grão da austenita, e com o resfriamento ocorre a formação da fase perlita, esse resfriamento é representado na figura 6. Para analise da microestrutura do material formada através de algum processamento térmico é usada a curva ttt, como apresentado na figura 11, a curva ttt do aço 4340.

|  |
| --- |
| Figura 11 – Mudanças de fases durante o resfriamento de uma liga hipo eutetóide. |
|  |
| Fonte: Callister (2006) |

## 2.4.1 Aço 4320

Aços com carbono entre 0,008% C a 0,25% C, geralmente são indicados para tratamentos térmicos de cementação. Tendo uma boa propriedade de usinabilidade devido ao seu baixo teor de carbono e consequente a isso uma dureza reduzida (CHIAVERINI, 2005).

Segundo GGD ([s.d.]), o aço 4320 é um aço para beneficiamento ligado ao cromo, níquel e molibdênio e com baixo teor de carbono para facilitar a soldagem. O baixo teor de carbono faz o material ter maior usinabilidade, devido a baixa dureza e permite o uso de cementação para elevar a resistência ao desgaste. Possui temperabilidade média com combinação de resistência mecânica média e resistência à fratura.

Segundo ASM (1991) o aço 4320 tem temperatura de austenitização de 885º C (1625º F). Sendo necessário atingir esta temperatura para a realização de determinados tratamentos térmicos, como a têmpera, usada para obter propriedades especificas e alteração da microestrutura a partir dos grãos de austenita.

Suas aplicações são geralmente em engrenagens para automóveis e tratores, juntas universais, correntes de acionamento de máquinas, eixos, capas de rolamento, colunas, coroas e cilindros (AÇOVISA [s.d.]; GGD [s.d.])

“Ele é usado em componentes para sistemas mecânicos onde se necessita uma homogeneidade de dureza ao longo da seção transversal em pequenas ou grandes seções.” (GGD [s.d.])

## 2.4.2 Aço 4330

O aço 4330 é considerado um aço médio carbono, e baixa liga. Segundo ASM (1991) ele está entre os aços mais utilizados para tensões de escoamento de 1240 a 1380 MPa (180 a 200 ksi).

Os aços médio carbono tem elevada ductilidade se trabalhado a quente, devido a isso são aplicados em forjamentos. Quando combinados com elementos de liga são usados em aplicações que necessitam de maior resistência (adquirida no processo de têmpera), porem mantendo parte da ductilidade do material. A temperabilidade deste material é relacionada aos seus elementos de liga. Tendo aplicação direta em engrenagens, devido a dureza se elevar e manter parte da ductilidade e usado em caminhões (CALLISTER, 2006).

## 2.4.3 Aço 4340

O aço 4340 é considerado um aço médio carbono, uma de suas principais características é sua alta temperabilidade, a qual facilita a formação da fase martensita na estrutura do material quando tratado termicamente. A dureza deste material é cerca de 50 HRC ( 531 HV), seu limite de escoamento é cerca de 1.550 MPa e resistência a tração de 1.855 MPa, possuindo boa combinação de resistência, ductibilidade e tenacidade , tendo a curva de endurecibilidade de aços com 0,40% C apresentado na figura 12 (AÇOVISA, [s.d.]; CALLISTER, 2006).

Este material é extremamente aplicado na indústria aeronáutica, em tratores, automóveis, engrenagens, peças temperadas, entre outras aplicações. No tratamento térmico ele é usado na têmpera, sendo resfriado em óleo, e pouco usado no processo de cementação e revenimento (AÇOVISA, [s.d.]).

|  |
| --- |
| Figura 12 – Curvas de endurecibilidade para cinco ligas de aço diferentes, todas contendo **0,4% C.** |
|  |
| Fonte: Callister (2006) |

## 2.4.4 Aço 4350

**“**O aço ultrarresistente AISI 4350, destinado a aplicações aeronáuticas, com médio teor de carbono e baixa liga, possui uma microestrutura complexa composta por diversas fases, tais como: bainita, ferrita, austenita retida e martensita. Diferentes microestruturas multifásicas podem ser formadas neste aço, com predomínio de uma destas fases, em função dos tratamentos térmicos selecionados e aplicados.” (NOGUEIRA, 2015).

## 2.4.5 Aço 4370

O aço 4370 é considerado um aço alto teor de carbono, tendo teor próximo ao de um aço eutetóide, uma de suas principais características é sua alta temperabilidade, a qual facilita a formação da fase martensita na estrutura do material quando tratado termicamente devido ao seu elevado teor de carbono.

## 2.5 Têmpera

Segundo Callister (2006), a influência da composição da liga sobre a capacidade de um aço para se transformar à martensita através de um particular tratamento de têmpera está relacionada a um parâmetro denominado temperabilidade.

Um aço de alta temperabilidade se endurece, ou forma martensita, não somente na superfície, mas também no interior da peça. Segundo Callister (2006) temperabilidade é uma medida da profundidade até onde uma liga específica pode ser endurecida.

