

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Thiago Andrade Vieira

**Comparação das propriedades mecânicas de aços
temperados tradicionais e beneficiados por
caldeamento**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Marco Antonio Meggiolaro
Coorientador: Jaime Tupiassú Pinho de Castro

Rio de Janeiro
Julho de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai por ter feito eu querer entrar na engenharia e por tudo o que me ensinou durante sua vida, me tornando quem eu sou hoje, e a minha mãe por estar sempre comigo me guiando e incentivando para que eu melhore cada vez mais.

Agradeço ao meu Mestre por todos os conselhos dados durante minha vida, me ajudando a ter esta ideia e na produção do projeto de graduação.

Agradeço ao ferreiro Joeliton pela ajuda na criação das barras.

Agradeço ao Gerente técnico substituto do LEM pelo apoio e por estar disposto a me ajudar em qualquer momento nos ensaios dos laboratórios.

Agradeço ao meu orientador e ao meu coorientador pela ajuda e por me guiarem para que eu possa ter um melhor desempenho no desenvolvimento deste trabalho

Agradeço a todos os laboratórios da PUC–Rio por favorecerem equipamentos, máquinas e me ajudarem a produzir todos os ensaios e usinagens.

Agradeço à PUC–Rio e às agências CNPq, CAPES e FAPERJ pelo apoio concedido para o acréscimo neste trabalho.

RESUMO

Comparação das propriedades mecânicas de aços temperados tradicionais e beneficiados por caldeamento

O aço é uma liga metálica formada essencialmente por ferro como seu componente básico e acréscimos de carbono (pode variar de 0,008% até 2,11%), mas pode ser encontrado também níquel, volfrâmio, manganês, cromo, fósforo, enxofre entre outros elementos resultantes de seu processo de fabricação. Esta liga metálica se encontra muito presente em nosso cotidiano, pois são muito fáceis de se encontrar e de se produzir, sendo um dos produtos que contribuiu e ainda contribui para o desenvolvimento econômico e tecnológico da humanidade. Assim podemos ver que existem diversas formas de produção de aço para aderir a diversas utilidades, logo é relevante também pensar em um modo de como ou o que fazer quando descartar este material. Esta tese propõe a comparação das propriedades mecânicas do aço das lâminas de feixe de mola de um caminhão com o mesmo aço sendo dobrado através de caldeamento diversas vezes, como feito em um processo de fabricação do aço damasco, demonstrando que conseguimos obter um novo propósito para peças de veículos inutilizados em seu devido objetivo, como a criação de uma faca. Então foi retirado corpos de prova do aço antes e depois deste processo de caldeamento, ambos temperados, para demonstrar qualitativamente, através de ensaios no laboratório, a sua melhora. Ao fazer ensaios de dureza, tração, charpy, fadiga e metalografia foi concluído que o caldeamento do aço lhe dá uma melhora significativa, mas mesmo assim deve se pensar em meios de aumentar a tenacidade do aço, pois a têmpera o deixa muito duro e ao mesmo tempo muito frágil, sendo um meio aconselhado revenir após a têmpera. Para o processo de caldeamento do aço, é utilizado camadas alternadas de um aço mais dúctil no momento de fazer as dobras para torná-lo mais tenaz, sendo mais uma vantagem deste processo. Assim podemos confirmar que dá para se retirar a barra de um feixe de mola e reutilizá-la para fabricar uma faca em aço damasco, sendo este o aço caldeado, gerando uma nova utilidade para o aço inutilizado e novos lucros para a sociedade.

Palavras chaves: Aço. Aço damasco. Ensaio. Corpo de prova. Feixe de mola. Faca. Reutilizar. Corpo de prova comum. Corpo de prova caldeado.

ABSTRACT

Comparison of the mechanical properties of traditional hardened steels and benefited by cauldron

Steel is a metal alloy formed essentially of iron as its basic component and carbon additives (may range from 0.008% to 2.11%), but can also be found in nickel, tungsten, manganese, chromium, phosphorus, sulfur and among other elements. Resulting from its manufacturing process, this metal alloy is very present in our daily lives because it is very easy to find and produce, making it one of the products that contributed and continues to contribute to economic and technological development of humanity. Therefore, we can see that there are several ways of producing steel to adhere to various utilities, so it is also relevant to think of a way of how or what to do when disposing of this material. This thesis proposes to compare the mechanical properties of steel from spring blades of a truck with the same steel being bent several times as done in an apricot steel fabrication process, demonstrating that we have achieved a new purpose for unused vehicle parts and their intended purposes, such as creating a knife. Steel specimens were then removed before and after this tempering process, both tempered to qualitatively demonstrate through laboratory testing its improvements. By testing hardness, tensile, charpy impact test, fatigue and metallography. It was concluded that steel casting gives it a significant improvement, but still one must think of a way to increase the toughness of the steel as tempering makes it very hard and at the same time very fragile, being a wise way to temper after tempering. For the steel welding process, alternating layers of a more ductile steel are used at the time of bending to make it more tenacious, which is a further advantage of this process. Thus we can confirm that it is possible to remove the bar from a truck spring and reuse it to make an apricot steel knife, which is the welded steel, generating a new utility for unused steel and new profits for society

Keywords: Steel. Damascus steel. Test. Specimen. Truck Spring. Knife. Reuse. Common specimen. Caulked specimen.

SUMÁRIO

1 Introdução	4
1.1. Objetivo	4
2 Logística reversa	5
3 História da faca	8
3.1. Ferro e a criação do aço	9
3.2. Aço Damasco	10
4 Ensaios	20
4.1. Ensaio de Dureza	28
4.2. Ensaio de Tração Instrumentado?	30
4.3. Ensaio Charpy	42
4.4. Ensaio de Fadiga	48
4.5. Metalografia	60
5 CONCLUSÃO	65
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	69

Lista de figuras

1: Feixes de molas de caminhão dentro de uma caçamba em um ferro velho– imagem de MF Rural.	7
2: Imagem de facas feitas de pedra – Mega Curioso.	8
3: Imagem de uma lâmina de aço de espada feita com o padrão damasco - Christian Slaughter.	11
4:Diagrama Ferro-Carbono. Classificação em função da faixa de teor de carbono (primeira etapa) - Christian Slaughter.	12
5: Fabricação do aço de cadinho desde o minério de ferro. (primeira etapa) - Christian Slaughter.	13
6: Tratamentos térmicos do aço e fabricação da espada em Damasco. (segunda etapa) - Christian Slaughter.	14
7: Diagrama Fe-C mostrando o processo da segunda situação de fabricação- Christian Slaughter.	16
8: Ilustração de uma faca com seu dorso revestido para deixá-lo mais tenaz - www.medium.com/@joaomak .	18
9: Imagem de uma faca em aço damasco com desenhos específicos e controlados em formato de um mosaico - @joeliton_satiuq.	19
10 e 11:Imagens da barra com linhas de corte e medição de comprimento.	21
12 e 13: Medição da largura e corte pedaços da barra já cortados.	22
14 e 15: Soldagem das barrinhas e da haste para manuseio na forja.	22
16 e 17: Billet pronto e no forno para início do caldeamento.	23
18 e 19: Bórax jogado para selar as barrinhas e Billet na prensa hidráulica para efetuar o caldeamento.	23
20 e 21: Barras quase e já fundidas.	24
22 e 23: Esticamento da barra para efetuar um novo dobramento.	24
24 e 25: Barra uniformemente esticada e após dobrada e caldeada, sendo esticada novamente para o tamanho final.	25
26 e 27: Barra com o molde final das dimensões desejadas.	25
28: Recipiente e óleo utilizado para dar a têmpera.	26
29: Desenho esquemático dos corpos de prova inseridos na barra para serem usinados.	27
30: Imagem do laboratório de usinagem da PUC-Rio.	27
31: Máquina usada para fazer a usinagem a frio por eletroerosão.	27
32, 33 e 34: Imagens do ensaio de dureza Rockwell C.	29
35: Desenho do corpo de prova padrão para ensaio de tração, baseado na norma ASTM E8/E8M.	30
36, 37 e 38 :Máquina utilizada, o corpo de prova já preso com o extensômetro e um paquímetro.	31
39 e 40: Corpo de prova comum antes e após o ensaio.	32
41: Gráfico força x deslocamento do 1°CP comum.	32
42: Gráfico força x deslocamento do 2°CP comum.	33
43: Gráfico força x deslocamento do 3°CP comum.	33
44: Gráfico força x deslocamento médio.	34
45 e 46: Corpo de prova caldeado antes e após o ensaio.	34
47: Gráfico força x deslocamento do 1°CP caldeado.	35

