



UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ALAN CUNHA DOS ANJOS

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DO AÇO ASTM A36 APÓS
TRATAMENTO TERMOQUÍMICO E TÉRMICO

MARABÁ/PA

2018

ALAN CUNHA DOS ANJOS

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DO AÇO ASTM A35 APÓS
TRATAMENTO TERMOQUÍMICO E TÉRMICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Me. José Charles Moraes De Oliveira.

Coorientador: Prof. Me. Márcio Paulo de Araújo Mafra.

MARABÁ/PA

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca II da UNIFESSPA. CAMAR, Marabá, PA

Anjos, Alan Cunha dos

Avaliação da resistência a tração do aço ASTM A35 após tratamento termoquímico e térmico / Alan Cunha dos Anjos; orientador, José Charles Moraes de Oliveira, coorientador, Márcio Paulo de Araújo Mafra. — 2018.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Materiais, Curso de Engenharia de Materiais, Marabá, 2018.

1. Aço - Testes. 2. Resistência de materiais. 3. Aço - Tratamento térmico. 4. Engenharia de materiais. I. Oliveira, José Charles Moraes de, orient. II. Mafra Márcio Paulo de Araújo, coorient. III. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. IV. Título.

CDD: 22. ed.: 669.1

Elaborado por Nádya Lopes Serrão
Bibliotecária-Documentalista CRB2/575

ALAN CUNHA DOS ANJOS

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DO AÇO ASTM A36 APÓS
TRATAMENTO TERMOQUÍMICO E TÉRMICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia de Materiais como
requisito para obtenção do título de bacharel em
Engenharia de Materiais.

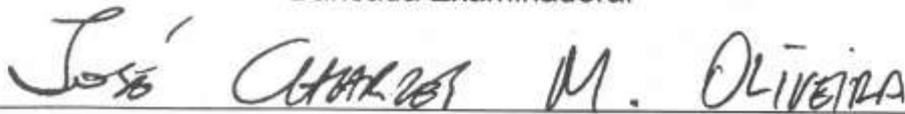
Orientador: Prof. Me. José Charles Moraes De
Oliveira.

Coorientador: Prof. Me. Márcio Paulo de Araújo
Mafra.

Data de aprovação: 21 / 12 / 2018

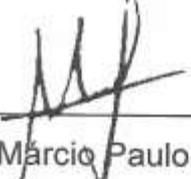
Conceito: EXCELENTE.

Bancada Examinadora:



Prof. Me. José Charles Moraes De Oliveira

UNIFESSPA / FEMAT / Orientador


Prof. Me. Márcio Paulo de Araújo Mafra

UNIFESSPA / FEMAT / Coorientador



Prof. Dr. Elias Fagury Neto

UNIFESSPA / FEMAT / Membro

AGRADECIMENTOS

A DEUS, do qual todas as coisas dependem.

Aos meus pais, por terem me concebido ao mundo e assim oportunizando-me este momento.

A toda a minha família por ter me suportado durante esses cinco anos de graduação

A Faculdade de Engenharia de Materiais da UNIFESSPA pelo curso de Graduação.

Aos colaboradores do laboratório de preparação de amostra.

A minha amiga Noele que me ajudou com estudos.

A todos os Professores que contribuíram para minha formação profissional.

E a todos que contribuíram direta e indiretamente pela minha formação.

RESUMO

O ferro é um metal cuja utilização pelo homem é muito antiga. As civilizações antigas de Assíria, Babilônia, Egito, Pérsia, China, Índia e, mais tarde, da Grécia e de Roma já fabricavam, por processos primitivos, armas e inúmeros utensílios de ferro e aço. E depois descobriu que a quantidade de carbono tinha uma grande influência nas propriedades do aço, principalmente quando se trata de dureza superficial. Neste sentido, esse trabalho propôs a avaliação da propriedade de dureza e tração do aço A36 submetido ao tratamento termoquímico de cementação e após tratamento térmico de têmpera e revenido em 5 condições diferentes. Os corpos de prova foram usinados para terem a forma adequada para o ensaio de tração, e cortados para poder realizar a dureza. Com os resultados dos ensaios, montaram-se os gráficos e tabelas para comparação entre as 5 condições. Com o ensaio de tração e dureza a condição 3 obteve o melhor resultado da relação dureza e tenacidade, tendo a condição 2 um comportamento semelhante.

Palavras chave: aço, A36, tração, dureza.

ABSTRACT

Iron is a metal whose use by man is very old. The ancient civilizations of Assyria, Babylonia, Egypt, Persia, China, India, and later Greece and Rome were already manufacturing, by primitive processes, weapons and innumerable tools of iron and steel. Then found that the amount of carbon had a great influence on the properties in the properties of steel, especially when it comes to surface hardness. In this sense, this work proposed the evaluation of the hardness and tensile properties of the A36 steel subjected to the thermochemical treatment of cementation and after heat treatment of tempering and tempering in 5 different conditions. The specimens were machined to have the shape suitable for the tensile test, and cut to be able to make the hardness. With the results of the tests, the graphs and tables were set up to compare the 5 conditions. With the traction and hardness test, condition 3 obtained the best result of the hardness and toughness relationship, with condition 2 having a similar behavior.

Keywords: steel. A36. Traction. Hardness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de equilíbrio ferro-carbono.....	17
Figura 2: Representação esquemática da microestrutura de uma liga ferro carbono hipoeutetóide.....	19
Figura 3: Influência do teor de carbono sobre as propriedades dos aços-carbono esfriados lentamente.	21
Figura 4: Curva de início e fim da transformação da austenita em um aço.....	24
Figura 5 – Diagrama esquemático representativo das operações de têmpera e revenido.....	27
Figura 6: Desenho esquemático de um corpo de prova submetido à carga de tração.	31
Figura 7: Curva tensão – deformação convencional.	32
Figura 8: Representação esquemática de um microscópio óptico.	34
Figura 9: Fluxograma da prática experimental.	35
Figura 10: Caixa de cementação com os corpos de prova.	38
Figura 11: Caixa de cementação preenchida.....	38
Figura 12: Corpos de prova pós têmpera.....	39
Figura 13: Máquina de tração.....	40
Figura 14: Máquina de tração (marca EMIC).	40
Figura 15: Micrografia da condição 1 do aço A36 sem tratamento.	43
Figura 16: Micrografia da condição 2 do Aço A36.....	44
Figura 17: Micrografia do Aço A36, (a) condição 3, (b) condição 4, (c) condição 5. .	45
Figura 18: Resultado do ensaio de tração da condição 1.	48
Figura 19: Resultado do ensaio de tração da condição 2.	49
Figura 20: Resultado do ensaio de tração da condição 3.	49
Figura 21: Resultado do ensaio de tração da condição 4.	50
Figura 22: Resultado do ensaio de tração da condição 5.	50
Figura 23: Resultado do ensaio de tração de todas as condições.	51
Figura 24: Visão longitudinal do corpo de prova de cada condição.	52
Figura 25: Macrografia ótica do Aço A36 na condição 1.....	53
Figura 26: Macrografia ótica do Aço A36 na condição 2.....	53
Figura 27: Macrografia ótica do Aço A36 na condição 3.....	54
Figura 28: Macrografia ótica do Aço A36 na condição 4.....	54
Figura 29: Macrografia ótica do Aço A36 na condição 5.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela1: composição química do aço ASTM A36.....	35
Tabela 2: Distribuição dos tratamentos	37
Tabela 3: Proporção dos elementos usados na cementação.....	37
Tabela 3: Distribuição das amostras para ensaio de tração, dureza.....	41
Tabela 4: Composição química após tratamento termoquímico de cementação.	42
Tabela 5: Dureza média e desvio padrão geral das condições de tratamentos	46
Tabela 6: Média dos resultados das condições.....	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Análises químicas do aço A36 sem e após tratamento de têmpera e revenido.....	43
Gráfico 2: Comparativo geral entre as condições de tratamentos.....	47

Sumário

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivos geral	14
1.1.2 Objetivos específicos.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 AÇOS	15
2.1.1 Definição	15
2.1.2 Aço ASTM A36.....	16
2.1.3 Estrutura cristalina do aço	16
2.1.4 Diagrama de equilíbrio ferro carbono	17
2.1.4.1 Ligas hipoeutetóide	18
2.1.5 Propriedades dos Constituintes dos Aços e sua Influência Sobre as Características Mecânica	20
2.1.6 Efeitos das impurezas	22
2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS.....	22
2.2.1 Ductilidade.....	24
2.2.2 Tenacidade.....	24
2.3 TRATAMENTO TERMOQUÍMICO	25
2.3.1 Cementação	25
2.4 TRATAMENTO TÉRMICO	26
2.4.1 Têmpera	26
2.4.1.1 Meios e severidade de têmpera	28
2.4.2 Revenido	28
2.5 ENSAIOS DOS MATERIAIS	29
2.5.1 Ensaio de dureza	30
2.5.2 Ensaio de tração	31
2.5.2.1 Tipos de fratura	33

2.6 ANÁLISE METALOGRÁFICA.....	33
2.6.1 Análise microscópica.....	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1 MATERIAIS	34
3.2 MÉTODOS	35
3.3 ANÁLISE QUÍMICA	36
3.4 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	36
3.5 TRATAMENTO TERMOQUÍMICO E TÉRMICO	36
3.5.1 Cementação	37
3.5.2 Têmpera	38
3.5.3 Revenido	39
3.6 ENSAIO DE DUREZA	39
3.7 ENSAIO DE TRAÇÃO	40
1.1. ENSAIO METALOGRAFICO	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1 ANÁLISE QUÍMICA	42
4.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL	43
4.3 ENSAIO DE DUREZA	46
4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO	48
4.4.1 Análise de fratura	52
5 CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

O aço é a liga metálica mais utilizada pelo homem, pois sua grande versatilidade e seu baixo custo possibilitam a sua utilização em uma ampla gama de aplicações, desde minúsculas peças até grandes estruturas[1].

O tratamento termoquímico visa o endurecimento superficial dos aços, pela modificação parcial da sua composição química, nas seções que se deseja endurecer[2].

A modificação parcial da composição química, seguida geralmente de tratamento térmico apropriado produz também uma modificação da microestrutura do material, resultando, em resumo, numa modificação igualmente parcial das propriedades mecânicas.

Os processos de endurecimento superficial são os seguintes:

- Cementação;
- Nitretação;
- Cianetação;
- Carbonitretação;
- Boretção.

A cementação é o processo clássico de endurecimento superficial. Consiste no enriquecimento superficial de carbono em certos aços, aquecidos convenientemente em contato com substâncias carbonáceas [2].

O controle da temperatura e do tempo em diferentes tratamentos térmicos pode influenciar na sua microestrutura. Os fatores inicialmente considerados para realização de um tratamento térmico são: aquecimento, tempo de permanência a temperatura e resfriamento. Além desses, outro de grande importância é a atmosfera do recinto de aquecimento, visto que a sua qualidade tem grande influência sobre os resultados finais dos tratamentos térmicos [2].

Portanto, objetivo é verificar as propriedades de dureza e tração de um aço após o processo de cementação e tratamento térmico, com a formação da martensita.

A martensita é uma fase metaestável que aparece com o resfriamento brusco da austenita. O nome “transformação martensítica” é aplicado às reações no estado sólido que ocorrem por cisalhamento sem mudança de composição química[13].

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos geral

O objetivo geral desse trabalho foi a análise da resistência a tração de um aço ASTM A36 submetido ao tratamento termoquímico de cementação e pós tratamento de têmpera e revenido.

1.1.2 Objetivos específicos

Comparar as características do aço A36 com a literatura.

Analisar metalograficamente através de imagens feitas no microscópio óptico as amostras tratadas e não tratadas termoquimicamente.

Avaliar a resistência mecânica do aço ASTM A36 pelos ensaios de resistência tração e dureza Brinell das amostras tratadas e não tratadas termoquimicamente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇOS

2.1.1 Definição

O aço é uma liga metálica de natureza relativamente complexa e sua definição não é simples, visto que, a rigor os aços comerciais não são ligas binárias; de fato, apesar de seus principais elementos de liga serem o ferro e o carbono, eles contêm sempre outros elementos secundários, presentes devido aos processos de fabricação [2].

Aço é uma liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até, aproximadamente, 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação[2].

O limite inferior (0,008%) corresponde à máxima solubilidade de carbono no ferro à temperatura ambiente e o limite superior (2,11%) corresponde à máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro e ocorre a 1148 °C [2].

Essa quantidade máxima depende, por outro lado, da presença ou não de elementos de liga ou da presença dos elementos residuais em teores superiores aos normais[2].