O processo de têmpera é basicamente a elevação da temperatura do material a altas temperaturas, no caso do aço a temperatura deve ser levada acima da temperatura de austenitização, cerca de 50º C , a zona de austenitização, mantido na temperatura durante um determinado período, cerca de 1 minuto por milímetro de espessura do material e o mesmo deve ser resfriado rapidamente, podendo ser em diferentes meios, como em água, em óleo, ao ar de forma mais lenta, entre outras dependendo da estrutura que se deseja formar a partir da fase austenita (CHIAVERINI, 2005).

Geralmente este processo é realizado para obter a estrutura martensita no material, a qual auxilia no aumento da dureza do mesmo, porém durante o processamento devido ao choque térmico gera-se tensão residual no material, sendo necessário realizar um processo de revenimento posteriormente, o qual ele a temperatura do material já temperado abaixo da zona critica para aliviar tensões internas. Este processo pode ser resumido no esquema apresentado na figura 13, onde γ é a fase austenita, a ser transformada, formando α (ferrita) e cementita, em diferentes fases quando tratado termicamente. O resfriamento é apresentado na figura 14, a qual apresenta um diagrama esquemático da formação de martensita, no qual o material é elevado a alas temperaturas, temperado e revenido (CALLISTER, 2006).

|  |
| --- |
| Figura 13 – Esquema de têmpera e revenimento |
|  |
| Fonte: (VAN VLACK, 2000) |

|  |
| --- |
| Figura 14 – Diagrama esquemático representativo das operações de têmpera e revenimento |
|  |
| Fonte: (CHIAVERINI, 2008) |

## 2.6 Revenimento

Revenimento é um tratamento térmico usado após o processo de têmpera para aliviar tensões presentes no material, pois o material para têmpera, atinge geralmente austenitização completa, tendo assim como fase presente a austenita de estrutura cristalina CFC ( cúbica de face centrada), a qual quando resfriada se transforma em outras fases, em resfriamentos de lento a moderado por difusão do carbono presente, e em resfriamento rápido gera martensita, de estrutura TC ( tetragonal compacta), de maior volume, gerando assim tensões internas e muitas vezes gerando trincas no material, sendo assim necessário o processo de revenimento (CALLISTER, 2006; CHIAVERINI, 2008; COLPAERT, 2008)

“O revenimento consiste no aquecimento a temperaturas inferiores a temperatura Ac1 para aumentar a ductilidade e tenacidade e ajustar a resistência mecânica ao nível desejado e promover alívio de tensões” (COLPAERT, 2008, p. 302). Sendo a temperatura Ac1 a temperatura cerca de 50º C acima do inicio da zona critica.

Como a martensita é uma fase metaestável, ou seja, suas características se alteram com o tempo e com a temperatura, com o revenimento é possível obter um alívio de tensão residual no material, abaixando a dureza, a resistência mecânica e aumentando a ductilidade, no caso do aço, apresentar a ferrita e a cementita, e devido à difusão do carbono durante o processo se obtém a martensita revenida quando tratadas em temperatura entre 150 e 230 ºC.

A martensita revenida perde um pouco de dureza, diminuindo a fragilidade quando comparado a um material apenas temperado. Na figura 15 está representada a estrutura martensita no material temperado e na figura 16, a estrutura martensita revenida (COLPAERT, 2008).

Martensita revenida pode ser aproximadamente tão dura e tão forte quanto a martensita, mas com substancialmente aumentadas ductilidade e tenacidade. A dureza e a resistência mecânica podem ser explicadas pela grande área de contorno de fases entre ferrita e cementita por unidade de volume que existe para partículas de cementita muito finas e numerosas. De novo, a cementita dura reforça a matriz de ferrita ao longo dos contornos de grão e estes contornos de grão também agem como barreiras para o movimento de discordâncias durante a deformação plástica. A contínua fase ferrita é também muito dúctil e relativamente tenaz, o que explica a melhoria destas propriedades na martensita revenida (CALLISTER, 2006).

|  |
| --- |
| Figura 15 – Aspecto micrográfico da estrutura martensitica, ataque: nital, ampliação: 200x |
|  |
| Fonte: Chiaverini (2005) |

|  |
| --- |
| Figura 16 - Micrografia obtida pelo revenimento do aço temperado, ataque: nital, ampliação: 1000x. |
|  |
| Fonte: Chiaverini (2005) |

## 2.7 Caracterização microestrutural

“Os significativos efeitos da microestrutura, nas características físicas e mecânicas dos aços, fazem da investigação metalográfica uma necessidade para entendimento e aperfeiçoamento de suas propriedades.” (SOUZA, 2008).

“Os ataques químicos aplicados a materiais têm como finalidade revelar sua microestrutura, assim como a morfologia das fases presentes e, em alguns casos, as impurezas que venham a estar dispersas na matriz microestrutural. As condições de ataque tais como, composição química, temperatura e tempo, podem ser variadas...” (ASSIS, [s.d.]).