48: Gráfico força x deslocamento do 2°CP caldeado.	36
49: Gráfico força x deslocamento do 3°CP caldeado.	36
50: Momento após rompimento total do terceiro corpo de prova.	37
51: Gráfico força x deslocamento médio.	37
52: Gráfico de Tensão x Deformação de Engenharia do CP comum.	39
53: Gráfico Tensão x Deformação Real do CP comum.	39
54: Gráfico de Tensão x Deformação de Engenharia do CP caldeado.	40
55: Gráfico Tensão x Deformação Real do CP caldeado.	40
56: Corpo de prova bi-apoiado.	43
57: Corpo de prova padrão de ensaio Charpy, feito no SolidWorks.	43
58: Energia absorvida no impacto em função da temperatura do material - CIMM, Temperatura de transição.	44
59 e 60: Imagem da máquina utilizada e do corpo de prova sendo inserido na posição correta através de um “pegador” específico para este ensaio.	45
61, 62 e 63: Resultado de um dos ensaios e o corpo de prova comum antes e depois do impacto, totalmente frágil.	46
64, 65 e 66: Resultado de um dos ensaios e o corpo de prova caldeado antes e depois do impacto, totalmente frágil.	47
67: Gráfico da/dN por ΔK – Fadiga Volume 2.	49
68: Gráfico das três fases da falha de um material por fadiga – Fadiga Volume 2.	50
69: Configurações de cargas para estudo de propagação da trinca.	51
70: Corpo de prova tipo C(T) padrão, feito no SolidWorks.	51
71: Corpos de prova sendo resfriados após o recozimento.	52
72 e 73: Fresadora após aplicação do furo e brocas utilizadas.	53
74, 75 e 76: Corpo de prova retirado do forno, temperado no óleo e após a têmpera.	53
77, 78 e 79: Corpo de prova antes, durante e depois do polimento já com o papel milimetrado.	54
80 e 81: Corpo de prova fixado na máquina instron 850I e sua senoidal de aplicação de carga mínima e máxima.	55
82: Corpo de prova no momento que se iniciou a trinca.	55
83: Corpo de prova comum rompido completamente.	56
84: Corpo de prova caldeado rompido completamente.	56
85: Microscópio usado para analisar o início da trinca.	58
86 e 87: Vista superior do corpo de prova comum, sem nenhuma microtrinca.	58
88 e 89: Vista frontal do corpo de prova comum.	58
90 e 91: Vista superior do corpo de prova caldeado, com microtrincas.	59
92 e 93: Vista frontal do corpo de prova caldeado, sem nenhuma microtrinca.	59
94: Vista superior dos dois corpos de prova.	60
95 e 96: Microscópio utilizado e corpos de prova polidos para análise.	61
97: Microestrutura do CP comum aumentada 100x.	62

98: Microestrutura do CP comum aumentada 200x.	62
99: Microestrutura do CP comum aumentada 500x.	62
100: Microestrutura do CP caldeado aumentada 100x.	63
101: Microestrutura do CP caldeado aumentada 200x.	63
102: Microestrutura do CP caldeado aumentada 500x.	64

Lista de tabelas

1: Resultados de durezas no ensaio Rockwell.	29
2: Comprimento inicial e final do primeiro corpo de prova comum.	32
3: Comprimento inicial e final do segundo corpo de prova comum.	33
4: Comprimento inicial e final do terceiro corpo de prova comum.	33
5: Comprimento inicial e final do primeiro corpo de prova caldeado.	35
6: Comprimento inicial e final do primeiro corpo de prova caldeado.	35
7: Comprimento inicial e final do primeiro corpo de prova caldeado.	36
8: Tensões e deformações reais e de engenharia máximas no escoamento e de ruptura do CP comum.	40
9: Tensões e deformações reais e de engenharia máximas no escoamento e de ruptura do CP caldeado.	41
10: Módulo de elasticidade real e de engenharia do CP comum.	41
11: Módulo de elasticidade real e de engenharia do CP caldeado.	41
12: resultado do ensaio Charpy do CP comum.	45
13: resultado do ensaio Charpy do CP caldeado.	46
14: Propagação de trinca e quantidade de ciclos do CP comum.	56
15: Propagação de trinca e quantidade de ciclos do CP caldeado.	56
16: valores de da/dN e ΔK e seus logaritmos do CP comum.	57
17: valores de da/dN , ΔK e seus logaritmos do CP caldeado.	57

1 Introdução

A produção de veículos na indústria automobilística cresceu 6,7% no Brasil em 2018, comparado com o ano anterior, segundo a Anfavea [1], onde foram produzidos no total 2,8 milhões de carros, caminhões e ônibus no ano, enquanto em 2017 foi de 2,6 milhões. Este ano, 2019, no mês de abril o crescimento foi de 0,5% com relação a 2018, fabricando 267.546 e no ano passado 266.140. Esses veículos depois de um tempo serão descartados em ferros velhos e muitos não terão meios de reforma para ser reutilizado, gerando um acúmulo enorme de sucatas. Algumas normas falam que 98,5% da frota de veículos no país se tornam sucatas de desmanche e vão para depósitos o que com o tempo se torna um grande acumulativo.

1.1. Objetivo

O principal objetivo do trabalho é demonstrar que podemos pegar uma lâmina de feixe de mola de um caminhão, por exemplo, e dobrá-la através de caldeamento diversas vezes como feito em um processo de fabricação de aço damasco, com o objetivo de melhorar qualitativamente o aço e ser utilizado para outro fim, como a criação de uma faca. Assim, demonstraremos que conseguiremos obter um novo propósito para as peças de veículos inutilizados para seu devido objetivo.

Para isso teremos que retirar corpos de prova do aço antes e depois do seu processo de caldeamento e através de um laboratório fazer estudos qualitativos para ver os benefícios deste processo.

Aços damasco possuem muita influência na área de cutelaria, então ao fazer este processo de caldeamento faz com o que o valor de uma faca aumente bastante e isto também é um meio a se pensar, que além de gerar um novo fim para as peças de veículos, gerará uma nova fonte de renda para o país.

2 Logística reversa

Com a criação da produção em larga escala de produtos padronizados em uma linha de montagem veicular de Henry Ford, onde surge o conceito de produção em massa (aumentando a velocidade e diminuindo o tempo de criação de um veículo), Ford conseguiu dominar o mercado com esta produção rápida a um custo viável. Isto aumentou e muito a escala de produção veicular e com isso a quantidade de veículos no mundo. Ele utilizava a seguinte filosofia: “O foco na gestão de produzir cada vez mais, criando uma forma de produção em massa dos automóveis e assim diminuindo o consumo, tempo e viabilizando seus custos e reduzindo a carga horária dos seus trabalhadores lhes pagando mais - Henry Ford”.