Os aços-carbono podem ser subdivididos conforme o teor de carbono presente na estrutura:

- Aços de baixo teor de carbono (quantidade de carbono inferior a 0,25%);
- Aços de médio teor de carbono (quantidade de carbono entre 0,25% e 0,6%);
- Aços de alto teor de carbono (quantidade de carbono superior a 0,6%).

Todas as propriedades físicas e mecânicas do aço são obtidas através de tratamentos térmicos ou trabalhos mecânicos pela modificação da sua microestrutura, variando conforme o teor dos componentes [4].

Dada a grande variedade de tipos de aços, conforme composição, processo de acabamento e forma do produto acabado, foram criados sistemas para a sua classificação. Uma das classificações mais generalizadas, e que inclusive serviu de base para o sistema adotado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), é a que considera a composição química dos aços e, dentre os sistemas conhecidos são os mais usados os da American Iron and Steel Institute (AISI) e da Society of Automotive Engineers (SAE), os quais adotam as letras XX na posição

correspondente ao teor de carbono após os algarismos indicativos do tipo de aço, como, por exemplo, 10, que são aços simplesmente ao carbono. No caso de um aço SAE1010, significa que é um aço sem elementos adicionais de liga, ou seja, simplesmente ao carbono e com teor de 0,10%.

Os aços-carbono constituem o mais importante grupo de materiais utilizados na engenharia e na indústria. De fato, as propriedades mecânicas desses aços simplesmente ao carbono, sem qualquer elemento de liga, são suficientes para atender a maioria das aplicações práticas[4].

2.1.2 Aço ASTM A36

Os aços da linha ASTM (American Society for Testing and Materials) prioritariamente são utilizados em estruturas metálicas, nas quais temos como principais características as propriedades mecânicas normalmente utilizadas para o projeto do cálculo estrutural.

Os principais requisitos para os aços destinados à aplicação estrutural são: elevada tensão de escoamento, elevada tenacidade, boa soldabilidade, homogeneidade microestrutural, susceptibilidade de corte por chama sem endurecimento e boa trabalhabilidade em operações tais como corte, furação e dobramento, sem que se originem fissuras ou outros defeitos. Dentre os aços estruturais existentes atualmente, o mais utilizado e conhecido é o ASTM A36, que é classificado como um aço carbono de média resistência mecânica[9].

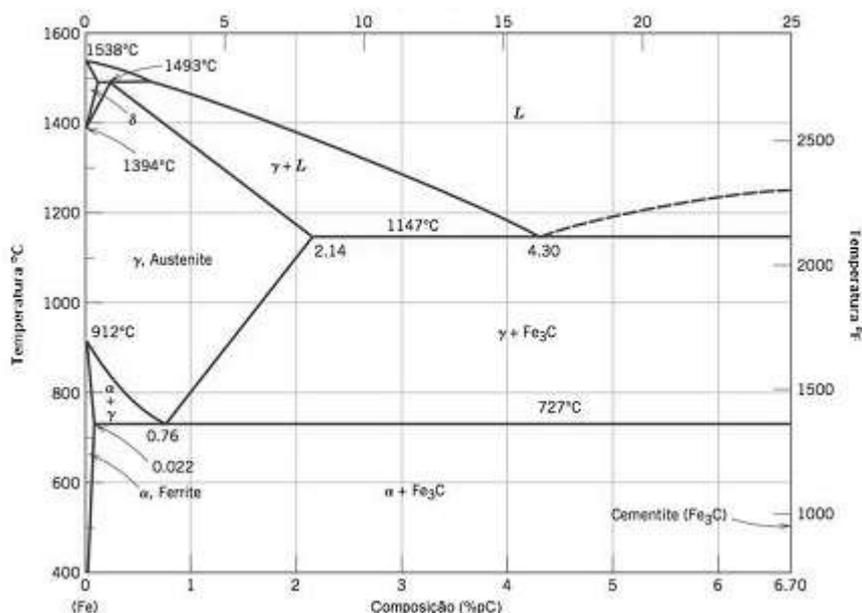
2.1.3 Estrutura cristalina do aço

As estruturas mais comuns são a cúbica de faces centradas (CFC) e a cúbica de corpo centrado (CCC). A célula unitária dessas estruturas é caracterizada por um cubo, tendo a CFC 4 átomos por célula unitária, 12 átomos vizinhos por átomo e 74% do volume da célula ocupado, enquanto a CCC possui 2 átomos por célula unitária, 8 átomos vizinhos por átomo e 68% do volume da célula ocupado. Esses números mostram que a estrutura cúbica de faces centradas é mais compacta que a cúbica de corpo centrado, isto é, seus átomos ocupam de maneira mais eficiente o espaço e, se considerar o mesmo raio atômico, os átomos organizados segundo a forma cúbica de faces centradas ocuparão menor volume o que conduzirá a uma maior densidade. Sendo o volume ocupado pelos átomos inferior a 100% do volume de uma célula unitária, tem-se a existência de vazios, chamados de interstícios [3].

2.1.4 Diagrama de equilíbrio ferro carbono

Uma parte do diagrama de fases ferro-carbono está apresentada na Figura 1. O ferro puro, ao ser aquecido, experimenta duas alterações na sua estrutura cristalina antes de se fundir. A temperatura ambiente, a forma estável, conhecida por ferrita, possui uma estrutura cristalina CCC. A ferrita experimenta uma transformação polimórfica para austenita, com estrutura cristalina CFC, à temperatura de 912 °C (1674°F). Essa austenita persiste até 1394°C (2541°F), temperatura em que a austenita CFC reverte novamente para uma fase com estrutura CCC, conhecida por ferrita δ , a qual finalmente se funde a uma temperatura de 1538°C (2800°F). Todas essas alterações estão aparentes ao longo do eixo vertical, à esquerda, no diagrama de fases.

Figura 1: Diagrama de equilíbrio ferro-carbono.



Fonte: [4]

O eixo das composições na Figura 1 se estende somente até 6.70%p C; nessa concentração, se forma o composto intermediário carbeto de ferro, ou cementita (Fe_3C), representado por uma linha vertical no diagrama de fases. [4].

O carbono é uma impureza intersticial no ferro e forma uma solução sólida tanto com a ferrita α como com a ferrita δ , e também com a austenita, como está indicado pelos campos monofásicos α , γ e δ na Figura 1. Na ferrita α , com estrutura CCC, somente pequenas concentrações de carbono são solúveis; a solubilidade máxima é

de 0,022%p a 727°C (1341°F). A solubilidade limitada pode ser explicada pela forma e pelo tamanho das posições intersticiais nas estruturas CCC, que tornam difícil acomodar os átomos de carbono. Embora ele esteja presente em concentrações relativamente baixas, o carbono influencia de maneira significativa as propriedades mecânicas da ferrita[4].

A austenita, ou fase γ do ferro, quando ligada somente com carbono, não é estável a uma temperatura inferior a 727°C (1341°F), como está indicado na Figura 1. A solubilidade máxima do carbono na austenita, 2,14%p, ocorre a 1147°C (2097°F). Essa solubilidade é aproximadamente 100 vezes maior do que o valor máximo para a ferrita com estrutura CCC, uma vez que as posições intersticiais na estrutura cristalina CFC são maiores[4].

A ferrita δ é virtualmente a mesma que a ferrita α , exceto pela faixa de temperaturas em que cada uma existe. Uma vez que a ferrita δ é estável somente a temperaturas relativamente elevadas.

A cementita (Fe_3C) se forma quando o limite de solubilidade para o carbono na ferrita α é excedido a temperaturas abaixo de 727°C (1341°F) (para composições dentro da região das fases $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$). Como indicado na Figura 1, o Fe_3C também coexistirá com a fase γ entre as temperaturas de 727 e 1147°C (1341 e 2097°F). Mecanicamente, a cementita é muito dura e frágil; a resistência de alguns aços é aumentada substancialmente pela sua presença [4].

2.1.4.1 Ligas hipoeutetóide

Considere uma composição Co à esquerda do eutetóide, entre 0,022 e 0,76%p C; essa é conhecida como uma liga hipoeutetóide (menos do que o eutetóide). O resfriamento de uma liga com essa composição é representado pelo movimento vertical, para baixo, ao longo da linha yy' na Figura 2.

portanto, aços dúcteis. Quanto menor o teor de carbono presente, mais ferrita e menos perlita se formam, resultando, como consequência, em maior ductilidade e menor dureza.

Esse tipo de aço é relativamente mole e pouco resistente, porém possuem ductilidade e tenacidade excepcionais; além disso, são usináveis, soldáveis e, dentre todos os tipos de aço, são os mais baratos a serem produzidos. Entre as suas aplicações típicas estão os componentes de carcaças de automóveis, formas estruturais (vigas tipo I, canaletas e ferros angulados) e chapas usadas em tubulações, edificações, pontes e latas estanhadas[3].

2.1.5 Propriedades dos Constituintes dos Aços e sua Influência Sobre as Características Mecânica

Os constituintes básicos dos aços são ferrita, cementita e perlita. Suas características são as seguintes:

-A ferrita (do latim ferrum) é ferro no estado alotrópico alfa, contendo em soluções traços de carbono; apresenta também uma estrutura de grãos poligonais irregulares; possui baixa dureza e baixa resistência à tração (28 kgf/mm²) mas excelente resistência mecânica e elevado alongamento (ductilidade).

-A cementita (do latim caementum) é o carbeto de ferro (Fe₃C) contendo 6,67% de carbono; muito dura (650 HV) e quebradiça, é responsável pela elevada dureza e resistência dos aços de alto carbono, assim como pela menor ductilidade.

-A perlita (nome devido à nuance de cores de madrepérola que esse constituinte frequentemente apresenta ao microscópio) é a mistura mecânica de 88,5% de ferrita e 11,5% de cementita na forma de lamelas finas (de espessura raramente maior a um milésimo de milímetro) dispostas alternadamente. As propriedades mecânicas da perlita são, portanto, intermediárias entre a ferrita e a cementita, dependendo, entretanto, do tamanho das partículas de cementita. Sua resistência à tração é em média 75 kgf/mm². A proporção de perlita cresce de 0% para ferro puro até 100% para o aço eutetóide.

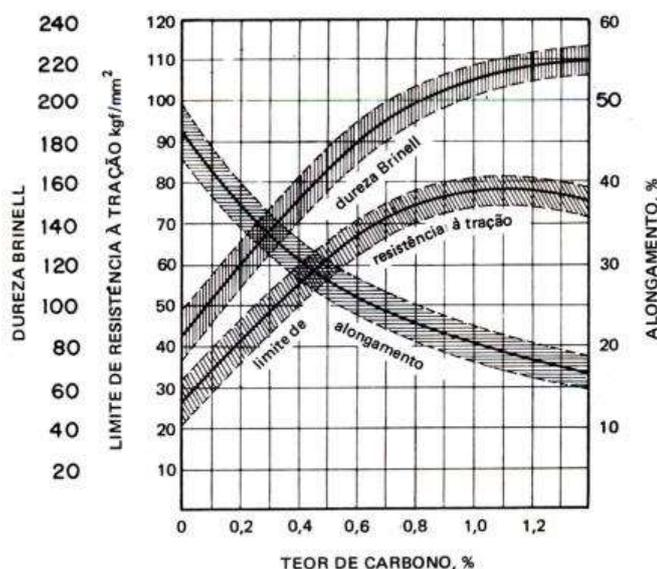
A transformação de austenita em perlita contendo ferrita e cementita é típica de muitas reações no interior dos sólidos, ou seja, começa nos contornos de grão e vai até o centro, o que é de se esperar porque os átomos nos contornos de grão possuem maior energia que aqueles dentro dos grãos[3].

Por outro lado, as propriedades da perlita dependem muito da espessura de suas lamelas e esta, por sua vez, da velocidade de sua formação.

Outro fator importante a ressaltar é o seguinte: em um aço hipoeutetóide o resultado do resfriamento lento é, como se viu, a formação de uma certa quantidade de ferrita até que a austenita remanescente se transforme em perlita. Assim a estrutura contém quantidades de ferrita e perlita que podem ser previstas. Se o resfriamento for acelerado, de modo a atingir uma temperatura mais baixa antes que ocorra a nucleação da ferrita primária (proeutetóide), a perlita pode se transformar até com teores de 0,4% de carbono [3].

A curva relativa aos limites de resistência à tração, como é visto na Figura 3, mostra que os máximos valores para essa propriedade se obtêm logo acima da composição eutetóide, permanecendo os mesmos a seguir praticamente constantes e podendo mesmo sofrer uma queda. Tal fato é devido a estrutura perlítica ser a mais resistente das que os aços resfriados lentamente apresentam; havendo cementita envolvendo grãos de perlita e sendo cementita de grande dureza, é de se esperar que haja um aumento da resistência à tração nos aços hipereutetóides. Entretanto, esse aumento não é muito sensível, como a curva mostra, visto que a própria alta dureza e conseqüente excessiva fragilidade da cementita podem, após certa quantidade, afetar desfavoravelmente a resistência mecânica do aço[3].