## 2.7.1 Ataque químico

Os reagentes corrosivos atacam quimicamente a superfície da amostra, através de um processo de corrosão controlada, resultante da diferença de potencial eletrolítico entre as áreas da superfície atacada (VOORT, 1984). “Essas diferenças de potencial eletrolítico podem existir entre grãos com diferentes orientações cristalográficas, entre o contorno de grão e o interior do grão e, ainda, entre duas ou mais fases distintas.” (SOUZA, 2008)

A solução mais comum usada para revelar a estrutura do aço é o nital, composto geralmente de 2% de ácido nítrico e 98% de álcool etílico. (VOORT, 1984). “Porém, conforme a composição do material ou constituição microestrutural, este reagente responde de maneira distinta em cada grão atacado, dependendo das diferentes orientações cristalográficas da estrutura. Isto implica que nem sempre todos os contornos de grãos de ferrita são delineados, podendo levar a erros em medições e contagens” (SOUZA, 2008). Para Pereira (2004) este ataque auxilia na identificação das fases, porém não distingue a ferrita da austenita retida, nem a bainita da martensita.

Segundo Bhadeshia (2001) e Girault (1998) o ataque químico com metabissulfito de sódio, composto por 10% de Na2S2O5 diluído resulta na fase austenita retida na coloração branca, enquanto nas demais fases presentes no material ocorrem uma oxidação maior, apresentando uma coloração escura.

## 3 Materiais e métodos

## 3.1 Material

Os materiais utilizados neste estudo são os aços ABNT 4320, 4330, 4340, 4350 e o 4370, de uso aeronáutico. As composições químicas são apresentadas na tabela 1, variando apenas o teor de carbono presente nos mesmos.

**Tabela 1 – Composição química dos aços (%peso)**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Aço 43XX** | **C** | **Mn** | **Si** | **Cr** | **Mo** | **Ni** | **P** | **S** |
| **%** | XX | 0,70 | 0,20 | 0,80 | 0,24 | 1,71 | 0,008 | 0,012 |

XX – Variando para cada tipo de aço: de 0,20, 0,30, 0,40, 0,50 e 0,70 % em peso.

As amostras usadas foram fornecidas em forma de pastilhas com diâmetro de aproximadamente 20 mm e espessura de 4 mm, foram cortadas pela cut off da marca AROTEC em 4 partes em forma de fatias de pizza.

## 3.2 Tratamentos térmicos realizados

Foram realizados os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento para produção da fase martensitica no material no laboratório de fundição da Fatec de Pindamonhangaba. A temperatura do tratamento foi definida utilizando a fórmula de Andrews a partir da composição química das amostras. Foi estipulada uma variação de 50ºC acima da temperatura de austenitização do material, para garantir que toda a microestrutura do material se transforme em austenita, para, posteriormente, prosseguir com resfriamento a óleo e formar a fase martensita. A fórmula de Andrews é apresentada na equação 1. Introduzindo o percentual dos elementos presentes na equação, encontrou-se a temperatura de austenitização para cada tipo de aço estudado. Antes da têmpera os aços permaneceram na temperatura estipulada por 30 minutos e depois foram resfriadas em óleo.

O processo de revenimento foi realizado na temperatura de 450ºC, por 2 horas, para aliviar as tensões internas na estrutura do material devido a transformação de fase em martensita. Esta temperatura foi escolhida baseada no trabalho de Cardoso (2014).

|  |  |
| --- | --- |
| Ae3= 910 - 203√C + 44,7Si – 15,2Ni + 31,5Mo + 104V + 13,1W – 30Mn + 11Cr + 20Cu – 700P – 400Al – 120As – 400Ti | Eq. 1 |

As amostras do aço 43XX foram submetidas aos tratamentos térmicos de têmpera e de revenimento juntas em um forno mufla, da marca Grion, como apresentada na figura 17, para que as taxas de variação de processo se mantivessem as mesmas para todas as amostras, principalmente a taxa de resfriamento.

|  |
| --- |
| Figura 17 – Amostras aço 43XX posicionadas para tratamento térmico. |
| **C:\Users\duda_\Downloads\IMG_20160606_143020746.jpg** |
| Fonte: Autor |

## 3.3 Caracterização microestrutural

Foi feita análise microestrutural nas amostras como fornecidas e nas amostras tratadas termicamente pelo processo de têmpera e de revenimento.

Foi feito o embutimento a frio das peças com resina polimerizante na relação 30 ml para 10 gotas do catalizador (para auxiliar no endurecimento da resina) da marca Arotec, apresentados na figura 18a, com posicionamento das amostras apresentado na figura 18b, posteriormente foi realizado o lixamento com lixadeira automatizada AROTEC com lixas d’água de 180 a 400 mesh e com lixadeira manual AROTEC com lixas de 800 a 2000 mesh, seguida pelo polimento na politriz automática AROTEC com sílica de 0,05 μm.