Estas empresas veiculares trabalham em um ambiente muito competitivo pois como existe muita oferta, possui muita demanda e conseqüentemente muitas fábricas automobilísticas no mundo, havendo 56 grupos dos maiores fabricantes do mundo e mais alguns menores, mostrando o quão grandioso é este meio. Até 2016 os EUA era o país com maior quantidade de carros do mundo, com aproximadamente 268 milhões, com crescimento de 17 milhões por ano (Brasil possuía 51 milhões de acordo com o IBGE [2]). Já em 2017 a China ultrapassou, com 300,3 milhões de veículos e mesmo assim ainda possuía muita gente sem carro o que mostra que seu aumento anual poderia ser muito maior. Tendo isto em mente e visto a quantidade de veículos que são feitos APENAS no Brasil, já conseguimos ter uma boa noção do que isto poderia causar caso não houvesse uma boa maneira de descartar as peças e automóveis inutilizados.

Inicialmente não existia uma preocupação sobre os resíduos deixados pelas fábricas de todo o mundo, mas após se tornar alarmante e um dos maiores vilões do meio ambiente houve uma necessidade de buscar meios e métodos para eliminar ou pelo menos não deixar que aumente esses “lixos automobilísticos” (diga-se lixo, pois para a fábrica não possuía mais utilidade logo era descartado). A Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA, entidade que reúne empresas fabricantes de automotivos [1]) diz que a grande quantidade de veículos utilizados no dia a dia causam muitos problemas na sociedade como: trânsitos/

congestionamentos intensivos, poluição sonora, defeitos mecânicos por terem alguns veículos antigos em circulação e produção de uma quantidade excessiva de poluentes na atmosfera, gerando graves problemas de saúde a sociedade.

A Logística reversa tem por objetivo dar um novo fim para os resíduos automobilísticos, como reutilizar e reciclar e ter um novo pensamento para diminuição de veículos em rotação (como compartilhamento de meios de transporte, taxi, uber, entre outras coisas), implementando, então, uma nova abordagem de um sistema mais sustentável. “A logística reversa é uma das áreas onde está contendo novas formas de trabalhos nos dias atuais, tornando-se um desenvolvimento econômico e social, com o objetivo de controle de fluxo de matérias, ações, procedimentos e métodos, viabilizando a restituição dos resíduos sólidos do setor empresarial e público tendo seus insumos desde o ponto de origem até o local de consumo, e deposição em local seguro, transformando em um ciclo de reaproveitamento para os mesmos produtores e se tornando um meio de lucro financeiro, além de propor melhoras ao meio ambiente. – Logística Reversa de peças e sucatas automotiva no Brasil”.

Assim surgiu a ideia de dar um novo fim para os feixes de mola utilizados em caminhão e que já estão em ferros velhos (vide figura1) para formar facas boas e melhores ainda quando caldeadas e transformadas em um aço damasco.

Através de sites de uma série de videos na internet podemos ver que já existem pessoas que utilizam os feixes de mola para este fim, logo confirma que é uma ideia boa para ser tomada.



Fig.1: Feixes de molas de caminhão dentro de uma caçamba em um ferro velho – imagem de MF Rural.

3 História da faca

A primeira ferramenta a ser construída na pré-história de nossa civilização surgiu na necessidade dos nossos ancestrais de terem um instrumento para além de caçar, poder cortar e fatiar um alimento. Assim, passaram a existir as primeiras facas feitas de pedras (figura 2), sendo construídas utilizando outras pedras mais duras para tentar lascar e produzir uma borda afiada. Depois começou a ser utilizado bronze ou ferro, desenvolvidas pelos celtas.



Fig.2: Imagem de facas feitas de pedra – Mega Curioso.

Facas de metal (inicialmente fabricadas em cobre e após em bronze) foram primeiramente feitas entre 3000 e 700 anos a.C. superando a faca de pedra por causa de seu formato mais fino e afiado. Mais adiante houve o descobrimento de que o aço permitiria uma lâmina ainda mais afiada, além de possuir maior dureza e resistência, se tornando o metal preferido pelos fabricantes de faca no séc XVI.

Antigamente o valor de uma faca era tão alto que seus proprietários eram enterrados com elas. Eram ricamente decoradas, moldadas e coloridas visando valorizar seu precioso artefato, mas no século XVIII surgiram as facas fabricadas em série e isto desvalorizou esta grandiosa valorização que a faca possuía.

3.1. Ferro e a criação do aço

A passagem da Idade do Bronze para a Idade do Ferro foi de uma maneira bastante lenta, já que não representava uma melhoria incontestável com relação ao bronze, e durante séculos os utensílios de bronze e ferro foram utilizados concomitantemente. O início da Idade do Ferro é difícil de se dizer já que o ferro se oxida fácil, mas sabe-se de minas de minério de ferro existentes a cerca de 33.000 a.C., onde o volume retirado era incompatível com o utilizado, assim deixa um indício de possibilidade de uso para criação de ferro. O ferro forjado era produzido a partir do ferro esponja (redução do minério de ferro no estado sólido) e colocado em contato com alguma fonte de carbono, como carvão vegetal, em fornos de altas temperaturas. No tempo mantido no forno o carbono fundido no ferro aumentava sua resistência, se transformando em aço.

O bronze só foi superado quando houve o descobrimento da têmpera e do revenimento, por volta de 900 a.C. Estas técnicas transformaram o ferro fundido de uma dureza semelhante ao bronze a uma nova dureza duas vezes maior, permitindo a produção de objetos como espadas e facas de alta resistência.

O ferro possui três principais fontes: meteoritos, ferro nativo ou na forma de óxidos (magnetita – Fe_3O_4 , hematita – Fe_2O_3 e limonita – óxidos de ferro hidratado), podendo aparecer também em carbonatos e sulfetos. Seus primeiros registros de produção por redução do minério é de 2500 a 2000 a.C. e eram fabricados a partir de uma série de etapas: primeiramente seu minério de ferro era escolhido, lavado e moído, depois era levado a um forno feito de argila em um buraco no chão, preenchido de carvão e minério, e fechado com argila, com alguns buracos para passagem de oxigênio. O produto formado era uma massa de ferro descontínua chamada de ferro esponja, sendo a matéria prima para a fabricação de utensílios. Caso a temperatura fosse bastante alta, suficiente para o ferro sofrer fundição e esse permanecesse por bastante tempo em conjunto com o carvão, parte do carvão poderia se fundir ao ferro por difusão da superfície para seu interior, transformando-o em um novo material: o aço. Assim o carbono promoveu um excelente aumento na

dureza do ferro, sendo relevante para produção de ferramentas de corte (como facas), ainda que esta difusão tenha sido apenas superficial.

Ao descobrir a têmpera (resfriamento brusco deste material carburado, aço, a alta temperatura) conseguiram construir um material extremamente duro, mas consequentemente frágil e isto o tornava quebradiço. Então foi descoberto que esta fragilidade poderia ser reduzida quando reaquecesse a peça a temperaturas baixas durante um tempo (processo chamado de revenimento). Se tornando, assim, a principal matéria prima a ser utilizada, tendo seu uso até hoje.

3.2.Aço Damasco

Não se sabe ao certo a data exata do surgimento do aço damasco e até hoje há discussões a respeito disso, mas seus indicativos é de que surgiu na época de Alexandre o grande, em 320 a.C., mesmo que as evidências arqueológicas mais antigas sejam dos primeiros séculos da era cristã (encontrados pedaços deste aço em uma cidade onde hoje é o Paquistão).