Figura 3: Influência do teor de carbono sobre as propriedades dos aços-carbono esfriados lentamente.



Fonte: [3].

2.1.6 Efeitos das impurezas

Os aços comuns contêm sempre, além do carbono, pequenos teores de fósforo, enxofre, manganês e silício, além de traços de outros eventuais elementos. Essas impurezas podem combinar-se entre si ou então com o ferro ou o carbono, apresentando-se como inclusões ou soluções sólidas.

Fósforo: Quando o teor desse elemento ultrapassa certos limites, constitui esse um dos mais nocivos que aparece nos aços, devido à fragilidade que este proporciona em temperatura ambiente. Além da fragilidade antes referida, o fósforo aumenta um pouco a dureza e a resistência mecânica e diminui a ductilidade. O teor limite varia conforme a aplicação, sendo menor em aplicações que necessitem tenacidade a frio;

Enxofre: A presença de esta impureza é facilmente notada ao microscópio, pois forma inclusões de sulfureto, que são visíveis mesmo sem ataque químico na amostra. A combinação do enxofre com o manganês forma o sulfureto de manganês e com o ferro, forma o sulfureto de ferro. A presença da primeira não é nociva, devido a esse sulfureto ser relativamente plástico, deformando e amolgando-se no sentido que o material é trabalhado. Já o sulfureto de ferro, causa fragilidade em temperaturas superiores a 988°C. As propriedades mais afetadas pela presença do enxofre são a resistência à tração, a ductilidade e a tenacidade, mas seus efeitos são mínimos em aços com baixo teor de carbono e, vale ressaltar, quando seu teor for menor que 0,1% [3].

2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS

As propriedades mecânicas dos aços-carbono são afetadas, em princípio pela composição química e pela microestrutura.

No que se refere à composição química, nos aços resfriados normalmente, isto é, em condições tais que se processe transformação total da austenita, o elemento predominante é o carbono que, à medida que aumenta, melhora as propriedades relativas à resistência mecânica, isto é, o limite de proporcionalidade (deformação elástica), o limite de escoamento (deformação plástica) e a dureza e piora as propriedades relativas à ductilidade e a tenacidade, isto é, o alongamento, a estricção e a resistência mecânica [3].

Quanto à microestrutura, esta é inicialmente afetada pela composição química, a qual determinará os constituintes presentes: ferrita e perlita, apenas perlita ou perlita e cementita.

Por outro lado, a microestrutura dos aços depende também dos seguintes fatores: estado e condição do aço sob o ponto de vista de fabricação (se fundido, trabalhado a quente ou trabalhado a frio), velocidade de resfriamento, tamanho de grão austenítico e homogeneidade da austenita [3].

No estado trabalhado a quente, em que a maioria dos aços é utilizada (laminados, forjados, etc.), como as operações de conformação a quente são realizadas a temperaturas em que o aço se apresenta no estado austenítico, verifica-se uma apreciável homogeneização da estrutura, destruição da estrutura dendrítica e recristalização dinâmica.

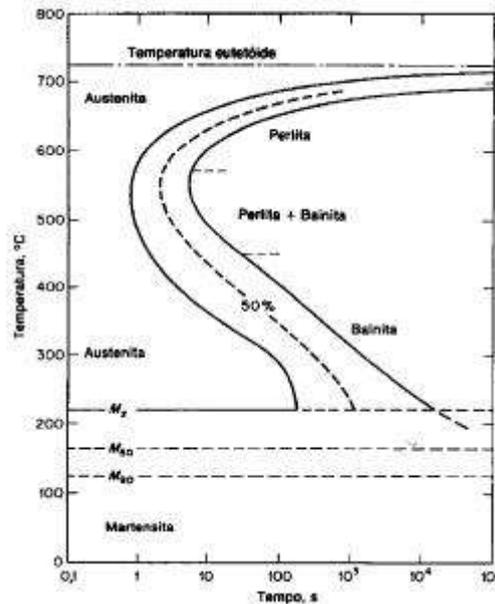
No estado encruado, característico de alguns dos mais importantes produtos siderúrgicos, como fios, fitas, chapas, barras, etc., os efeitos mais importantes são aumento da resistência mecânica, aumento da dureza e diminuição da ductilidade.

A velocidade de resfriamento a partir do estado austenítico originará, através da sua variação, as diversas estruturas típicas dos aços, caracterizando, dessa forma, o aço conforme a microestrutura. Na Figura 4, pode-se observar uma curva de início e fim da formação da perlita em relação a velocidade de resfriamento para um aço baixo-carbono [3].

Em relação ao tamanho de grão da austenita, quanto maior o tamanho do grão mais para direita é deslocado a curva de início da transformação da austenita, ou seja, mais tempo leva para iniciar a transformação. De fato, o produto da transformação — perlita — começa a se formar nos contornos de grãos da austenita e, então, se a austenita apresentar tamanho de grão grande, sua total transformação levará mais tempo do que se apresentar grão menor [2][3].

A falta de homogeneidade da austenita, ou seja, áreas localizadas ricas em carbono, aceleram a transformação da austenita.

Figura 4: Curva de início e fim da transformação da austenita em um aço



Fonte: [4]

2.2.1 Ductilidade

A ductilidade representa uma medida do grau de deformação plástica que o material suporta antes de ocorrer a ruptura. Um material que experimenta uma deformação plástica muito pequena ou mesmo nenhuma deformação plástica antes de sofrer a ruptura é chamado de frágil, enquanto aquele que apresenta uma considerável deformação plástica antes da ruptura, ou seja, apresenta alongamento antes da ruptura é chamado de dúctil [3].

2.2.2 Tenacidade

A tenacidade representa a habilidade de um material em absorver energia até a sua fratura. A geometria do corpo de prova bem como a maneira como a carga é aplicada, são fatores importantes nas determinações de tenacidade. Para condições de carregamento dinâmicas (elevada taxa de deformação), e quando um entalhe (ou ponto de concentração de tensão) está presente, a tenacidade ao entalhe é averiguada pelo uso de um ensaio de impacto. Para situação estática, é a área resultante abaixo da curva tensão-deformação.

Para que um material seja tenaz, ele deve apresentar tanto resistência quanto ductilidade; e frequentemente materiais dúcteis são mais tenazes que os frágeis [3].

2.3 TRATAMENTO TERMOQUÍMICO

2.3.1 Cementação

Diferentes tratamentos termoquímicos podem ser aplicados a aços, quando se visa alterar as propriedades superficiais. Em geral, estes tratamentos são usados quando a combinação de um núcleo tenaz com uma superfície de elevada resistência ao desgaste é desejada [5].

A maior parte dos tratamentos termoquímicos envolve a adição de carbono e/ou nitrogênio. Por serem solutos intersticiais difundem – se com relativa rapidez no aço viabilizando a realização deste tratamento.

A cementação pode ser realizada em meio gasoso, líquido ou sólido. O potencial químico do carbono, no meio de cementação definirá a concentração máximo de carbono que o aço poderá atingir e, portanto, o teor de carbono na superfície da peça [5].

Na cementação, o elemento fundamental é o carbono, na forma de carvão, monóxido de carbono ou contido em banhos de cianetos. Os aços a serem cementados devem possuir carbono baixo, de modo que, quando aquecidos a elevadas temperaturas (de austenização), na presença de um meio carbonetante, o carbono desse meio reage com o ferro do aço, de acordo com a reação simples:



Desse modo a superfície do aço fica enriquecida de carbono, até a profundidade que pode ser perfeitamente preestabelecida, permitindo, assim, a sua têmpera posterior, para aumento superficial da dureza e da resistência ao desgaste[6].

Existem três métodos de cementação: por via sólida (também chamada “cementação em caixa”), por via gasosa e por via líquida.

Na cementação sólida as peças são colocadas em caixas metálicas, geralmente de aço-liga resistente ao calor, em presença das chamadas misturas carburizantes. As misturas mais usadas apresentam carvão de madeira, aglomerado com cerca de 5% a 10% de uma substância ativadora, por meio de óleo comum ou óleo de linhaça em quantidades que variam de 5% a 10%. Os ativadores mais comuns são carbonatos alcalinos ou alcalinos ferrosos, como carbonato de sódio, carbonato de potássio, carbonato de cálcio e carbonato de bário [2].

A faixa de temperaturas na cementação sólida é, geralmente, de 815°C a 950°C, podendo chegar até a temperatura entre 1000°C e 1100°C.

É preciso notar que a geração de quantidades apreciáveis de CO₂ se dá a temperaturas elevadas, de modo que se deve evitar, após a cementação, resfriamento muito lento até mais ou menos 650°C, pois havendo formação de quantidade apreciável de CO₂, origina-se uma casca mole [6].

As desvantagens do processo relacionam-se com os fatos de: não proporcionar um controle rigoroso da espessura da camada cementada; não ser recomendável para obtenção de camadas finas; não ser adequado para têmpera direta; exigir tempo mais longo de operação (devido ao peso das caixas e da mistura carburizantes que reduzem as velocidades de aquecimento e resfriamento) então ser tão limpo quanto os outros processos de cementação [6].

2.4 TRATAMENTO TÉRMICO

2.4.1 Têmpera

Uma das características mais importante dos aços como materiais de construção mecânica é a possibilidade de desenvolver ótimas combinações de resistências e tenacidade (medida pela resistência ao impacto). A estrutura que permite tais combinações é a estrutura martensita revenida.

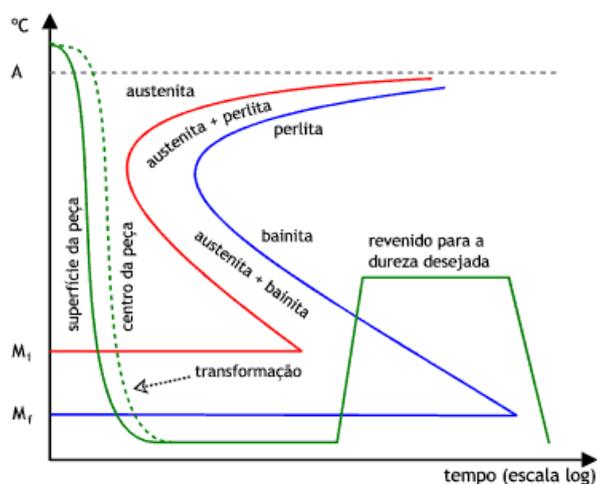
Os meios mais comuns de resfriamento são líquidos ou gasosos. No caso dos meios líquidos, os mais comumente usados são:

- Água;
- Água contendo sal ou aditivos cáusticos;
- Óleo, que pode conter uma variedade de aditivos;
- Soluções aquosas de polímeros;

Os meios gasosos mais comuns, além do ar, são gases inertes, como nitrogênio, hélio e argônio [2].

A velocidade de resfriamento deve ser tal que a curva de resfriamento pelo menos tangencie o cotovelo ou joelho da curva de início de transformação da austenita, Figura 5 (de modo a evitar que essa se transforme nos constituintes normais) e atinja as linhas horizontais correspondentes a formação de martensita [6].

Figura 5 – Diagrama esquemático representativo das operações de têmpera e revenido.



Fonte: [4]

Como na têmpera o constituinte final desejado é martensita, os objetivos dessa operação, sob o ponto de vista de propriedades mecânicas, são aumento da dureza do aço e da sua resistência à tração. Na realidade, o aumento da dureza deve ocorrer até certa profundidade [2].

Resultam também da têmpera, redução da ductilidade (baixos valores de alongamento e estrição), da tenacidade e o aparecimento de apreciáveis tensões internas, que podem se não bem controladas, ocasionar deformação, empenamento e fissuração [2].

Para que a operação de têmpera seja bem-sucedida, vários fatores devem ser levados em conta. Inicialmente, a velocidade de resfriamento deve ser tal que impeça a transformação da austenita nas temperaturas mais elevadas, em qualquer parte da peça que se deseja endurecer. De fato, as transformações da austenita nas altas temperaturas podem dar como resultados estruturas mistas, as quais ocasionam o aparecimento de pontos moles além de conferirem ao aço baixos valores para o limite de escoamento e para resistência ao choque. Portanto, a seção das peças constitui outro fator importante porque pode determinar diferenças de resfriamento entre a superfície e o centro [2].

Em peças pequenas ou de pequena espessura, essa diferença é desprezível. O mesmo, contudo, não se dá com peças de grandes dimensões, no centro das quais a velocidade de esfriamento é menor do que na superfície, resultando estruturas de transformação mistas, a não ser que o teor de elementos de liga do aço seja suficiente para impedir essa transformação e produzir somente a estrutura martensítica.