O ataque químico foi realizado com ácido nítrico (nital) diluído em álcool etílico, com concentração de 2%, durante 20 segundos para revelar a fase ferrita clara e as demais escuras, enquanto o ataque com metabissulfito de sódio foi realizado para distinguir a austenita retida das demais fases. As imagens, para revelar das fases presentes, foram obtidas em um microscópio óptico da marca Olympus, pertencente ao laboratório de metalográfia da FATEC de Pindamonhangaba.

|  |  |
| --- | --- |
| Figura 18a – Resina Arotec | |
| C:\Users\duda_\Downloads\IMG_20160606_160604040.jpg | C:\Users\duda_\Downloads\IMG_20160606_160552556.jpg |
| Fonte: Autor | |

|  |  |
| --- | --- |
| Figura 18b – Amostras embutindo | |
| C:\Users\duda_\Downloads\IMG_20160606_155433683.jpg | C:\Users\duda_\Downloads\IMG_20160606_160528808.jpg |
| Fonte: Autor | |

## 3.4 Fração volumétrica da Austenita Retida

Foi feita análise das imagens obtidas pelo processo de caracterização microestrutural das amostras temperadas e revenidas através do software Image J, para determinar a fração volumétrica da fase austenita retida, a qual foi destacada nas amostras após ataque químico, sendo possível selecionar uma área da imagem separando-a por níveis de cinza, como apresentado na figura 19a, e o treshold selecionando a área com mesmo nível de cinza a ser calculada a fração volumétrica são apresentados na imagem 19b.

|  |
| --- |
| Figura 19a – Software Image J selecionando tonalidade clara da imagem |
| D:\Epiphot 200 (50x)\amostra 5\fases\img.png |
| Fonte: Autor |

|  |
| --- |
| Figura 19b – Software Image J determinando área a ser analisada |
| D:\Epiphot 200 (50x)\amostra 5\fases\img1.png |
| Fonte: Autor |

## 3.5 Análise de dureza do material

As medidas de dureza obtidas nas amostras como recebidas utilizou-se a escala de dureza HRA, com valores convertidos para HRC, e nas amostras tratadas termicamente pelo processo de têmpera, e temperadas e revenidas a escala HRC, para comprovar a influência do tratamento térmico nas propriedades mecânicas do material. Os equipamentos utilizados são pertencentes ao laboratório de fundição e o laboratório de ensaios mecânicos da FATEC de Pindamonhangaba. Foram realizadas pelo menos sete medidas para cada amostra analisada.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 4.1 Determinação da temperatura

O cálculo para determinar a temperatura foi realizado através da fórmula de Andrews em função da composição química do material, cujos resultados são apresentados na tabela 2, obtendo uma redução na temperatura de austenitização do material conforme aumenta o seu teor de carbono. Adotou-se então, uma temperatura de 850 ºC, cerca de 60 ºC acima da temperatura mais alta e tempo de 20 minutos, para garantir austenitização total de todas as amostras. O processo de revenimento foi realizado a temperatura de 450 ºC com duração de 2 horas, seguido por um resfriamento lento (dentro do forno).

Tabela 2 – Temperatura de austenitização aço 43XX

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Aço** | **º F** | **º C** |
| **4320** | 1446,78 | 785,99 |
| **4330** | 1414,48 | 768,04 |
| **4340** | 1382,18 | 750,1 |
| **4350** | 1349,88 | 732,16 |
| **4370** | 1285,28 | 696,27 |

## 4.2 – Caracterização microestrutural

As imagens feitas através do microscópio óptico Olympus com ampliação de 500x e 1000x apresentaram uma redução na quantidade de perlita e aumento da fase martensita de acordo com o crescimento do teor de carbono das amostras. Na figura 20 são observadas as microestruturas das amostras temperadas atacadas quimicamente com nital 2%. Observa-se na figura 20a o aço 4320, tendo perlita e/ou martensita (coloração escura) e ferrita e austenita retida (coloração branca). Na figura 20b, o aço 4330 é composto pelas fases perlita (cinza), martensita (escura) e ferrita e austenita retida (branca). Na figura 20c, nota-se o aço 4340 com austenita retida na coloração clara e ripas de martensita e/ou bainita escuras. Na figura 20d, pode-se verificar no aço 4350 um aumento no tamanho das ripas de martensita e/ou bainita. Na figura 20e, verifica-se no aço 4370 um crescimento da fase martensita (ripas). Conforme estudado, o ataque nital propicia a separação da fase ferrita das demais, porém na coloração escura não é possível distinguir a diferentes fases, martensita, perlita, bainita e austenita retida.

De acordo com a curva TTT do aço 4340 é possível verificar que após a têmpera, com resfriamento rápido não se forma a fase ferrita, tendo a área mais clara da imagem ser considerada austenita retida, assim como nas imagens subsequentes, que com o aumento do teor de carbono a probabilidade de formar ferrita após o tratamento térmico de tempera é cada vez menor, aumentando as ripas de martensita, formando também em aço de maior teor de carbono ripas de martensita mais duras.