O nome dado a este processo de caldeamento do aço, chamado “aço damasco”, baseado na maioria dos trabalhos relacionados a isto, veio da primeira vez a ser vista pelos europeus e não ao lugar de origem. A cidade de Damasco, capital da Síria, era um grande centro comercial da Idade Média, principalmente de espadas.

O conhecimento sobre o ferro, existente naquela época, era de que se adicionasse muito carbono ele ficaria muito duro e consequentemente frágil, por outro lado, se adicionasse pouco carbono o deixaria mais mole, ou seja, dúctil. Então houve este pensamento de juntá-los para criar um meio termo, surgindo o aço damasco que compõe as duas melhores características, alta dureza em conjunto com boa tenacidade. Essa junção é feita hoje em dia com camadas alternadas dos aços de alto e baixo carbono, sendo facilmente reconhecido devido aos seus padrões ondulados com duas cores visíveis na sua superfície, mostrando macroscopicamente sua estrutura microscópica interna, se tornando um aço muito

especial na história da metalurgia (figura 3). No início dizem que este aço surgiu por não haver mais a quantidade necessária do aço de boa qualidade para ser utilizado, então para que tivesse alguma fabricação tiveram que juntar todas as sobras de aços existentes para formar um útil e isto mostrou que daria para fazer este tipo de junção.



Fig.3: Imagem de uma lâmina de aço de espada feita com o padrão damasco
- Christian Slaughter.

A fabricação de um aço damasco pode ser feita de diversas formas, não havendo uma especificação própria. Possui duas etapas: a primeira que é a da criação do aço, onde vem desde a obtenção do ferro até o aço em si com um teor de carbono entre 1,0 e 2,1%; a segunda é a de seus tratamentos térmicos para dar o molde e propriedades finais do damasco.

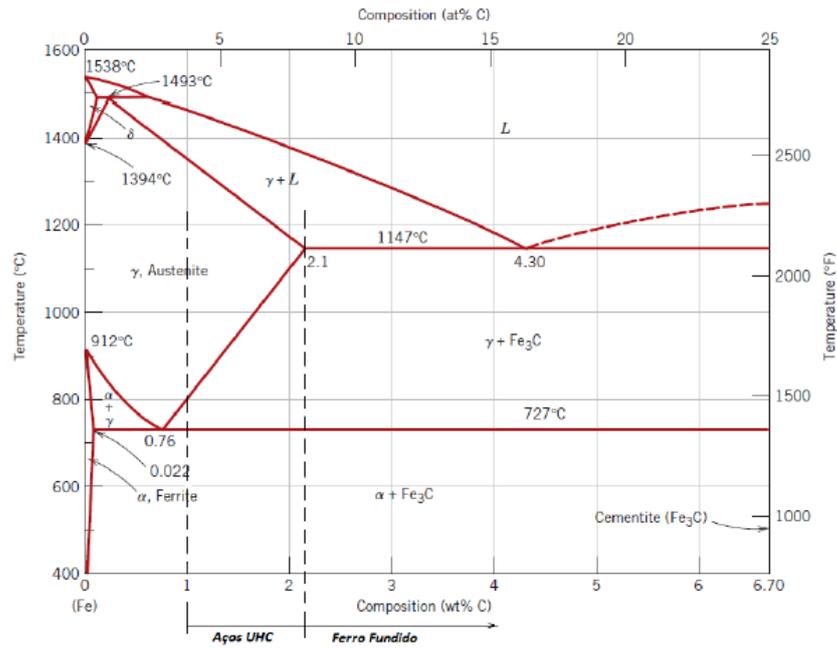


Fig.4:Diagrama Ferro-Carbono. Classificação em função da faixa de teor de carbono (primeira etapa) - Christian Slaughter.

Estas duas etapas antigamente poderiam ser resumidas das seguintes maneiras (figuras 5 e 6).:

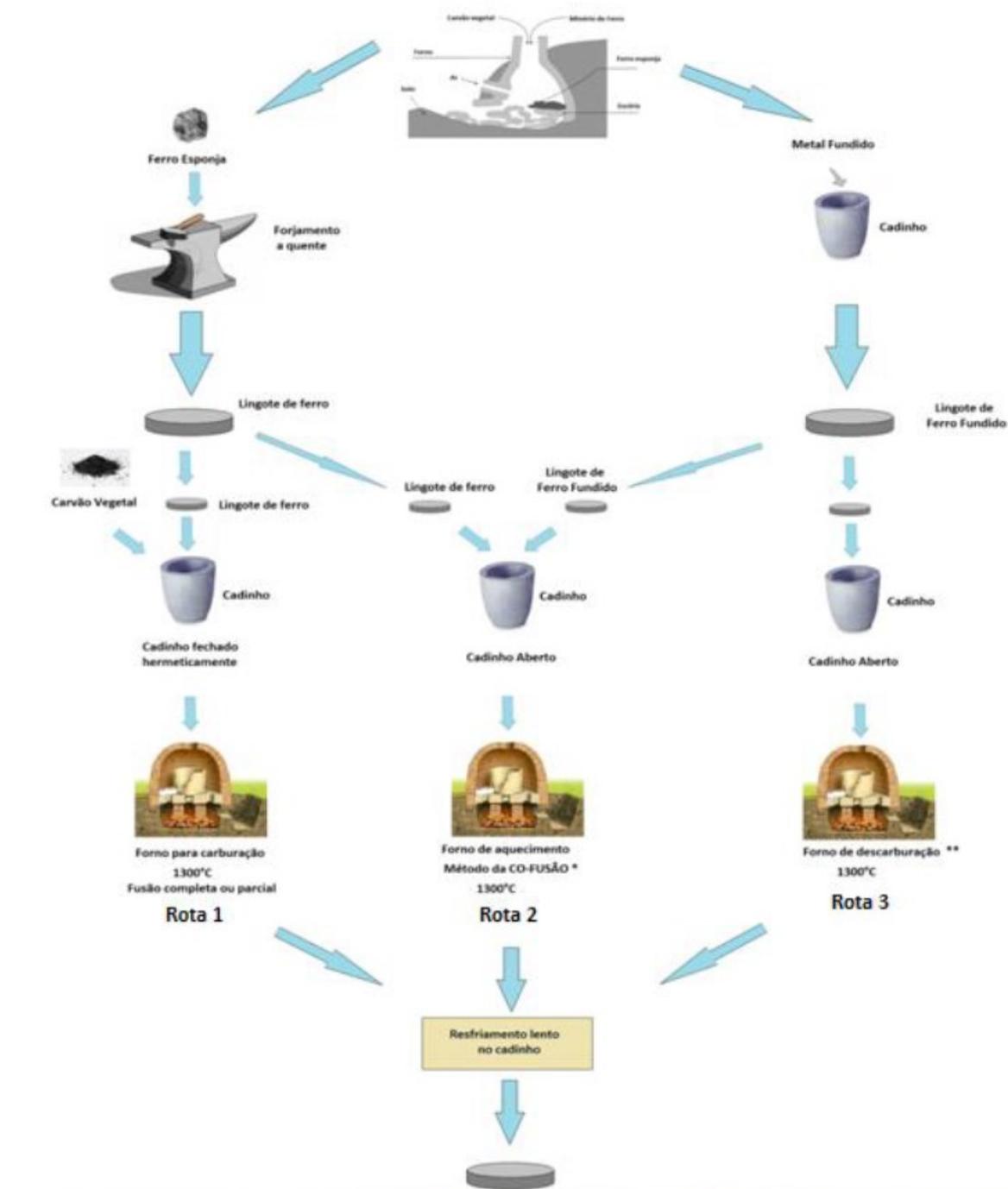


Fig.5: Fabricação do aço de cadinho desde o minério de ferro. (primeira etapa)
 - Christian Slaughter.