Às vezes, por outro lado, é conveniente um núcleo mais mole e, então, escolhe-se um aço e uma velocidade de esfriamento que produzam superfície dura e núcleo naquelas condições[2].

2.4.1.1 Meios e severidade de têmpera

A escolha do meio de resfriamento para a operação de têmpera depende inicialmente de:

- Dureza final desejada
- Forma e dimensões da peça
- Capacidade de endurecimento da peça.

Em princípio quanto maior for a capacidade de resfriamento do meio, maior a dureza final. Contudo velocidades muito drásticas, proporcionadas por meios de grande capacidade de resfriamento, podem ser prejudiciais em função das dimensões e forma das peças [6].

As soluções aquosas constituem os meios mais drásticos de resfriamento e são igualmente os de menor custo. Assim, são os meios preferidos, desde que as peças apresentem formas que não provoquem excessivos empenamentos ou mesmo fissuração durante a têmpera.

A água principalmente tem seu uso limitado a peças simples e simétricas e para a têmpera de aços de baixa capacidade de endurecimento (aços-carbonos ou de baixo teor de liga), os quais exigem maiores velocidades de resfriamento [6].

As salmouras são soluções aquosas de cloreto de sódio ou potássio, frequentemente com aditivos que, entre outros efeitos, inibem a corrosão.

As salmouras apresentam o inconveniente de ser de natureza corrosiva, de modo que se recomenda que o equipamento para seu manuseio seja revestido com camadas protetoras contra corrosão [6].

2.4.2 Revenido

O revenido é o tratamento térmico que normalmente sempre acompanha a têmpera, pois elimina a maioria dos inconvenientes produzidos por esta, além de aliviar ou remover tensões internas, corrige as excessivas dureza e fragilidade do material, aumentando sua ductilidade e resistência ao choque [2].

Dependendo da temperatura, resultam pequenas ou grandes transformações na estrutura martensítica[6].

O aquecimento da martensita permite a reversão do reticulado instável ao reticulado estável cubico centrado, produz reajustamento internos que aliviam as tensões e, além disso, uma precipitação de partículas de carbonetos que crescem e se aglomeram de acordo com a temperatura e o tempo [2].

As seguintes transformações estruturais apresentam a seguinte sequência:

- Entre 100° e 200 °C, não há modificações estruturais sensíveis. As estruturas, quando atacadas, apresentam aspecto mais claro idêntico ao da martensita original, a temperatura mais baixa ou, a temperatura mais elevada, aspecto mais escuro.

- Entre 200 e 260 °C, nessa faixa, o aço começa a perder mais dureza, embora não se verifique nenhuma modificação estrutural notável.

- Entre 260 e 360 °C, inicia –se uma precipitação de carbonetos finos, a qual origina uma estrutura com a aparência de um agregado escuro onde ainda se nota a origem martensítica.

- Entre 360 e 730 °C, nessa faixa ocorrem as maiores transformações estruturais e mecânicas. Quanto mais elevada a temperatura do revenido mais grossa se tornam as partículas de cementita precipitada as quais ficam perfeitamente visíveis numa matriz ferrítica[6].

Na realidade, existem duas faixas de temperaturas favoráveis para o revenido dos aços, no sentido de melhorar sua tenacidade: 150 a 200 °C na qual resulta apenas um ligeiro acréscimo de tenacidade e acima de 425 °C, na qual se obtém uma melhora considerável na tenacidade, com o prejuízo, porem, da resistência mecânica e da dureza.

A faixa mais baixa de temperatura é recomendada para aplicações que exigem altas resistências mecânicas e a fadiga.

O revenido acima de 425 °C é empregado em peças cuja principal característica deva ser alta tenacidade e onde, em consequência, a resistência mecânica e a dureza são características secundários [6].

2.5 ENSAIOS DOS MATERIAIS

Todo projeto de um componente mecânico, ou, mais amplamente projeto de engenharia, requer, para sua viabilização, um vasto conhecimento das características,

propriedades e comportamentos dos materiais. Os critérios de especificação ou escolha de materiais impõem, para a realização dos ensaios, métodos normalizados que objetivam levantar as propriedades mecânicas e seu comportamento sob determinadas condições de esforços.

O comportamento mecânico de qualquer material utilizado em engenharia e função de sua estrutura interna e de sua aplicação em projeto. As características a que o material especificado deve atender podem ser divididas em duas categorias:

Características de processamento – referem-se às propriedades físicas da matéria-prima como função dos processos de fabricação envolvidos na manufatura do produto final;

Características de aplicação – referem-se às propriedades físicas desejadas no produto acabado como função direta de sua utilização e comportamento estrutural [8].

2.5.1 Ensaio de dureza

A dureza é uma propriedade mecânica cujo conceito se segue resistência que um material, quando pressionado por outro material, apresenta ao risco ou à formação de uma marca permanente. A dureza de um material depende diretamente das forças de ligação entre átomos, íons ou moléculas, do escorregamento de planos atômicos, assim como da resistência mecânica, os sólidos metálicos e iônicos, devido à natureza mais intensa das forças de ligação, são mais duros, enquanto os sólidos de ligação covalente são os materiais conhecidos de maior dureza. A dureza dos metais pode também ser aumentada por tratamentos especiais, como adição de soluto, trabalho a frio, refino de grão, endurecimento por precipitação, tratamentos térmicos ou termoquímicos específicos [8].

É o método mais utilizado internacionalmente. Esse tipo de ensaio de dureza utiliza-se da profundidade da impressão causada por um penetrador sob a ação de uma carga aplicada em dois estágios (pré-carga e carga suplementar) como indicador da medida de dureza, e não há relação com a área da impressão, como no caso da dureza Brinell. A dureza Rockwell pode ser classificada como comum ou superficial, dependendo da pré-carga e carga aplicadas [8].

O penetrador tanto pode ser um diamante esferocônico com ângulo de 120° e ponta ligeiramente arredondada ($r = 0.2 \text{ mm}$) como uma esfera de aço endurecido ou carboneto de tungstênio, geralmente com diâmetro de 1,59 mm (1/16"), existindo também nos diâmetros de 3,17 mm (1/8"), 6,35 mm (1/4") e 12,70 mm (1/2").

No caso de ensaios de dureza Rockwell comum, utilizam-se pré-carga de 98 N (10 kgf) e carga ou força total de 589 N (60 kgf); 981 N (100 kgf) e 1471 N (150 kgf); e, para dureza superficial, pré-carga de 29 N (3 kgf) e forças totais de 147 N (15 kgf), 294 N (30 kgf) e 441 N (45 kgf).

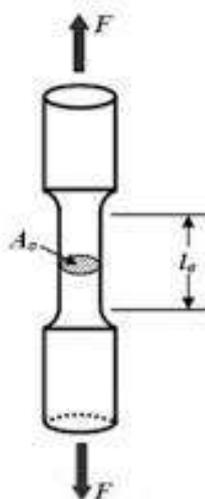
A profundidade de penetração (p) é correlacionada, pela máquina de ensaio, a um número arbitrário, cuja leitura é feita diretamente na escala do equipamento, após a da carga principal, mantendo-se, entretanto, a carga inicial ou pré-carga. Como o método utiliza vários penetradores e cargas, este é dividido em escalas dependendo das combinações, podendo-se citar B, C, A, D, E, F, G, H, K, L, M, P, R, S e V como comuns e 15N ou 15T, 30N ou 30T e 45N ou 45T como superficiais. O número de dureza Rockwell é sempre designado pelo símbolo HR seguido da escala utilizada, precedidos do valor numérico[8].

2.5.2 Ensaio de tração

Ensaio de tração consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova especificado até ruptura. Mede-se a variação no comprimento (L) como função da carga aplicada (P), e após o tratamento adequado dos resultados obtém-se uma curva tensão (σ) versus a deformação (ϵ) do corpo de prova.

Para as definições da tensão e deformação convencionais, considera-se uma barra cilíndrica e uniforme que é submetida a uma carga de tração uniaxial, crescente, conforme a Figura 6 [8].

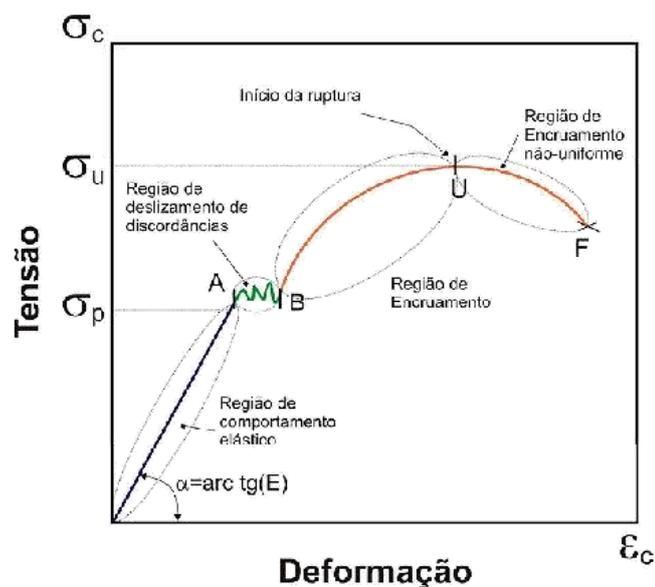
Figura 6: Desenho esquemático de um corpo de prova submetido à carga de tração.



Fonte: [11]

Na curva da Figura 7 observam-se quatro regiões de comportamentos distintos, e cada região caracteriza um determinado tipo de deformação sofrida pelo corpo de prova durante a execução do ensaio, conforme se segue:

Figura 7: Curva tensão – deformação convencional.



Fonte: [11]

Região de comportamento elástico – corresponde a primeira região de deformação do corpo de prova. Nessa região observa-se o fenômeno do efeito elástico, que, ao cessar a aplicação o corpo de prova retoma suas dimensões originais [8].

Região de deslizamento de discordâncias – corresponde ao início da deformação plástica do material; nos estágios iniciais dessa deformação, a tensão pode sofrer oscilações que dependerão da acomodação das discordâncias no interior da rede cristalina do material.

Região de encruamento uniforme – corresponde ao encruamento propriamente dito, à medida que os planos cristalinos escorregam entre si, estes são gradativamente freados ou travados pelas discordâncias que atingem o contorno de região exigindo cada vez mais tensão para que a deformação continue.

Região de encruamento não uniforme – corresponde a última região de deformação; nesta passa a existir o processo de ruptura do corpo de prova. Para um material de alta capacidade de deformação permanente o diâmetro do corpo de prova

começa a decrescer rapidamente ao se ultrapassar a tensão máxima. Assim, a cara necessária para continuar a deformação diminui até a ruptura total [8].

2.5.2.1 Tipos de fratura

A fratura é definida como separação ou fragmentação de um corpo sólido em duas ou mais partes, sob a ação de uma tensão, e pode ser mais bem analisada considerando dois fenômenos que deverão ocorrer do modo sequencial. De modo geral a fratura pode ser classificada em duas categorias, fratura frágil e fratura dúctil. A fratura dúctil é caracterizada pela ocorrência de uma apreciável deformação plástica antes e durante a propagação da trinca. A fratura frágil nos metais é caracterizada pela rápida propagação da trinca, com nenhuma deformação macroscópica e muito pouca deformação microscópica [8].

2.6 ANÁLISE METALOGRAFICA

A metalografia é tanto uma arte quanto uma ciência. A arte reside nas técnicas usadas para preparar uma amostra - seccionamento, montagem, polimento, polimento e gravação - e para fotografar um espécime. Quando devidamente realizadas, estas técnicas resultam em uma micrografia que é tanto uma verdadeira representação da microestrutura de um material e uma bela executada [12].

2.6.1 Análise microscópica

O ensaio micrográfico, consiste no estudo dos produtos metalúrgicos, com o auxílio do microscópio, onde se pode observar as fases presentes e identificar a granulação do material (Tamanho de grão), o teor aproximado de carbono no aço, a natureza, a forma, a quantidade, e a distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões [10].