Figura 20 - Amostras do aço 43XX temperadas atacadas com nital 2%

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Fig 20a- aço 4320  500x e 1000x  Ferrita (branca)  Perlita e/ou Martensita (escura) |  |  |
| Fig 20b – aço 4330  500x e 1000x  Ferrita (branca)  Perlita (cinza)  Martensita (escura) |  |  |
| Fig 20c – aço 4340  500x e 1000x  Bainita + AR (branca)  Martensita (ripas) |  |  |
| Fig 20d – aço 4350  500x e 1000x  Martensita + AR  Bainita (ripas) |  |  |
| Fig 20e- aço 4370  500x e 1000x  Austenita Retida  Bainita e Martensita (ripas) |  |  |

Na figura 21 são apresentas as amostras tratadas termicamente pelo processo de têmpera e posteriormente o revenimento atacadas com nital 2%. Na figura 21a, observa-se o aço 4320, tendo perlita e/ou martensita (coloração escura) e ferrita e austenita retida (coloração clara). Na figura 21b, o aço 4330 é composto pelas fases perlita e/ou martensita (escura) e ferrita e austenita retida (clara). Na figura 21c, nota-se o aço 4340 com austenita retida na coloração clara e pequenas ripas de martensita e bainita na coloração escura. Na figura 21d, pode-se verificar no aço 4350 um aumento da fase bainita e martensita, com aumento de suas ripas, tendo também o aumento da austenita retida na coloração mais clara. Na figura 21e, verifica-se no aço 4370 a austenita retida (branca) e um crescimento da fase martensita e bainita (escura), tendo também um crescimento de suas ripas. As quais que se comparado com a figura 20, observa-se uma redução no tamanho das ripas de martensita formadas nas amostras de maior teor de carbono (4350 e 4370), devido ao revenimento, o qual faz com que a martensita alivie suas tensões internas liberando alguns átomos de carbono do interstício da sua estrutura cristalográfica.

Figura 21 – Amostras do aço 43XX temperadas e revenidas atacadas com nital 2%

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Fig 21a- aço 4320  **e**  **d**  500x e 1000x  Ferrita (branca)  Perlita e/ou Martensita (escura) | E:\RB\Amostra 2\TT1-500x-metab.bmp  **a** | E:\RB\Amostra 2\TT4-1000x-nital2.bmp |
| Fig 21b- aço 4330  500x e 1000x  Ferrita (branca)  Perlita e/ou Martensita (escura) | E:\RB\amostra 3\TT1-500x-nital2%.jpg  **b** | E:\RB\amostra 3\TT3-1000x-nital2%.jpg |
| Fig 21c- aço 4340  500x e 1000x  Austenita Retida  Martensita e Bainita(ripas) | E:\RB\amostra 4\TT3-500x-nital2.jpg  **c** | E:\RB\amostra 4\TT5-1000x-nital2.jpg |
| Fig 21d- aço 4350  500x e 1000x  Austenita Retida  Bainita e Martensita (ripas) | E:\RB\amostra 5\TT4-500x-nital2.jpg | E:\RB\amostra 5\TT2-1000x-nital2.jpg |
| Fig 21e- aço 4370  500x e 1000x  Austenita Retida  Bainita e Martensita (ripas) | E:\RB\amostra 7\TT5-500x-nital2.jpg | E:\RB\amostra 7\TT3-1000x-nital2.jpg |

|  |
| --- |
|  |

## 4.3 Fração volumétrica de Austenita Retida

A análise para determinar a fração volumétrica da fase austenita retida de cada amostra tratada termicamente por têmpera e revenimento foi feita através do software image J, a partir de imagens obtidas das amostras após o ataque com metabissulfito de sódio, que segundo Girault (1998) revela a austenita retida na coloração esbranquiçada. Sendo avaliadas cerca de 20 imagens de cada amostra.

Para revelar a fase desejada, foi realizado um pré ataque com nital 2%, o qual foi necessário para iniciar a oxidação das fases mais reativas do material, podendo ser elas: a perlita, a martensita e a bainita, deixando-as em coloração escura. Posteriormente foi realizado o ataque químico com metabissulfito de sódio, o qual oxida a fase ferritica quando presente na amostra, escurecendo - a, deixando apenas a fase austenita retida na coloração clara, como apresentada na figura 22. A figura 22a representa a amostra do aço 4320, a figura 22b a amostra do aço 4330, a figura 22c a amostra do aço 4340, a figura 22d a amostra do aço 4350 e a figura 22e a amostra do aço 4370, sendo que em ambas as 5 figuras é apresentado a austenita retida na coloração clara e as outras fases presentes em cada amostra na coloração escura.

A fração volumétrica determinada para cada amostra apresentou um crescimento considerável conforme o aumento do teor de carbono entre as amostras, como apresentado na figura 23, juntamente com o desvio padrão, isso devido à formação da fase martensita ser maior, e haver redução da formação de outras fases de acordo com o aumento do teor de carbono no material. As amostras do aço 4320 apresentaram uma média de 2,533% de austenita retida na composição de suas fases. As amostras do aço 4330 avaliadas apresentaram uma média de 2,882% de austenita retida na composição de suas fases. As amostras do aço 4340 apresentaram uma média de 4,458% de austenita retida na composição de suas fases. As amostras do aço 4350 apresentaram uma média de 5,583% de austenita retida na composição de suas fases. Enquanto as amostras do aço 4370 apresentaram uma média de 7,054% de austenita retida na composição de suas fases.