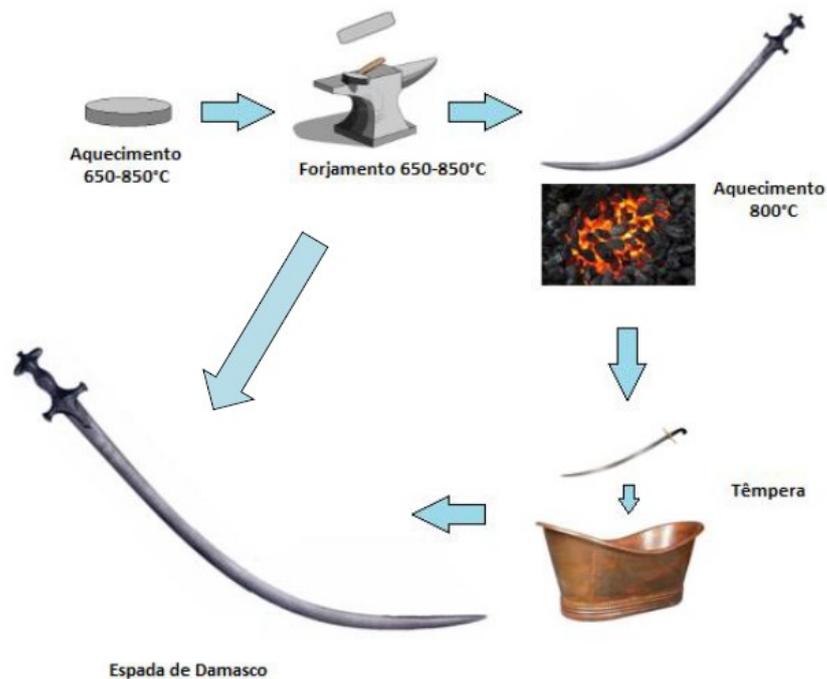


Fig.6: Tratamentos térmicos do aço e fabricação da espada em Damasco. (segunda etapa)
- Christian Slaughter.

O surgimento de espadas deixou as facas em segundo plano, por serem armas de curto alcance nos combates, mas nunca deixaram de existir ou de serem utilizadas e sua fabricação era da mesma forma já que também poderia ser utilizada com o mesmo objetivo além de poder cortar o alimento e ser uma ferramenta do dia a dia.

Para demonstrar a primeira etapa, baseado na dissertação de mestrado de Christian Slaughter - Espada de damasco. Um produto da civilização Islâmica existiam 3 diferentes rotas de fabricação do aço para fazer a espada damasco, as quais serão ditas a seguir:

Rota1:

Fabricação do aço de cadinho a partir do minério de ferro, onde era inicialmente selecionado, moído e lavado. Este procedimento retirava grande parte das impurezas associadas ao minério. Ao estar devidamente seco era inserido em cadinhos junto com carvão vegetal e certas plantas consideradas sagradas (os cadinhos possuíam pequenos tamanhos por causa da limitação de temperatura existente em fornos da época). Após, este era fechado

hermeticamente com argila e colocado para ser aquecido em temperaturas entre 1000°C e 1200°C. Assim depois de 1 ou 2 dias mantidos na temperatura dita anteriormente levavam o cadinho ao resfriamento lento. A temperatura era essencial para a fabricação do material, então baseado nisso poderiam ocorrer duas situações:

1. Se não conseguisse alcançar a uma alta temperatura, iria ocorrer uma fusão parcial do ferro com o carbono. O carbono, derivado do carvão/madeira e das folhas, se insere a partir das camadas superficiais do ferro esponja, carburando a massa de ferro. Com temperatura maior que 1148°C parte do ferro carburado fundiria formando ferro fundido líquido nas superfícies e este se equilibra com a austenita saturada em carbono e com consequência o carbono dissolvido na austenita diminui as camadas mais externas às mais internas, fazendo com o que o interior do material ainda possa se manter como ferro praticamente puro
2. Se conseguisse alcançar a temperatura alta suficiente iria fundir todo o material, obtendo uma liga líquida de alto teor de carbono (2% aprox.). Para termos uma idéia vamos considerar uma liga de 1,8% de carbono a 1400°C, estando no estado líquido e sua temperatura diminuindo lentamente. Ao chegar em 1380°C parte deste material começará a se solidificar em forma de austenita e isto continuará até se solidificar totalmente em 1190°C e sua forma continuará austenitizada até a temperatura de 1065°C. Depois disso ocorrerá a precipitação de cementita pró-eutetóide nos contornos dos grandes grãos austeníticos (isto se deve ao fato do empobrecimento em carbono da austenita). Assim, quase todos os grãos austeníticos irão ter uma composição uniforme de 0,76% de carbono envoltos por uma rede de cementita pró-eutetóide (devido ao resfriamento lento). Por fim, ao chegar em uma temperatura inferior a 727°C toda a austenita se transformará em perlita. O processo pode ser analisado na figura 7 abaixo.

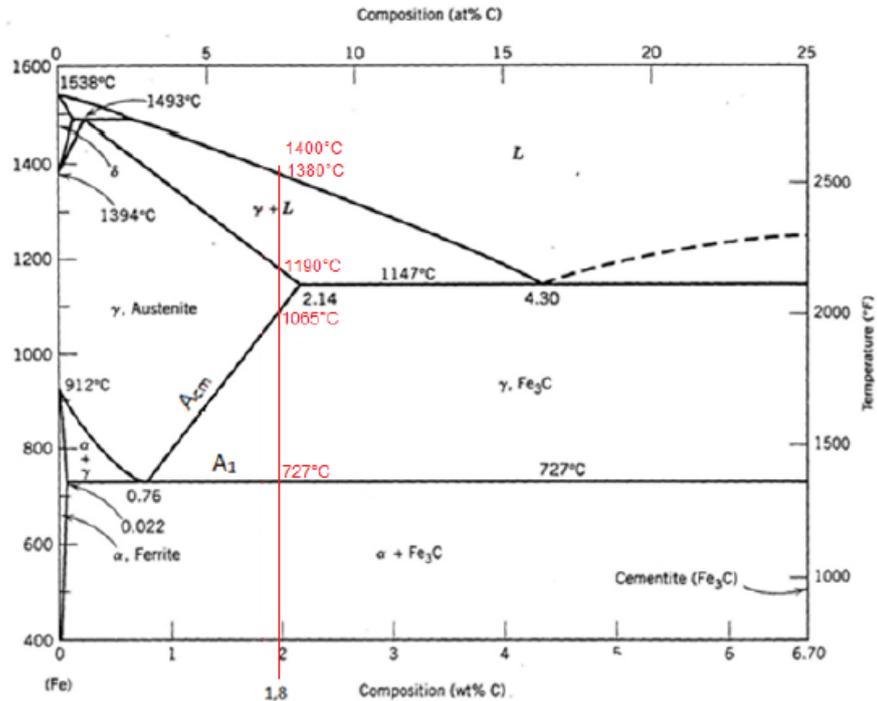


Fig.7: Diagrama Fe-C mostrando o processo da segunda situação de fabricação.
- Christian Slaughter.