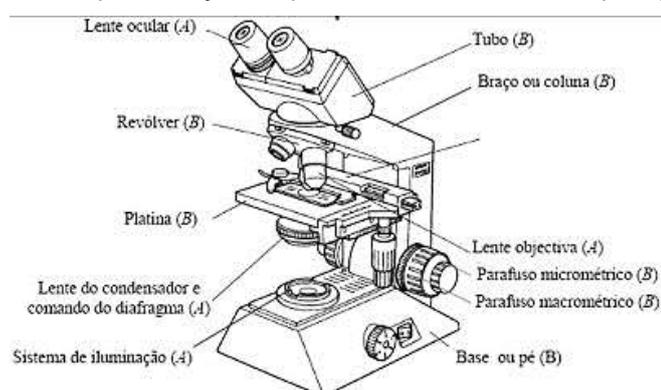
Todos os exames de microestrutura devem começar com o uso do microscópio óptico, começando com baixa ampliação, como 100x, seguido por ampliações progressivamente maiores para avaliar as características básicas da microestrutura de forma eficiente. A maioria das microestruturas pode ser observada com o microscópio óptico e identificada com base em suas características. A identificação de constituintes questionáveis ou desconhecidos pode ser auxiliada pela observação de sua dureza em relação à matriz, pela sua cor natural, pela sua resposta à luz

polarizada, e pela sua resposta a composições seletivas. Estas observações são comparadas com detalhes conhecidos sobre a metalurgia física do material a ser examinado. Se a dúvida ainda permanecer ou se a estrutura é muito boa para observar, técnicas mais sofisticadas devem ser implementadas [11].

O microscópio apresenta dois sistemas de lentes convergentes; a objetiva e a ocular. A objetiva é um conjunto de lentes que apresenta pequena distância focal e que fornece uma imagem real e aumentada do objeto que é observado. A ocular, também formada por lentes convergentes, funciona como uma lupa, que nos dá uma imagem virtual e aumentada da imagem real que se formou através da objetiva [4].

A Figura 8 mostra a representação esquemática de um microscópio óptico.

Figura 8: Representação esquemática de um microscópio óptico.



Fonte: [11].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item estão descritos os procedimentos e materiais adotados para a obtenção e avaliação das propriedades mecânicas do aço ASTM A36.

3.1 MATERIAIS

Os materiais usados nesse trabalho foi um aço ASTM A36 da empresa Gerdau em forma de 3 lingotes cilíndrico de 1 metro de comprimento por 12 mm de diâmetro, com uma composição química conforme a Tabela 1. Para o processo de cementação foi usado grafite e carvão vegetal como pó cementante, carbonato de sódio e óleo de linhaça, e um forno da marca Jung. No processo de têmpera usou se sal e agua para a preparação da salmoura, e um forno da marca Jung. A dureza foi realizada em um

durometrô de escalas Rockwell da marca Pantec. O ensaio de tração utilizou-se a máquina DL 1000 da marca EMIC.

Tabela1: composição química do aço ASTM A36

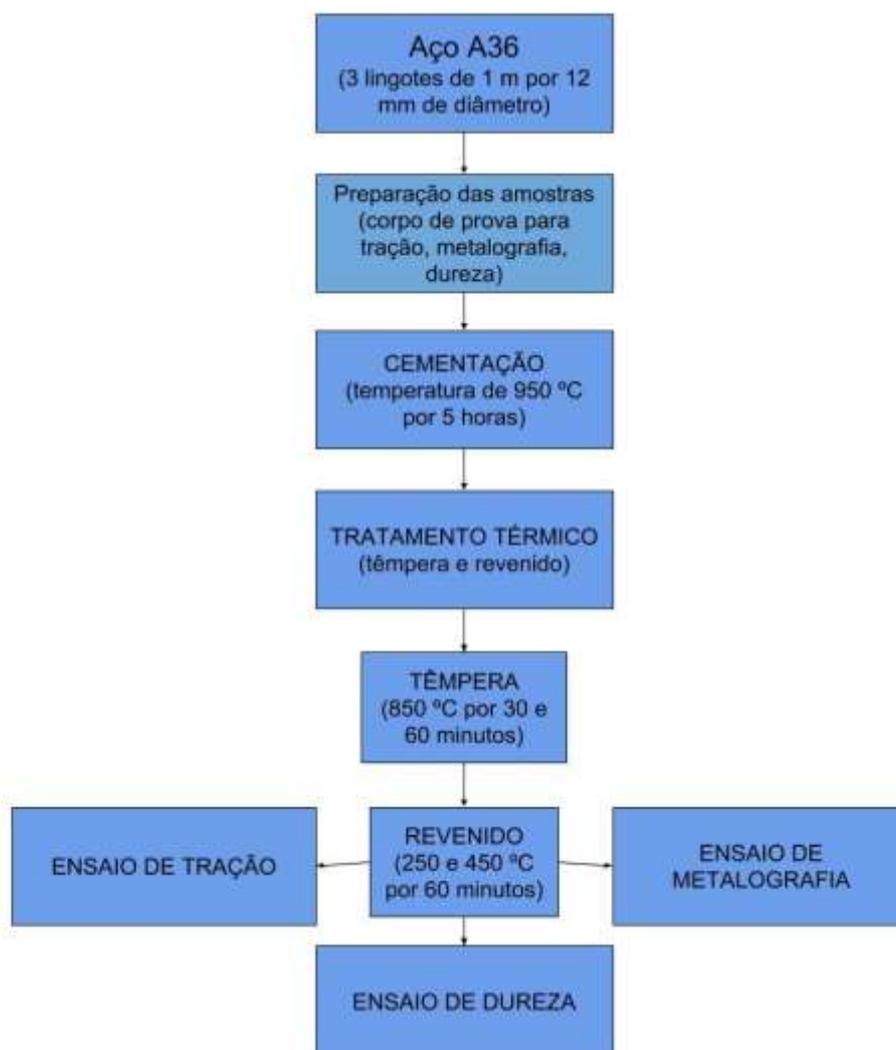
C %	Mn %	Si %	S %	P %	Cu %	Cr %
0,14	0,63	0,15	0,011	0,033	0,01	0,02

Fonte: [Gerdau].

3.2 MÉTODOS

A metodologia usada nesse trabalho seguiu a ordem descrita na Figura 9.

Figura 9: Fluxograma da prática experimental.



Fonte: [Autor].

3.3 ANÁLISE QUÍMICA

As análises químicas foram realizadas no laboratório da empresa Sinobras em um equipamento de Espectrofotômetro do modelo ARLQuantodesk, da marca Thermo.

3.4 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A partir dos lingotes foram retirados 15 corpos de prova cilíndricos de 192 mm por 12 mm de diâmetro para ensaio de tração, sendo feito a usinagem no centro do corpo de prova para o ensaio, 12 corpos de prova foram lixados com uma lixa de 120# retirando qualquer resíduo de oxido para um melhor processo de cementação.

Para o ensaio de dureza preparou se 5 corpos de prova, sendo um para cada condição estabelecida, sendo os mesmos lixados em uma lixa 120# após o tratamento de cementação e tratamento térmico para o devido ensaio.

Para análise metalografica os 5 corpos de prova produzidos foram lixados com granulometria que varia de 150# a 1200#, com posterior polimento com alumina como abrasivo e limpa com álcool etílico e algodão, então feito ataque químico com nital a 2% por 5 segundos; passando esse tempo as amostras foram limpas novamente com álcool e agua para finalizar a reação química, e secas em um secador elétrico.

3.5 TRATAMENTO TERMOQUÍMICO E TÉRMICO

O tratamento termoquímico realizado foi cementação sólida, seguido de tratamento térmico pós cementação, de têmpera e revenido. As amostras foram distribuídas de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2: Distribuição dos tratamentos

Tratamento térmico	Temperatura	Tempo	Quantidade de corpo de prova
Sem tratamento	-	-	3
Cementação	950 °C	5 h	12
Tempera	850 °C	30 min	6
		60 min	6
Revenido	250 °C	60 min	6
	450 °C		6

Fonte: [autor].

3.5.1 Cementação

Para o processo de cementação foram preparadas o coque de injeção (grafite + carvão), sílica (tamanho de partícula <150 µm) colocadas em estufa por 48 horas, carbonato de sódio (99,5% de pureza) e óleo de linhaça nas proporções conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Proporção dos elementos usados na cementação

Pó cementação (85%)	Catalisador (13,50%)	Aglutinante (1,50%)
1534 g de grafite 166 g carvão	270 g Na ₂ CO ₃	30 g óleo de linhaça

Fonte: [Autor].

Foram colocadas em uma caixa metálica uma camada de coque e em cima as amostras a serem cementada, de acordo com a Figura 10.

Figura 10: Caixa de cementação com os corpos de prova.



Fonte: [autor].

Em seguida mais uma camada do coque cobrindo as peças; acima do coque foi colocado a sílica para o devido vedamento da caixa de cementação, para evitar um contato maior do coque com o oxigênio, conforme a Figura 11.

Figura 11: Caixa de cementação preenchida.



Fonte: [autor]

A caixa devidamente fechada foi colocada no forno, e ao chegar a temperatura de 950 °C manteve-se a mesma nessa temperatura por 5 horas. Cessado o devido tempo, a caixa foi retirada do forno e verificada a temperatura com um termopar, até chegar 650 °C para então a mesma voltar para o forno na mesma temperatura para o resfriamento lento.

3.5.2 Têmpera

No processo de têmpera as peças foram inseridas no forno separadas em dois grupos de 6 corpos de prova, conforme a Figura 12, e esperou se o forno chegar a

temperatura de 850 °C, contando assim o tempo de 30 minutos e retirando 6 corpos de prova e resfriando em salmoura, após 60 minutos os outros 6 corpos de prova foram retirados a resfriado em salmoura. Devido a severidade do resfriamento, os corpos de prova criaram uma fina camada de oxido (carepa).

Para o resfriamento foi preparada uma solução com 2 litros de agua com 1 kg de cloreto de sódio formando assim a salmoura a temperatura ambiente.

Figura 12: Corpos de prova pós têmpera.



Fonte: [Autor].

3.5.3 Revenido

O revenido foi realizado separando os corpos de prova em 4 grupo de 3, assim sendo 2 grupos inseridos no forno aquecido até uma temperatura de 250 °C e 2 grupos inseridos no forno e aquecido até a uma temperatura 450 °C, ambos os grupos foram retirados dos fornos após 60 minutos na respectiva temperatura, com o resfriamento ao ar.

3.6 ENSAIO DE DUREZA

A dureza foi realizada na condição 1 com 10 endentações, Rockwell B com carga de 100 kgf e penetrador de esfera de 1,59 mm; nas condições da 2 a 5 foi realizado com escala Rockwell C com penetrador de diamante com carga de 150 kgf, em um equipamento da marca Pantec, Figura 13. As durezas foram medidas da borda para o centro das peças, de acordo com a Tabela 3.

Figura 13: Máquina de tração



Fonte: [autor].

3.7 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado em 15 corpos de prova, em uma máquina de tração da marca EMIC DL10000, com uma célula de carga de 100 kN, conforme a Figura 14.

Figura 14: Máquina de tração (marca EMIC).



Fonte: [autor].

De acordo com as condições estabelecidas na Tabela 3, para o ensaio os corpos de prova seguiram a ordem.

Tabela 3: Distribuição das amostras para ensaio de tração, dureza.

Condição	Tratamento	Temperatura	Tempo
1	-	-	-
	Cementação	950 °C	5 horas
2	Têmpera	850 °C	30 min
	Revenido	250 °C	60 min
	Cementação	950 °C	5 horas
3	Têmpera	850 °C	60 min
	Revenido	250 °C	60 min
	Cementação	950 °C	5 horas
4	Têmpera	850 °C	30 min
	Revenido	450 °C	60 min
	Cementação	950 °C	5 horas
5	Têmpera	850 °C	60 min
	Revenido	450 °C	60 min

Fonte: [autor].

1.1. ENSAIO METALOGRAFICO

Para os ensaios metalográficos as peças foram lixadas com lixas de granulometria variando de 120# a 1200#, sempre girando 90° de lixa para outra; após isso as peças foram polidas com pasta de alumina, sendo limpas com álcool e água e secas com secador elétrico. Após, as peças devidamente polidas, foram atacadas com reagente nital 2% por 5 segundos, limpas com álcool e água para parar a reação, seca com um secador elétrico. A preparação foi feita na seção transversal da base da peça.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados obtidos através do tratamento termoquímico e térmicos, de análise química, ensaio de impacto, dureza e metalografia, serão mostrados e discutidos a seguir.

4.1 ANÁLISE QUÍMICA

Através do ensaio de Espectrofotômetro realizado no laboratório de análise química da empresa Sinobras – Siderúrgica Norte Brasil S/A - obteve-se os seguintes resultados para as amostras em questão:

Tabela 4: Composição química após tratamento termoquímico de cementação.