Figura 22 – Amostras temperadas e revenidas atacadas com metabissulfito de sódio com ampliação de 100x

|  |  |
| --- | --- |
| 22a – Aço 4320   Austenita Retida | D:\Epiphot 200 (50x)\amostra 2\fases\TT.am2 (14).tif |
| 22b – Aço 4330 Austenita Retida | D:\Epiphot 200 (50x)\amostra 3\fases\TT - am 3 (7).tif |
| 22c – Aço 4340 Austenita Retida | D:\Epiphot 200 (50x)\amostra 4\fases\TT am4 (12).tif |
| 22d – Aço 4350 Austenita Retida | D:\Epiphot 200 (50x)\amostra 5\fases\amostra 5 TT (6).tif |
| 22e – Aço 4370 Austenita Retida | D:\Epiphot 200 (50x)\amostra 7\fases\TT am 7 (4).tif |

|  |
| --- |
| Figura 23 - % Austenita Retida |
|  |

## 4.4 Análise de dureza

O ensaio de dureza foi realizada a partir de 7 medidas em cada amostra, sendo calculada um valor médio, o qual indica claramente um aumento de dureza do material conforme aumenta o teor de carbono, tanto no material sem tratamento térmico como no material tratado termicamente, também pode ser observado uma elevação considerável na dureza do material quando temperado, e uma redução pouco significativa se comparar o material apenas temperado com o material temperado e revenido como apresentado no gráfico da Figura 24, junto ao desvio padrão de cada analise, porém o material temperado e revenido apresenta uma dureza significativamente alta quando comparado com material sem tratamento térmico. Portanto, verifica-se a efetividade da aplicação da fórmula de Andrews e o tempo determinado pelo Chiaverini (2005). Fica também evidente que o teor de carbono tem uma influência marcante no aumento da dureza do aço após o tratamento térmico devido às transformações de fases que ocorreram em cada amostra. O aumento da fase martensita caracteriza a elevada dureza conforme o aumento do teor de carbono, enquanto a austenita retida aumenta a tenacidade do material, amenizando a fragilidade dada pela fase martensitica.

Conforme o aumento do teor de carbono, com a realização do tratamento térmico na estrutura do material é formado martensita mais dura se compara com material de menor teor de carbono. Devido a isso a variação de dureza do material temperado para o material temperado e revenido cresce, isso devido à martensita ser mais dura e liberar mais átomos de carbono dos interstícios e pelo auxilio do crescimento de austenita retida conforme o teor de carbono.

|  |
| --- |
| Figura 24 – Dureza Rockwell C das amostras de aço 43XX |

## 5 CONCLUSÃO

Conforme o aumento do teor de carbono nas amostras foi observado o crescimento da porcentagem de austenita retida.

A utilização da fórmula de Andrews foi eficaz para garantir a austenitização de todas as amostras, o que foi determinante para transformação de fases após o processo térmico de têmpera, o qual resultou na formação de martensita na estrutura de todas as amostras, uma fase de extrema dureza, com maior taxa de transformação conforme o aumento do teor de carbono das amostras. Assim como o teor de austenita retida também teve um aumento gradativo proporcional ao teor de carbono, isso devido ao aumento da transformação na fase martensita e redução nas demais fases.

Como comprovação da transformação das fases presentes nas amostras foi realizada análise de dureza antes do tratamento térmico, nas amostras temperadas e nas amostras temperadas e revenidas. Resultando em uma dureza crescente de acordo com o aumento do teor de carbono, tendo as amostras temperadas apresentando dureza elevada, seguida pelas amostras temperadas e revenidas, com dureza um pouco abaixo, porem com ambas apresentando durezas extremamente mais elevadas que o material sem tratamento térmico. A variação da dureza entre o material temperado e o material temperado e revenido conforme o aumento do teor de carbono ocorreu devido à formação de uma martensita mais dura em material com maior teor de carbono, e teve auxilio do crescimento da fase austenita retida, a qual possivelmente aumentou a tenacidade do material, reduzindo a fragilidade.

## REFERÊNCIAS

ABDALLA, A. J.; HASHIMOTO, T. M.; PEREIRA, M. S.; ANAZAWA, R. M.; **Formação da Fase Bainítica em aços de Baixo Carbono.** Artigo técnico. Revista Brasileira de Aplicação de Vácuo, v.25, n.3, p. 175 – 181, 2006.

AÇOVISA. **Aços especiais para construção mecânica**. Catálogo. Guarulhos. [2013](tel:2013).

ANAZAWA. R.M. *et al*. **Determinação da austenita retida em um aço multifásico por microscopia óptica e difração de raios x**. Artigo técnico. Revista brasileira de aplicação do vácuo. 2010. P 61 – 65.

ANDREWS, K. W. **Empirical Formulae for the Calculation of Some Transformation Têmperatures.** Journal of The Iron and Steel Institute, p. 721-727, July. 1965.

ASM. **Metalografia e microestrutura**. 9 vol. ASM HANDBOOK. Ohio, [1992](tel:1992).