Rota2:

A fabricação por meio deste método era feita a partir da junção de pedaços de ferro esponja e ferro fundido em um cadinho cerâmico, colocado no forno a temperaturas entre 1200°C e 1400°C.

Digamos que o aço, ferro fundido, possuía 4% de carbono e o ferro esponja 0%. Ao ultrapassar 1200°C o aço passará inteiramente para o estado líquido ficando só o ferro puro no estado sólido, e quando manter na temperatura de 1350°C o carbono do aço no estado líquido começará a ser introduzido na superfície do ferro puro e quando esse atingir 1% de carbono irá se fundir e incorporar ao líquido até que todo o ferro sólido também se torne líquido e assim o cadinho é deixado para ser resfriado lentamente.

Caso a temperatura fosse maior que o patamar eutético mas não o suficiente para fundir todo o material poderia ocorrer o seguinte caso:

Colocado no cadinho 60% de ferro esponja e 40% de aço (ferro fundido com 4% de carbono) a uma temperatura de 1250°C. Como dito anteriormente o aço irá se tornar líquido e o carbono começará a se inserir no ferro puro sólido até atingir 1,5% de carbono e este, por sua vez, se fundirá e

incorporará ao ferro fundido líquido. Isto ocorre até que o banho fique com 3,5% de carbono. O carbono da superfície do sólido se inseria para o interior por causa do disponível no líquido, que por sua vez ia para superfície até atingir 1,5% novamente e isto ocorria até que o líquido inteiro acabe, dando um material homogêneo de aço com composição variada de 0% a 1,5% de carbono, do centro para a superfície.

Rota3:

O aço, ferro fundido com 4% de carbono, é inserido no cadinho e colocado no forno a uma temperatura superior a 1200°C para se fundir por inteiro. Então começa a haver a descarburização através da oxidação superficial da liga, onde o oxigênio reage com o carbono líquido se transformando em CO₂. Enquanto o carbono da liga é queimado o material vai tendendo a se solidificar com consequência do aumento do ponto de fusão, isto ocorre até todo o material se solidificar e em seguida é resfriado lentamente manter homogêneo.

Este processo também poderia ser feito no estado sólido onde o aço era inserido a uma temperatura de 1000°C aproximadamente e mantido por um longo tempo. Isto deixaria o aço abaixo do seu ponto de fusão, fazendo com o que ele não se funda. Com o tempo deve-se retirar regularmente cascas de óxido que irão surgir no material devido a sua reação com o oxigênio, para manter este contato do oxigênio em sua superfície.

A segunda etapa é a etapa onde corre o forjamento e os tratamentos térmicos, para criar o molde e produção do enfim aço damasco a ser utilizado. O forjamento tem por objetivo quebrar toda a rede contínua do carboneto, visando diminuir a fragilidade do aço, já que este possuía alto teor de carbono, uma rede de cementita pró-eutetóide em volta dos grãos austeníticos. Mas sua temperatura para realização deste processo deveria ser entre 650°C e 850°C, não podendo ser realizado diferente disto, tornando o processo extremamente complexo e delicado, já que antigamente o único meio de saber se estava na temperatura correta era pela

cor do aço, havendo uma grande necessidade de conhecimento, experiência e destreza por parte do ferreiro. Com temperaturas baixas o material poderia quebrar por consequência da fragilidade da rede de cementita, já com temperaturas altas o aço poderia se fundir nos contornos de grãos por causa dos carbonetos presentes na região e mudar suas propriedades, tendo também como decorrência sua ruptura. Na temperatura estipulada a rede de cementita do lingote é fragmentada em pequenas partículas globulares ao longo da matriz.

Durante este processo de forjamento era feito também o formato da lâmina a ser utilizado e por fim fazia a têmpera, ou seja, resfriar bruscamente, podendo ser em água, óleo ou ar, dando estruturas variadas entre martensita, perlita e bainita. Um meio de têmpera utilizado era cobrir apenas o dorso da lâmina com barro temperar deste modo, assim teria um fio extremamente duro para perfurar e cortar com mais facilidade e o dorso mais tenaz para dificultar sua ruptura (figura 8).



Fig.8: Ilustração de uma faca com seu dorso revestido para deixá-lo mais tenaz

- www.medium.com/@joamak.

Hoje em dia o processo de fabricação e construção do aço damasco continua deste modo (obtendo o ferro esponja, fabricando o aço, forjando e temperando) mas com a evolução da tecnologia os meios para construir se tornaram muito mais fáceis e controláveis, além de possuir muito mais opções de escolhas de materiais já prontos e em formatos de barra (ferros fundidos não só com carbono, mas também com níquel, silício, entre outros) para a fabricação do aço damasco, podendo deixá-lo com a especificidade que quiser, além de poder fazer camadas e desenhos da maneira que quiser, o que antes não tinha muito este controle (figura 9).



Fig.9: Imagem de uma faca em aço damasco com desenhos específicos e controlados em formato de um mosaico - @joeliton_satiuq.

4 Ensaaios

Ensaio nada mais é do que um processo de análise laboratorial para definir qualitativamente um material escolhido, dando a ele especificações e a partir disto buscando conclusões sobre os dados gerados. Os ensaios mecânicos buscam obter um conhecimento sobre todas as propriedades de um material ou produto, tendo diferentes tipos como tração, charpy, fadiga, metalografia, dureza, compressão, entre outros. Podem ser feitos no início de um procedimento, para se precaver futuros acidentes e/ou garantir que seu material está em perfeita condição de ser utilizado, ou após algum acontecimento, para entender o porquê do ocorrido, ou simplesmente comparar com outros materiais e fazer análises de estudo.

Para o trabalho de conclusão de curso os Ensaaios de laboratório foram utilizados para quantificar a comparação de dois materiais de mesma composição, vinda de fábrica, mas com ações de forjamento diferenciadas. Duas barras de aço 5160, mesma usada em feixes de molas de caminhão (o objetivo seria reutilizar as barras de feixes de molas que estão em ferros velhos e caldeá-las no forjamento mas para que os cálculos e os ensaios sejam o mais corretos possíveis na comparação foi preferido usar novas, para garantir que a barra comum, que não sofre caldeamento, não possa existir defeitos por ações do ambiente, de desgaste ou trincas internas em seu uso), mas um deles sendo dobrado diversas vezes através do caldeamento com o objetivo de transformar em um aço damasco (não foi utilizado mais de um material em sua composição para não haver diferenças nos ensaios, já que ao cortar os corpos de prova poderia retirar mais um tipo de aço do que outro, dando assim resultados muito diferentes). Após o forjamento, essa e a barra não dobrada foram temperadas da mesma forma. Esta ação tem como objetivo de mostrar que a partir de duas barras de aço de feixes de mola de caminhão dá para se forjar duas facas, uma feita normalmente e outra em um tipo de aço damasco, e assim mostrar a eficiência que o aço damasco possui sobre o aço comum, além de comprovar a possibilidade de utilizar barras de feixes de mola para um novo objetivo. Não foram feitas as facas pois para fazer uma boa comparação entre os aços é necessário corpos de provas padrão e o molde e o fio

da faca impediriam e dificultariam muito os ensaios, por isso foi mantido o formato de barra.