Condição	C%	Mn%	Si%	S%	P%	Cu%	Cr%
2	0,70	0,67	0,08	0,00	0,02	0,03	0,01
3	0,67	0,65	0,08	0,00	0,02	0,03	0,01
5	0,90	0,68	0,08	0,00	0,02	0,03	0,01

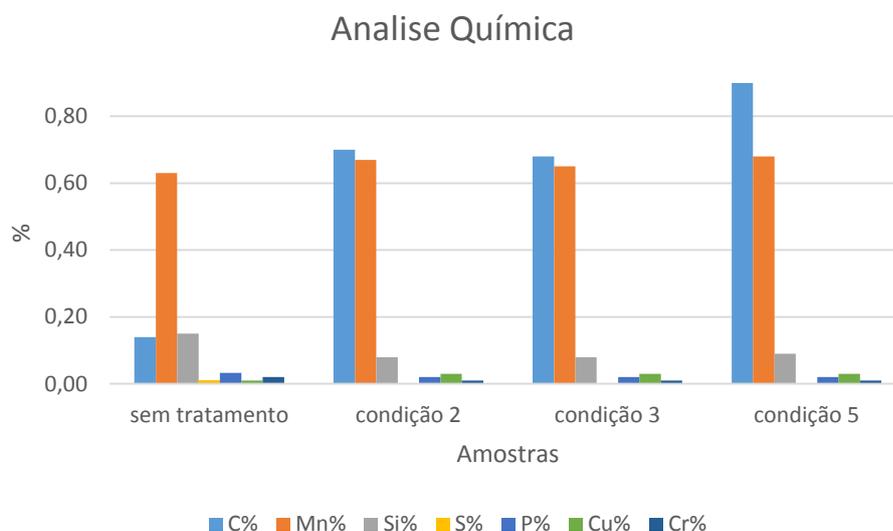
Fonte: [Sinobras].

Devido não ter um corpo de prova para a realização da análise química, a condição 4 ficou sem a composição química de pós tratamento termoquímico e térmico.

Com os resultados obtidos pela análise química mostrados na Tabela 4, podemos observar que após o tratamento térmico de pós-cementação todos os principais elementos constituintes do aço A36 não tiveram variações significativas de composição química em comparação da condição 1 para as demais condições, ou seja, o tratamento para esses elementos não teve grandes influências.

Se atentarmos para o carbono (**C**), verifica-se que após o tratamento de cementação sua composição química variou bastante, como mostra o Gráfico 1. Sendo que o teor de carbono na peça na condição sem tratamento era de 0,14% C, que após o tratamento, aumentou para 0,90% C na condição 5.

Gráfico 1: Análises químicas do aço A36 sem e após tratamento de têmpera e revenido.



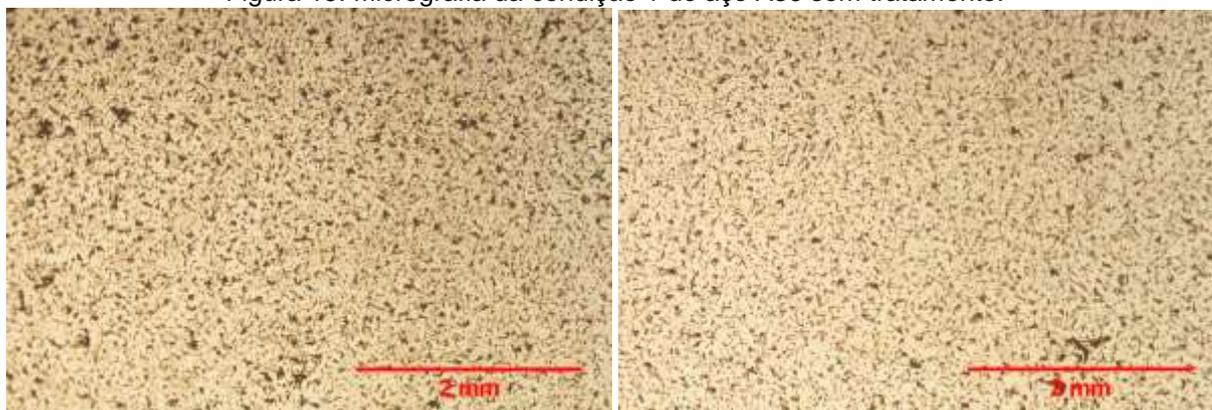
Fonte: [autor].

Com base no Gráfico 1 percebe-se que o tratamento obteve o grau de eficiência desejado, sendo que o aumento de carbono na peça pela difusão dos átomos, sem provocar grandes alterações na composição química dos outros elementos constituintes do aço é o principal objetivo dos tratamentos termoquímicos de cementação.

4.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Foram analisadas a microestrutura, observando-se o arranjo microestrutural das peças após a cementação, tendo as mesmas um ganho bastante elevado de carbono.

Figura 15: Micrografia da condição 1 do aço A36 sem tratamento.

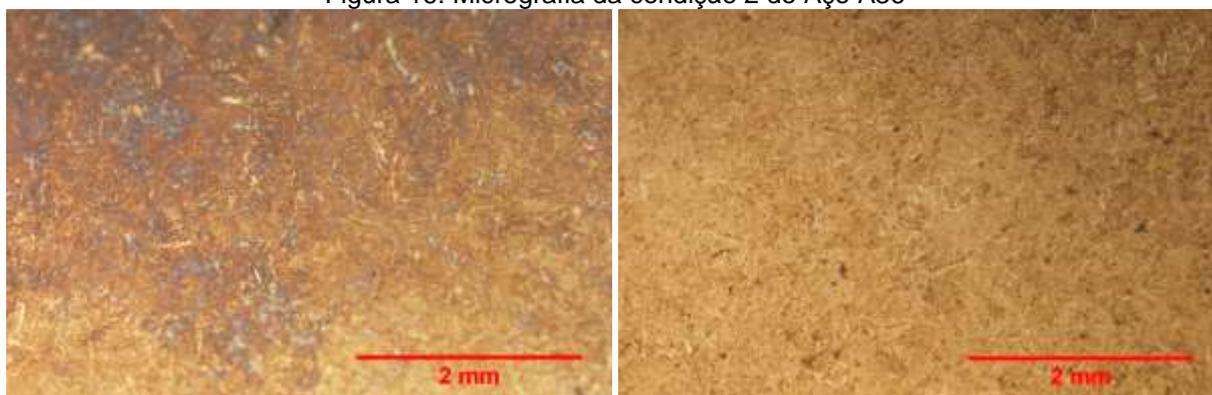


Fonte: [autor].

A amostra 1 do aço A36 não sofreu tratamento termoquímico e térmicos durante o trabalho. Com a micrografia da Figura 15, observa-se os grãos de ferrita (coloração mais clara) com pequenas ilhas de perlita (coloração mais escura), tanto a ferrita como a perlita apresentam grãos finos, característica normal dos grãos sem tratamentos do aço em questão.

As micrografias a seguir foram analisadas o arranjo microestrutural de cada condição realizada conforma a Tabela 3.

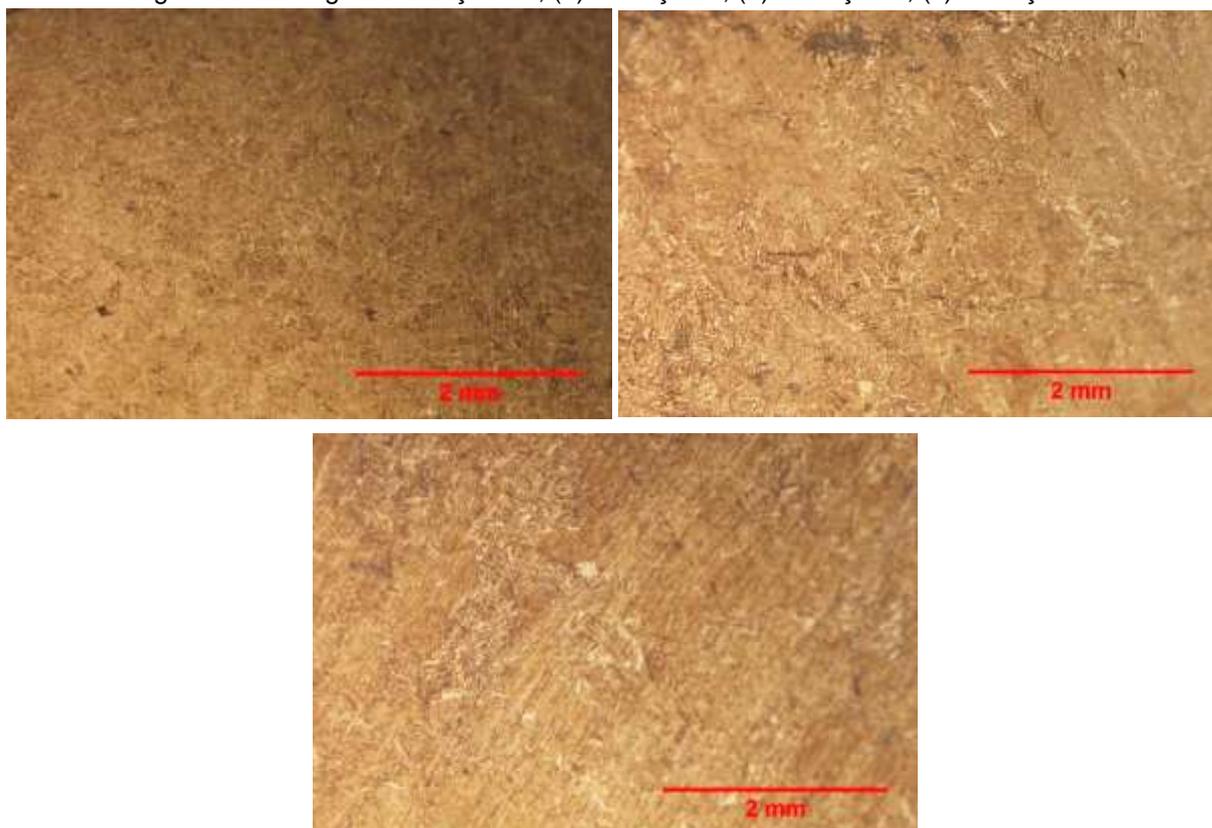
Figura 16: Micrografia da condição 2 do Aço A36



Fonte: [autor].

A condição 2 do aço A36 submetido a tratamento termoquímico (cementação a 950 °C durante 5 horas), e tratamento térmico pós-cementação (Têmpera a 850 °C durante 30 minutos e revenido a 250 °C durante 60 minutos) a micrografia da Figura 16(a) da borda da peça, apresenta grãos de martensita (coloração escura), com ilhas de ferrita (coloração clara), já na Figura 16(b) no centro da peça, observa-se grãos de ferrita em maior quantidade com poucos grãos de martensita, na comparação com a amostra 1 sem tratamento térmico, pode-se perceber a formação da martensita após os tratamentos.

Figura 17: Micrografia do Aço A36, (a) condição 3, (b) condição 4, (c) condição 5.



Fonte:[autor].

A condição 3 do aço A36 submetido a tratamento termoquímico (cementação a 950 °C durante 5 horas), e tratamento térmico pós-cementação (Têmpera a 850 °C durante 60 minutos e revenido a 250 °C durante 60 minutos) a micrografia da Figura 17(a) apresenta grãos de martensita (coloração escura), com ilhas de ferrita (coloração clara). Comparando com a amostra 1 (sem tratamento térmico), ouve a formação de grãos da martensita e ferrita.

A condição 4 do aço A36 submetido a tratamento (cementação a 950 °C durante 5 horas), e tratamento térmico pós-cementação (Têmpera a 850 °C durante 30 minutos e revenido a 450 °C durante 60 minutos), a micrografia da Figura 17(b) apresenta grãos de martensita (coloração escura), com ilhas de ferrita (coloração clara). Podemos ver um refinamento dos grãos de martensita e ferrita.

Na condição 5 do aço A36 submetido a tratamento termoquímico (cementação a 950 °C durante 5 horas), e tratamento térmico pós-cementação (Têmpera a 850 °C durante 60 minutos e revenido a 450 °C durante 60 minutos), a micrografia da Figura 17(c) apresenta grãos de martensita (coloração escura), com ilhas de ferrita (coloração clara).

O ensaio de dureza comprova a formação da martensita na superfície, mostradas no ensaio metalográfico.

4.3 ENSAIO DE DUREZA

Os resultados de dureza do aço A36, com a média e desvio padrão sem tratamento e após tratamento térmico de têmpera e revenido serão mostrados na Tabela 5. Para que possa ter uma medida de comparação entre as durezas, convencionou-se transformar todas as durezas de Rockwell para Brinell.

Tabela 5: Dureza média e desvio padrão geral das condições de tratamentos

	Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4	Condição 5
	HB	HB	HB	HB	HB
Resultados	111	375	415	277	293
	111	388	415	302	302
	111	401	429	311	331
	116	415	429	321	331
	116	415	444	331	341
	121	415	444	331	341
	121	444	444	341	341
	121	444	444	341	352
	121	444	477	352	352
	121	461	477	352	363
Média	117	420,2	441,8	325,9	334,7
Desvio Padrão	4,59	27,68	21,76	23,76	22,00

Fonte: [autor]

Com os resultados mostrados na Tabela 6, onde estão distribuídas as condições de tratamentos, observa-se que a condição 3 foi a que alcançou o maior valor de dureza, já que antes dos tratamentos, ou seja, a condição 1, a peça tinha dureza média de 117 HB, após a têmpera e revenido a peça na condição 3 teve sua dureza superficial elevada e foi para 441,8 HB. Tendo a condição 2 alcançado uma dureza alta, ficando atrás apenas da condição 3.