ASM. **Heat Treating**. 4 vol. ASM HANDBOOK. , [1991](tel:1991).

ASSIS. C. *et al*. **Ataque Químico para Revelação da Microestrutura de Aços Ferríticos**. Resumo. São Carlos. USP, [s.d.]  
  
  
AZEVEDO, A. D. MOTHÉ, C. G. **Analise térmica de materiais**. 1**ª** ed. São Paulo: iEditora, [2002](tel:2002).

BHADESHIA, H. K. D. H. **Bainite in Steels**. 2º ed. London: IOM Communications Ltd. 2001.

CALLISTER, W. D. J. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LCT, [2006](tel:2006).

CARDOSO, A. S. M. **Estudo do Processo de Soldagem a Laser em aços Aeronáuticos, da Utilização de Tratamentos Térmicos de Superfícies a Plasma e das Correlações com a Vida em Fadiga**. Tese de doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, 2014.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4º ed. Brasil: Edgard Blucher, [2008](tel:2008).

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7ª Ed. São Paulo: Associação brasileira de metalurgia e materiais, 2005.

ERİŞİR. E. *et al*. **Microstructural characterization of medium carbon dual phase steels after intermediate quenching**. Artigo técnico. Metal2013. Brno, 2013.

GGD**. Aço construção mecânica.** Catalogo. GGD Metals. São Paulo. [s.d.]. Disponível em: [http://www.ggdmetals.com.br/cat/4320.pdf. Acesso em 05/2016](http://www.ggdmetals.com.br/cat/4320.pdf.%20Acesso%20em%2005/2016).

GIRAULT, E. *et al*. **Metallographic Methods for Revealing the Multiphase Microstructure of TRIP-Assisted Steels.** Materials Characterization. N.40, p.111-118. 1998.

GOBBI, S. J. **Influência do tratamento criogênico na resistência ao desgaste do aço para trabalho a frio AISI D2.** Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília. Brasília. 2009.

LEANDRO, C. A. S. Constante de equilíbrio. In:\_\_\_\_\_\_**Termodinâmica aplicada à metalurgia**. São Paulo: Erica, 2013.

LIMA, E. S. *et al*. **Caracterização microestrutural dos aços 43xx revelado pelo ataque químico nital 2%**. Artigo técnico. XXI ENIC Unitau.Taubaté, 2016.

LIMA, E. S. *et al*. **Determinação da temperatura de austenitização para têmperar os aços 43xx**. Artigo técnico. XXI ENIC Unitau.Taubaté, 2016.

MARTINS, M. **Temperabilidade jominy e influência do revenido sobre a dureza - um estudo em aços estruturais nacionais**. Dissertação mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. [2002](tel:2002).

METALURGICA. **O que é aço carbono?**. Informativo. Portal metalúrgica construção civil, [s.d.]. Disponível em: <http://wwwo.metalica.com.br/o-que-e-aco-carbono>. Acesso em 04/2016.

NOGUEIRA, R. C. *et al*. **Análise microestrutural de um aço AISI 4350 submetido a tratamentos térmicos para a formação de bainita.** Artigo técnico. Revista Brasileira de aplicação de vácuo. Campinas, 2015. P 44 - 48.

OLIVEIRA, A. R. *et al*. **Influência da temperatura no revenimento do aço sae**[**4340**](tel:4340)**.** Artigo técnico. UniVap. São José dos Campos. [2011](tel:2011).

PEREIRA, M. S. **Caracterização Microestrutural e Mecânica de um Aço Multifásico, em Consonância com o Projeto ULSAB - AVC**. 2004. 98f. Tese (Livre Docência em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2004.

RADAJ, Dieter. **Heat effects of welding**. 1º ed. New York: Springer – Verlag, [1992](tel:1992).

RIOS, P. R. PADILHA, A. F. **Transformação de fase**. 1ª ed. São Paulo: Artliber editora Ltda, [2007](tel:2007).

SAKUMA, Y. *et al*. **Influence of C content and annealing têmperatureon microstructure and mechanical properties of 400º transformed steel contaoning retained austenite**. Artigo técnico. ISIJ International. Vol 31. Japão, 1991.

SANTOS, E. L. *et al*. Caracterização microestrutural do aço 43xx temperado e revenido com ataque quimico nital 2%. Artigo técnico. IX Simpósio de tecnologia da Fatec de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba, 2016.

SHACKELFORD, James F. **Ciência dos materiais**. 6ª ed. São Paulo: Person, 2010.

SILVA, A. L. V.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

SOUZA, G. A. **Caracterização microestrutural de um aço médio carbono e baixa liga (com estrutura bainítica / martensítica) via microscopia óptica**. Dissertação Mestrado. UNESP. Guaratinguetá. [2008](tel:2008).

VOORT, Vander. **Color metallography**. Lake Bluff : Buehler Ltd, 2004.

VOORT, Vander. **Microstructure of carbon – and low – alloy steels**. Lake Bluff : Buehler Ltd. [s.d.]

VAN VLACK, L. H. **Principio de ciência e tecnologia dos materiais**. 4ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier editora Ltda, [2003](tel:2003).