A seguir podemos ver um pouco de como foi o processo de forjamento para transformar a barra de aço em aço damasco. Foi pegado lâmina do feixe de mola deixado em formato de barra, limpa (figura 10) e marcada partes iguais de altura e largura (figuras 11 e 12) para a seguir cortá-las (figura 13) e fazer as dobras do caldeamento. As barras já cortadas são soldadas uma em cima da outra (figura 14) e juntamente é soldado uma haste para fazer o manuseio na forja (figura 15), criando a barra inicial (chamada Billet) (figura 16). Com a barra inicial pronta essa é inserida no forno para efetuar o processo de caldeamento (figura 17). Ao retirar do forno é colocado o Bórax (Tetraborato de sódio) em todo o Billet, que serve para selar (soldar) as barrinhas uma nas outras e não criar “crepa” por dentro (nome dado ao óxido de ferro que impede o caldeamento) (figura 18) e assim usando uma prensa hidráulica as barrinhas são prensadas até que se soldem uma nas outras (figura 19). Este processo é feito diversas vezes pois ao retirar do forno a barra começa a esfriar, tendo pouco tempo na temperatura desejada para efetuar o forjamento, sendo as figuras 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 e 27 as diversas etapas para construção da parra homogênea com tamanho e formatos desejados. Figura 28 mostra o recipiente e o óleo utilizado para efetuar a têmpera após o caldeamento.



Fig.10 e 11: Imagens da barra com linhas de corte e medição de comprimento.



Fig.12 e 13: Medição da largura e corte pedaços da barra já cortados.



Fig.14 e 15: Soldagem das barrinhas e da haste para manuseio na forja.



Fig. 16 e 17: Billet pronto e no forno para início do caldeamento.



Fig.18 e 19: Bórax jogado para selar as barrinhas e Billet na prensa hidráulica para efetuar o caldeamento.



Fig.20 e 21: Barras quase e já fundidas.



Fig. 22 e 23: Esticamento da barra para efetuar um novo dobramento.



Fig. 24 e 25: Barra uniformemente esticada e após dobrada e caldeada, sendo esticada novamente para o tamanho final.



Fig.26 e 27: Barra com o molde final das dimensões desejadas.



Fig.28: Recipiente e óleo utilizado para dar a têmpera.

Para termos uma boa comparação qualitativa destes dois materiais foi utilizado os seguintes ensaios mecânicos: Dureza, Tração, Charpy, Fadiga e Metalografia. Cada ensaio possui uma especificidade logo não podem ser usados os mesmos corpos de prova. Baseando-se na norma ASTM [3] foi definida as dimensões de todos os corpos de prova e a partir disto foi observado a quantidade que poderia ser obtida nas barras. Definido tudo as barras foram levadas para o laboratório de usinagem da PUC-Rio (figura 30) para ser retirado todos os corpos de prova com suas especificações (figuras 29 e 31) e assim poder fazer os ensaios no laboratório. Para conseguir diferenciar as duas barras foi definido a não caldeada como “barra, ou corpo de prova, comum” e a caldeada como “barra, ou corpo de prova, caldeada(o)”.

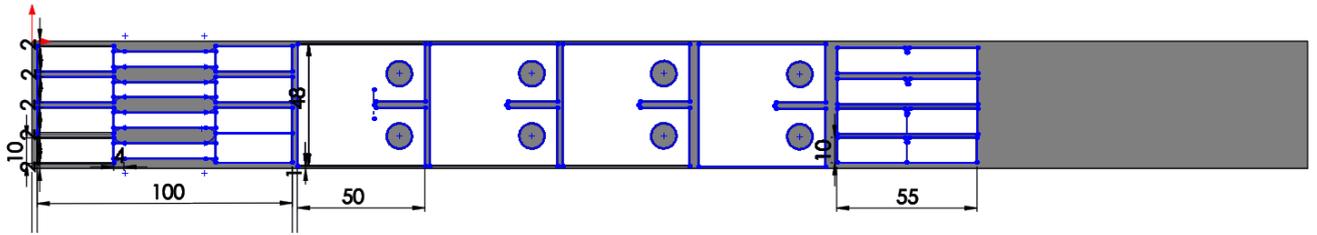


Fig.29: Desenho esquemático dos corpos de prova inseridos na barra para serem usinados.



Fig.30: Imagem do laboratório de usinagem da PUC-Rio.



Fig.31: Máquina usada para fazer a usinagem a frio por eletroerosão.

4.1. Ensaio de Dureza

Este ensaio foi o primeiro a ser utilizado para podermos ter uma noção do quão duro estão as barras para assim definir quais serão os outros tipos de ensaios mais necessários.

A primeira escala de medição de dureza foi feita pela geologia, mineração, onde viam uma relação de riscos entre um material e outro. Então fizeram uma escala entre 10 minerais definindo quem conseguiria riscar quem, os de maior dureza riscavam mais e não eram riscados, criando então a escala Mohs que definia de forma ascendente os materiais conforme sua dureza, indo do talco (nº 1) até o diamante (nº 10).

Este método de ver a dureza para nós, na mecânica, é muito ruim pois as diferenças dos materiais são muito grandes e nós utilizamos materiais metálicos com poucas diferenças e todos os materiais metálicos estão praticamente no mesmo “degrau” da escala Mohs, então tivemos que definir outro meio de medição de dureza surgindo então o método de resistência a penetração.

O primeiro método a ser criado é o Brinell onde ele pegou um penetrador de forma conhecida (esfera) e uma carga conhecida e aplicou apertando sobre uma peça, depois retirou e observou o tamanho da impressão, definindo sua dureza (na época foi muito utilizada na indústria naval e de trem). Foi feito para pegar uma área grande do material, sendo muito utilizado em materiais não muito homogêneos como ferros fundidos, tendo uma esfera de uns 10mm e uma carga de 3ton, sendo a maior vantagem e ao mesmo tempo o maior problema, pois não consegue medir peças pequenas, tanto por causa do penetrador, quanto da carga.

Uma evolução da medição de dureza Brinell foi a dureza Vickers, onde seu método é similar, mas ao invés de utilizar uma esfera de aço como penetrador é usada uma pirâmide de diamante, pois o aço pode deformar tanto a peça quanto o penetrador, dependendo da dureza. Possui uma base quadrada e ângulo de 136° entre as faces para seu nº Vickers dar um valor bem parecido com o Brinell, para manter seu resultado, não precisando fazer muitas mudanças e servir também para uma comparação, se der muito diferente mostra que algum dos dois métodos está errado



Fig.32, 33 e 34: Imagens do ensaio de dureza Rockwell C.

Como podemos ver nas figuras 32, 33 e 34 acima o ensaio utilizado para fazer a medição das durezas das barras foi o Rockwell. O ensaio Rockwell funciona da seguinte maneira: o penetrador (cônico) encosta no corpo de prova fazendo uma pré carga, no Rockwell C são 10 quilos, depois é inserida a carga grande e após é retirada toda a carga. Assim é formado um delta de penetração, onde a máquina receberá e fará a conta para nos dar o resultado de sua dureza.

Escolhemos a carga grande de 150 quilos (HC). Após soltar a alavanca o visor foi mostrando triângulos em série e depois de mostrar todos sabemos que a pré carga de 10 quilos já estaria inserida no corpo de prova e então é inserido a carga de 150.

Foram feitas 4 medições nas duas barras indo na ponta direita até a ponta esquerda, para se obter uma melhor medição do material e ao mesmo tempo observar se este está homogêneo:

	1ª medição	2ª medição	3ª medição	4ª medição	média
Barra caldeada	42,4HC	46,2HC	48,4HC	51,0HC	47HC
Barra comum	43,8HC	43,3HC	46,5HC	50,1HC	45,9HC

Tabela 1: Resultados de durezas no ensaio Rockwell.