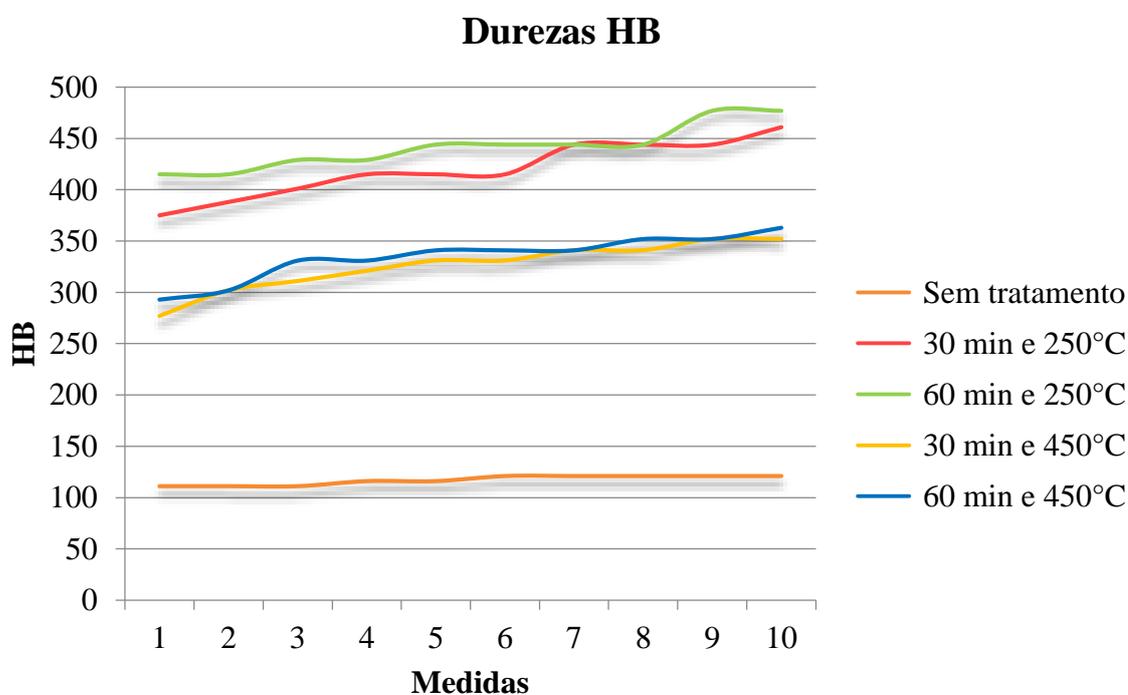
Segundo Chiaverini (2008), isso se explica devido essas amostras terem sofrido um tratamento de revenido com temperatura baixa e tempo reduzido, fazendo com que não ocorra nenhuma transformação microestrutural e apenas pouca perda de dureza. A diferença de durezas entre as condições 2 e 3 se dá pelos tempos de 30 e 60 minutos, respectivamente, de permanência na mesma temperatura, tendo assim as durezas de 420 HB e 441 HB.

A condição 5 apresenta valores de dureza na ordem de 334 HB, isso mostra que a microestrutura superficial resultante deste tratamento teve um refino de grão mais acentuado, tornando se mais dúctil que as condições 2 e 3.

A condição 4 apresentou o valor de dureza um pouco menor que da condição 5, que é da mesma temperatura, mas com tempo diferente, cerca de 325 HB; isso mostra que a microestrutura resultante da superfície deste tratamento é mais dúctil que as demais, menos resistentes para solicitações que exijam valores elevados de dureza na superfície.

Tratando de arranjos atômico de difusão de carbono, a condição 3 obteve o melhor resultados, tendo assim a maior dureza.

Gráfico 2: Comparativo geral entre as condições de tratamentos.



Fonte: [autor]

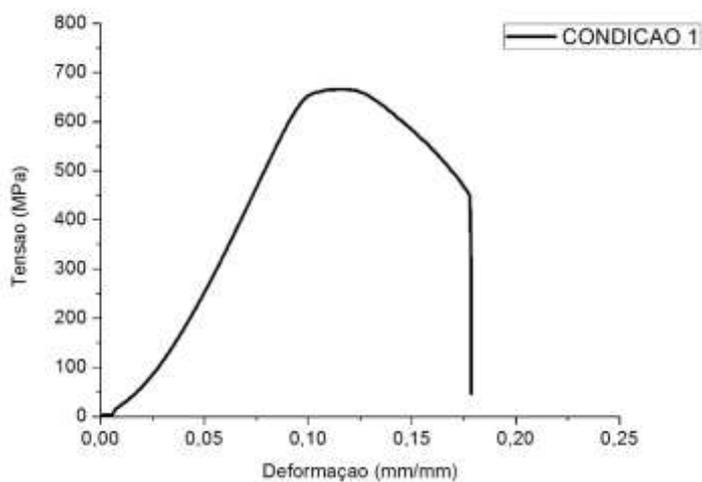
4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

No ensaio de tração, verificou-se que os desempenhos das amostras em todas as condições.

Logo após os ensaios, utilizaram-se os dados gerados para construir as curvas TENSÃO X DEFORMAÇÃO dos gráficos a seguir, e na construção da Tabela 7.

Na Figura 18 verifica-se uma tensão de escoamento de aproximadamente 655 MPa, com um limite de resistência em torno de 666 MPa, limite de ruptura em mais ou menos 454 MPa e um alongamento em média de 0,17 mm.

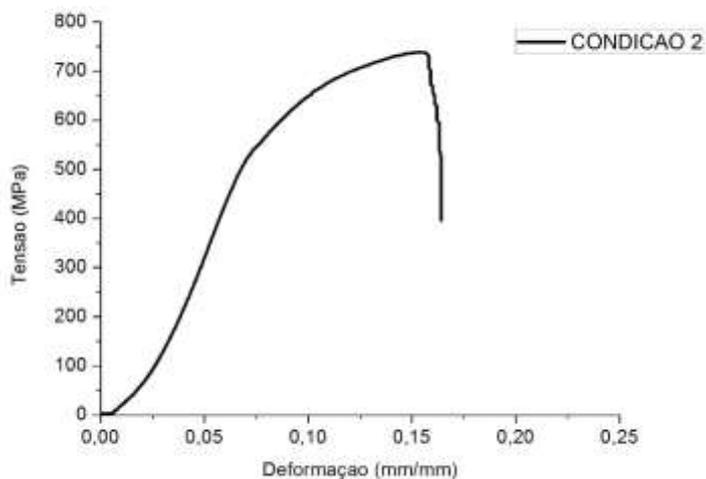
Figura 18: Resultado do ensaio de tração da condição 1.



Fonte: [autor]

Para o resultado do ensaio da condição 2, mostrado na Figura 19, a tensão de escoamento é da ordem de 520 MPa, o limite de resistência 738 MPa, um limite de ruptura de 473 MPa e um alongamento médio de 0,16 mm.

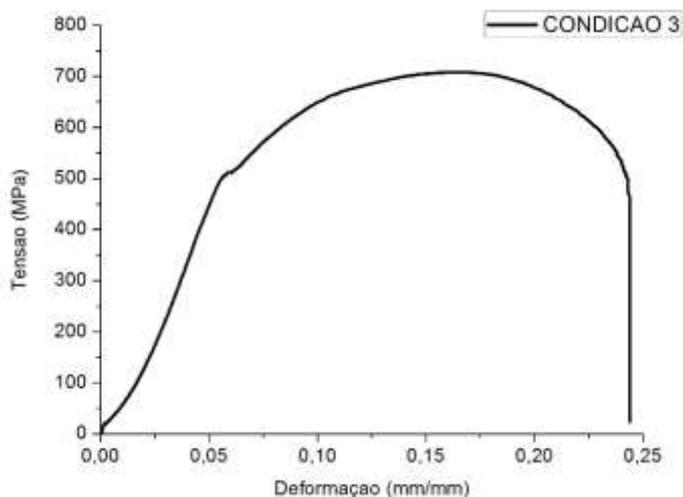
Figura 19: Resultado do ensaio de tração da condição 2.



Fonte: [autor].

Para o resultado do ensaio da condição 3, mostrado na Figura 20, a tensão de escoamento é da ordem de 510 MPa, o limite de resistência 708 MPa, um limite de ruptura de 464 MPa e um alongamento médio de 0,24 mm.

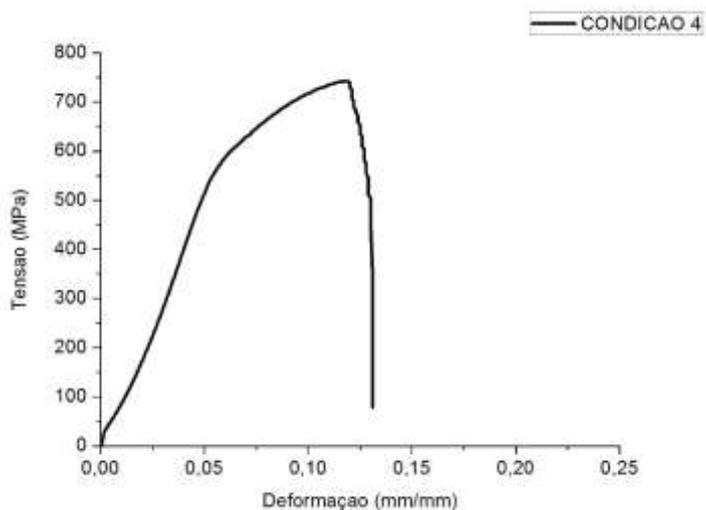
Figura 20: Resultado do ensaio de tração da condição 3.



Fonte: [autor].

Para o resultado do ensaio da condição 4, mostrado na Figura 21, a tensão de escoamento é da ordem de 590 MPa, o limite de resistência 743 MPa, um limite de ruptura de 461 MPa e um alongamento médio de 0,13 mm.

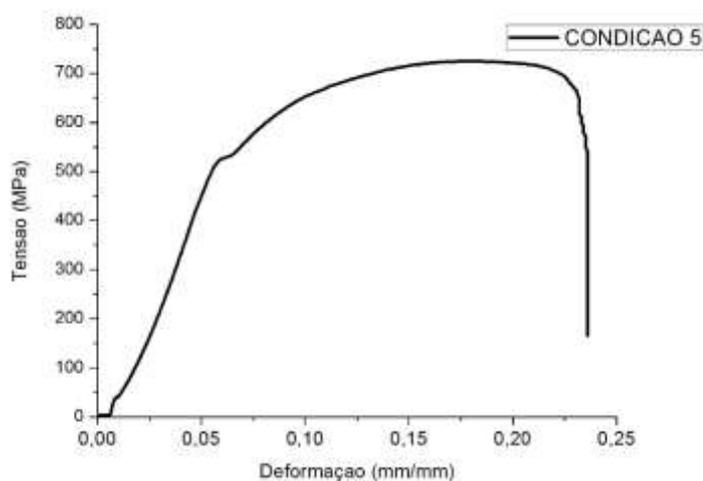
Figura 21: Resultado do ensaio de tração da condição 4.



Fonte: [autor].

Para o resultado do ensaio da condição 5, mostrado na Figura 22, a tensão de escoamento é da ordem de 530 MPa, o limite de resistência 725 MPa, um limite de ruptura de 536 MPa e um alongamento médio de 0,23 mm.

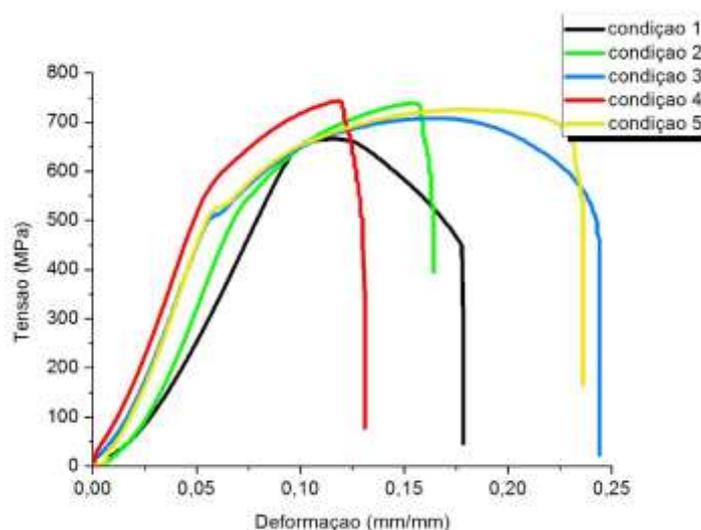
Figura 22: Resultado do ensaio de tração da condição 5.