VAN VLACK, L. H. Ligas Ferro – Carbono. In:\_\_\_\_\_\_ **Principio de ciência e tecnologia dos materiais**. 4ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier editora Ltda, [2003](tel:2003). P. 243.

## GLOSSÁRIO

**Aço baixa liga:** Aços que possuem baixo teor de carbono, um total de até 10% de elementos de ligas.

**Alivio de tensões:** Consiste em um tratamento térmico para remover tensões residuais.

**Austenita:** Ferro ou liga de ferro que possui uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC).

**Austenita retida:** Fase austenita do material em temperatura fora da zona de austenitização, onde é metaestável.

**Austenitização:** Formação de austenita na estrutura de uma liga ferrosa através do aquecimento acima da sua temperatura critica superior (A1), até o interior da região de fase austenita no diagrama de fases Ferro – Carbono, a zona de austenitização.

**Bainita:** Resultado de uma transformação austenítica em ligas ferríticas. Formada em temperatura entre a formação de perlita e a de martensita. A microestrutura consiste em uma matriz de ferrita com precipitado de cementita.

**Célula unitária:** Unidade estrutural básica de uma estrutura cristalina. Ela é definida em termos de posição atômica.

**Cementita:** Carbeto de ferro (Fe3C).

**Composição:** Teor de um elemento especifico em uma liga.

**Concentração de tensão:** Concentração ou amplificação de tensão em uma trinca ou em um defeito na microestrutura do material.

**Cristal:** Estado de um material sólido caracterizado pela existência de uma matriz tridimensional repetida de átomos./

**Cúbico de corpo centrado (CCC):** Estrutura cristalina onde dentro da célula unitária cúbica, os átomos estão localizados nos vértices e no centro da célula.

**Cúbico de face centrado (CFC):** Estrutura cristalina onde dentro da célula unitária cúbica, os átomos estão localizados nos vértices e no centro das faces.

**Diagrama de fases:** Representação gráfica das relações entre as restrições do ambiente ( zonas do material), a temperatura, a composição e as regiões de estabilidade das fases, em condição de equilíbrio.

**Diagrama de transformação de fases ou Diagrama tempo-temperatura-transformação (TTT):** Gráfico da temperatura em função do logaritmo do tempo para uma liga de aço com uma composição definida. È usado para determinar o inicio e o fim de uma transformação durante um tratamento térmico de uma liga previamente austenetizada.

**Difusão:** Transporte de massa devido ao movimento dos átomos.

**Ductilidade:** Capacidade de um material suportar deformação plástica sem se romper.

**Dureza:** Medida de resistência de um material a uma deformação em sua superfície por identação.

**Equilíbrio (fase):** Estado em que as características das fases permanecem constantes ao longo de períodos de tempo até atingir estabilidade.

**Estrutura:** Arranjo de componentes internos da matéria: estrutura cristalina ( em nível atômico), microestrutura ( em nível microscópico),

**Estrutura cristalina:** Forma em que os átomos estão arranjados espacialmente. É definida segundo a geometria da célula unitária e da posição de seus átomos.

**Fase:** Porção homogênea de um sistema que possui características físicas e químicas uniformes.

**Ferrita:** Ferro com estrutura cúbica de corpo centrado (CCC).

**Fratura dúctil:** Modo de fratura acompanhado deformação plástica.

**Fratura frágil:** Modo de fratura com rápida propagação de trinca, sem deformação plástica.

**Grão:** Cristal individual em um metal.

**Liga:** Substancia metálica composta por dois ou mais elementos.

**Liga hiper eutetóide:** Liga a qual a concentração de soluto é maior do que a composição eutetóide.

**Liga hipo eutetóide:** Liga a qual a concentração de soluto é menor do que a composição eutetóide.

**Limite de solubilidade:** Concentração máxima de soluto que pode ser adicionada sem que haja a transformação em uma nova fase.

**Martensita:** Fase metaestável composta por ferro e supersaturada de carbono, e é produto da transformação sem difusão da austenita.

**Metaestável:** Estado fora do equilíbrio.

**Microestrutura:** Características estruturais de uma liga.

**Microscopia:** Avaliação de elementos microestruturais com emprego de um microscópio.

**Nucleação:** Estagio inicial em uma transformação de fases.

**Oxidação:** Remoção de um ou mais eletros de um átomo, íon ou molécula.

**Perlita:** Microestrutura bifásica encontrada em alguns aços, resultado da transformação da austenita em camadas intercaladas de ferrita e cementita.

**Propriedades:** Características de um material expressa em termo da resposta a um dado estimulo.

**Saturado:** Termo que expressa que os átomos de carbono tem ligação simples com os demais átomos.

**Sistema cristalino:** Esquema em que as estruturas cristalinas são classificadas de acordo com a geometria da célula unitária.

**Taxa de transformação:** Inverso tempo necessário para que uma reação prossiga até a metade da sua execução total.

**Tenacidade:** Medida da quantidade de energia absorvida por um material à medida que este sofre fratura.