Fonte: [autor].

Para uma melhor análise de comparação dos resultados obtidos no ensaio de tração a Figura 23 traz em um mesmo plano o comportamento das curvas no ensaio de tração de todas as condições.

Figura 23: Resultado do ensaio de tração de todas as condições.



Fonte: [autor].

Podemos observar que dentro da zona plástica a maioria das condições obteve o mesmo comportamento, com uma tensão de cerca de 650 MPa com uma deformação de mais ou menos 0,10 mm. Sendo verificado que apenas a condição 4 não teve esse comportamento. Tendo todas as condições comportamento tenaz.

Ao analisar a curva que teve a maior deformação, ou seja, a de maior tenacidade, verifica-se que a mesma tem uma maior dureza, como se comprova na Tabela 6, sendo a dureza e tenacidade grandezas inversamente proporcionais; isso se explica provavelmente devido a peça ter passado apenas por um tratamento superficial de aumento de dureza, o que ocorre com todas as condições.

Tabela 6: Média dos resultados das condições

Condição	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Alongamento (mm)
1	655	666	454	0,26
2	520	738	473	0,24
3	510	708	464	0,35
4	590	743	461	0,19
5	530	725	536	0,34

Fonte: [autor].

4.4.1 Análise de fratura

A região de ruptura dos corpos de provas de todas as condições é representada em macro nas figuras que seguem. Na Figura 24, tem a visão longitudinal das amostras rompidas, da esquerda para a direita, das condições.

Figura 24: Visão longitudinal do corpo de prova de cada condição.

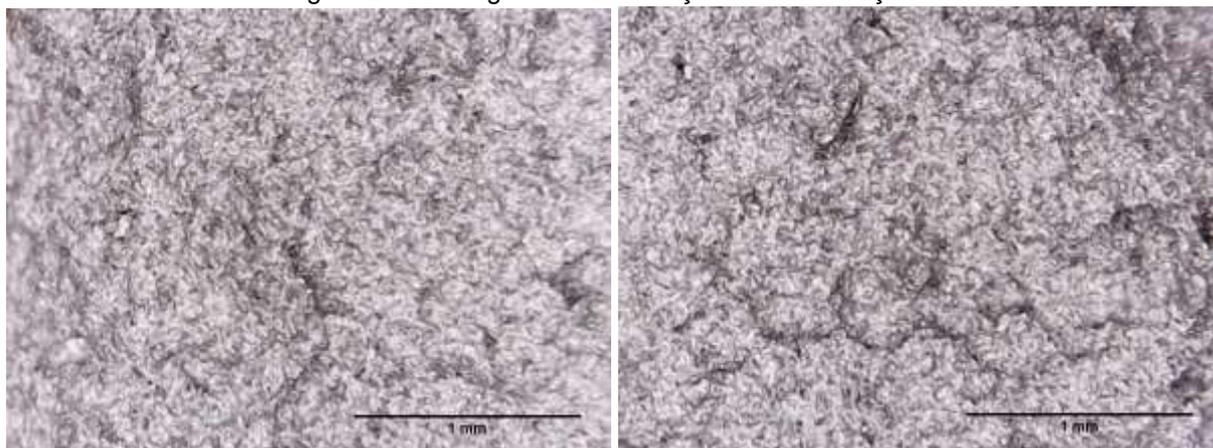


Fonte: [autor].

Observa-se pela Figura 24, o comportamento de cada condição com relação ao ensaio. Segundo Callister os materiais dúcteis formam um pescoço no ensaio de tração, tendo a condição 1 esse formato; na condição 2 verifica-se então uma fratura mais caracterizada como fratura frágil, pois de acordo com Callister a tensão de tração aplicada produz uma superfície de fratura relativamente plana. Nas demais condições tem-se uma fratura mais dúctil, pois as mesmas possuem um ângulo de aproximadamente 45° ao eixo de tração apesar, eles obtiveram apenas um aumento de dureza superficial.

Na condição 1 as rupturas possuem aparência de pequenas cavidades, obtendo alguns vales, típico das fraturas em materiais dúcteis [4] e sem tratamento. Como se pode observar na Figura 25.

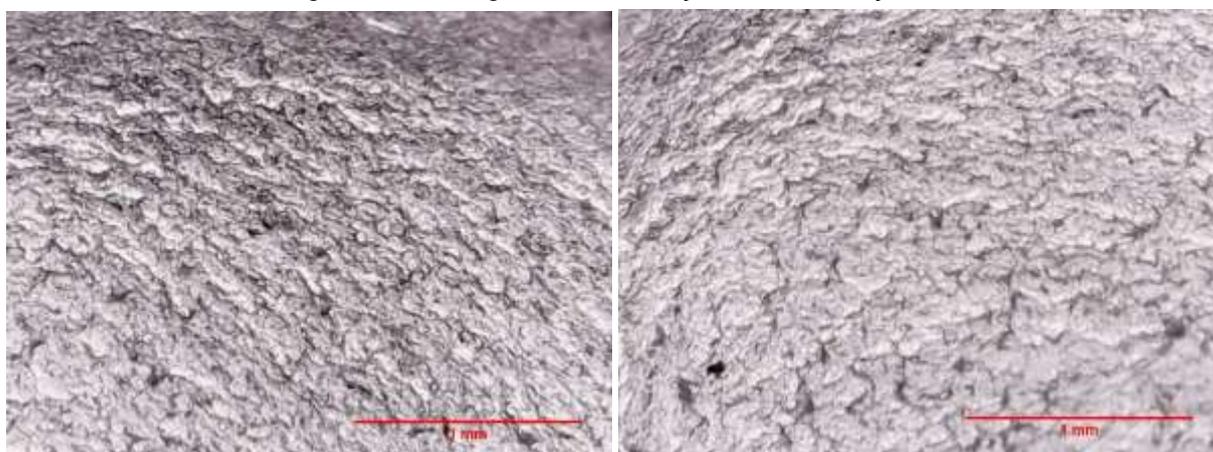
Figura 25: Macrografia ótica do Aço A36 na condição 1.



Fonte: [autor].

Pode-se observar, através das macrografias, o comportamento de fratura frágil apresentada pelo corpo de prova tracionado na condição 2. A ruptura se dá de forma brusca, lisa e plana. O corpo de prova 2 rompeu-se em uma região de trinca, provavelmente originada por tensões residuais do processo de fabricação do corpo de prova. Como mostra a Figura 26.

Figura 26: Macrografia ótica do Aço A36 na condição 2.



Fonte: [autor]

Na condição 3, mostrada na Figura 27, observa-se as cavidades no centro da peça, que segundo Callister é típico de materiais dúcteis, e ao mesmo tempo tem uma região com características de materiais frágeis, corroborando que houve sim a difusão de carbono na superfície da peça (cementação), como verificado pela análise química.

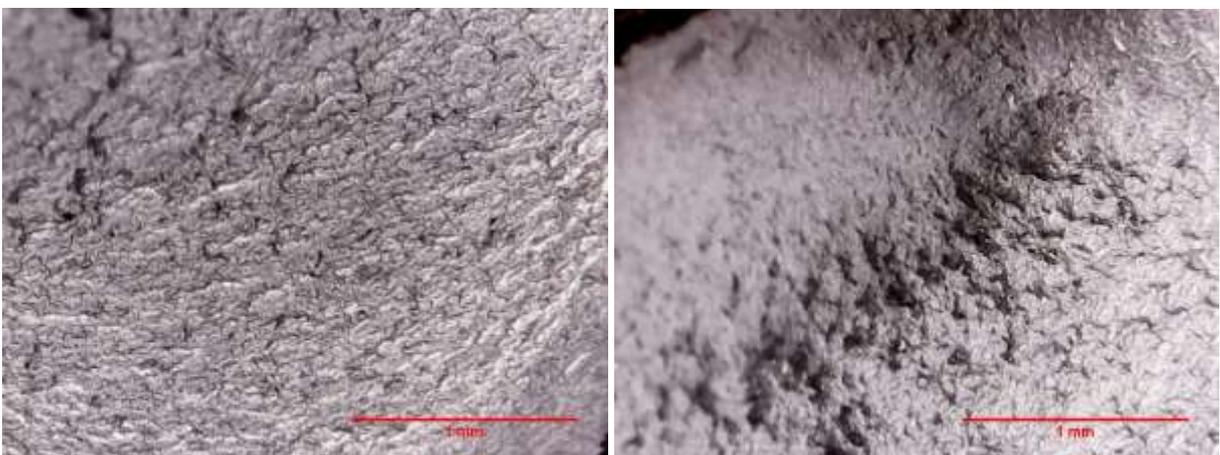
Figura 27: Macrografia ótica do Aço A36 na condição 3.



Fonte: [autor].

Na condição 4 as rupturas possuem aparência com microvazios típico das fraturas em materiais dúcteis conforme Callister, e ao mesmo tempo uma região com comportamento frágil mais próximo da superfície longitudinal da peça, tendo ali a difusão do carbono (cementação), como se verifica na Figura 28.

Figura 28: Macrografia ótica do Aço A36 na condição 4.



Fonte: [autor].

Na condição 5 podemos observa que tem os microvazios dos materiais dúcteis, também com um comportamento frágil mais próximo da superfície longitudinal da peça. Como está na Figura 29.

Figura 29: Macrografia ótica do Aço A36 na condição 5.



Fonte: [autor].

5 CONCLUSÕES

A partir da investigação das propriedades obtidas com os ensaios realizados poderão-se apresentar as seguintes considerações:

Verificou-se que o processo de cementação ocorreu dentro do esperado, obtendo assim um aumento da quantidade de carbono na superfície da peça.

Na análise microestrutural verificou-se a formação da martensita na superfície das peças, e com a diferença de temperatura houve um refinamento de grãos.

No ensaio de dureza, todas as condições que sofreram tratamento termoquímico e térmico obtiveram aumento da dureza superficial. Tendo a condição 3 o melhor resultado, devido ao revenido ter sido com temperatura mais baixa, não ocorrendo nenhuma mudança microestrutural.

Nas condições 4 e 5 o aumento de dureza foi menor, devido a temperatura de revenido ser maior, tendo assim uma mudança na microestrutura.

O ensaio de tração revelou que todas as condições têm um comportamento de materiais dúcteis, apesar das peças terem passado por um processo de cementação e tratamento térmico superficial. Obtendo valores superiores ao da condição sem tratamento.

REFERÊNCIAS

- [1] Rizzo, Ernandes Marcos da Silveira. Introdução aos processos siderúrgicos / Ernandes Marcos da Silveira Rizzo. São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.
- [2] CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos. 7. ed. São Paulo: ABM, 2008
- [3] PANDOLFO, D. Estudo da Tenacidade ao impacto de um aço SAE 1020 Submetido a Tratamentos Térmicos. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- [4] CALLISTER, William D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5ª. Edição /// Trad. Sérgio Murilo Stamile Soares, Rio de Janeiro, 2002.
- [5] Holpaert, Hubertus. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns; revisão técnica André Luiz V. da costa e silva. - 4ª Edição - São Paulo: Blucher, 2008.
- [6] CHIAVERINI, V. Tratamento Térmico das Ligas Metálicas. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2003.
- [7] Souza Neto, Erson Alves de. Estudo avaliativo da resistência ao impacto de um aço ASTM A131 submetido a tratamento termoquímico / Erson Alves de Souza Neto; orientador, Márcio Paulo de Araújo Mafra. — 2013.
- [8] Garcia, Amauri. Ensaios dos Materiais/ Amauri Garcia, Jaime alvares spim, Carlos alexandres dos santos. – 2ª Edição. Rio de janeiro: LTC, 2012.
- [9] Aços estruturais. Disponível em <http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/construcao-em-aco-acos-estruturais.php>. Acessado em 10 de dezembro de 2018.
- [10] Metalografia preparação de amostras. **Uma abordagem prática**. Disponível em <http://www.urisan.tche.br/~lemm/metalografia.pdf>. Acessado em 10 de dezembro de 2018.
- [11] Dalcin, Gabrieli Bortoli. Ensaios dos Materiais. Disponível em http://www.urisan.tche.br/~lemm/arquivos/ensaios_mecanicos.pdf. Acessado em 11 de dezembro de 2018.
- [12] AMERICAN society for metals. **Metals Handbook**. 9ª Edição. ASM, Metals Park, 1998.
- [13] Silva, André Luiz V. da Costa e. Aços e ligas especiais / André Luiz V. da Costa e Silva, Paulo Roberto Mei. – 3º ed, revista – São Paulo: editora Blucher, 2010.