Estes valores nos mostram que as barras são bastante duras e não estão totalmente homogêneas, podendo ter tido um aquecimento maior em um lado do que em outro na hora de temperar. Definimos 4 ensaios para termos uma boa noção qualitativa destas duas barras e baseado nesta dureza observamos que a usinagem dos corpos de prova teriam que ser feitos em uma máquina mais específica, com controle de temperatura, pois o atrito da força para cortá-las poderá aquecer e mudar as suas microestruturas, usando por exemplo uma máquina de usinagem com jato d'água (fig.31).

4.2. Ensaio de Tração Instrumentado

O ensaio de tração é um ensaio onde o corpo de prova é submetido a um carregamento axial, sendo tracionado até sua ruptura. Este corpo de prova é preso em uma máquina e é tracionado com um carregamento axial crescente até sua ruptura, formando um gráfico qualitativo onde teremos uma ideia de qual região o material está, elástica ou plástica, e qual os parâmetros máximos de força, para conseguirmos montar um gráfico tensão deformação do material. Ao obter o gráfico tensão x deformação se torna possível fazer análises de alguns comportamentos do material, como módulo de elasticidade, alongamento, tensão e deformação.

Para haver uma boa análise de comparação neste tipo de teste, deve ser definido as dimensões dos corpos de prova baseado em normas, como a ASTM. Logo baseado nesta norma foi feito o desenho das dimensões dos corpos de prova com o programa SolidWorks.

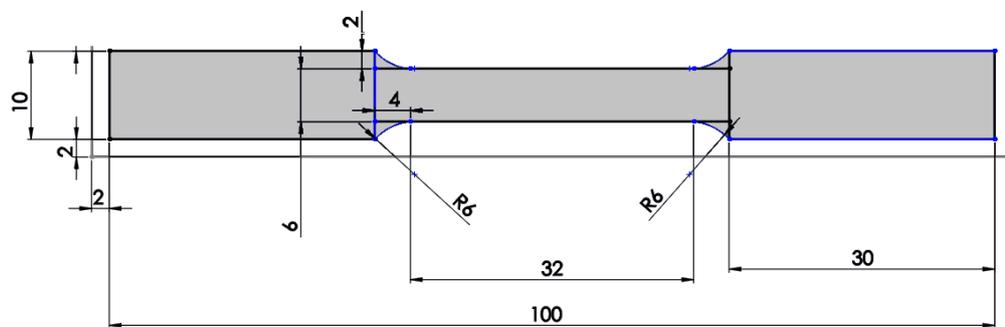


Fig.35: Desenho do corpo de prova padrão para ensaio de tração, baseado na norma ASTM E8/E8M.

Para nosso experimento foi utilizada a máquina Instron 5500R, que insere a força uniaxial de tração contínua aplicada no corpo de prova até seu rompimento, um Clip gauge (extensômetro), usado para medir a deformação que o material está sofrendo conforme é aplicada a força de tração, e um paquímetro, para fazer a medição antes e depois de sua ruptura.

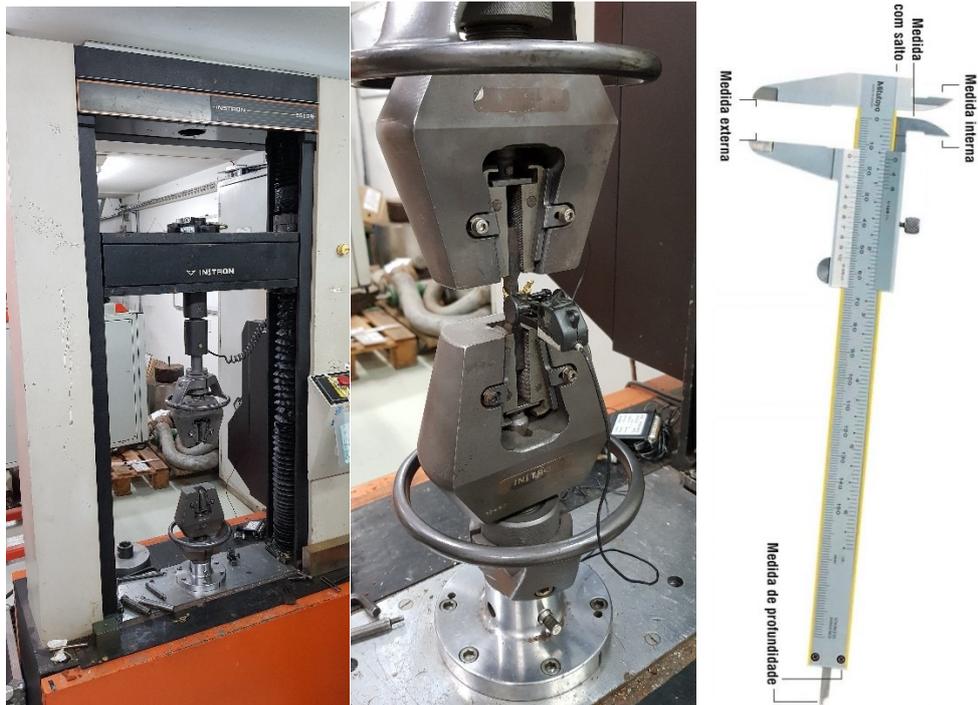


Fig.36, 37 e 38 :Máquina utilizada, o corpo de prova já preso com o extensômetro e um paquímetro.

Os corpos de prova já são usinados em seu centro, para facilitar e especificar a área de ruptura, sendo a área de maior tensão. Tendo todos os dados de suas dimensões iniciais o prendemos na máquina, junto com um extensômetro. Com a máquina nós tracionamos axialmente até sua ruptura. Quando ocorre a ruptura nós fazemos novamente a medição do diâmetro e comprimento, sendo estes os finais. Com a máquina retiramos o valor da força, extensão e deformação ao longo do tempo e conseguimos gerar os gráficos de força x deslocamento. Para cada barra foram feitos ensaios de 3 corpos de prova.

Corpo de prova comum:



Fig.39 e 40: Corpo de prova comum antes e após o ensaio.

- 1°CP

Text Inputs : Specimen label	1	
Dimension : Length	35	mm
Dimension : Final length	35	mm
Test : Rate 1	1	mm/min

Tabela 2: Comprimento inicial e final do primeiro corpo de prova comum.

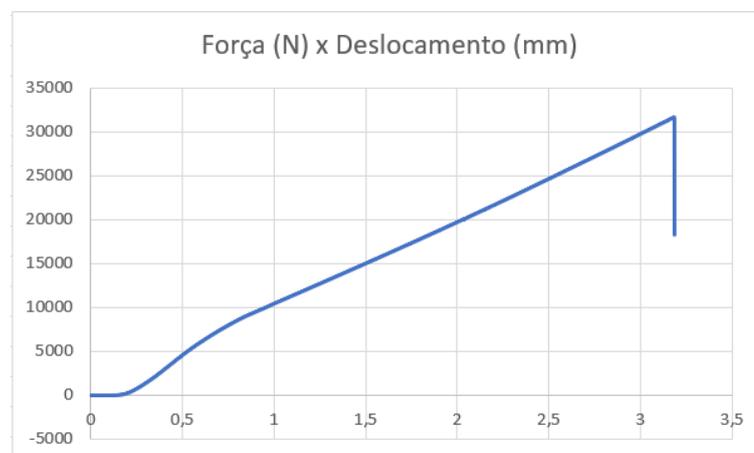


Fig.41: Gráfico força x deslocamento do 1°CP comum.

- 2°CP

Text Inputs :		
Specimen label	2	
Dimension : Length	35	mm
Dimension : Final length	35	mm
Test : Rate 1	1	mm/min

Tabela 3: Comprimento inicial e final do segundo corpo de prova comum.

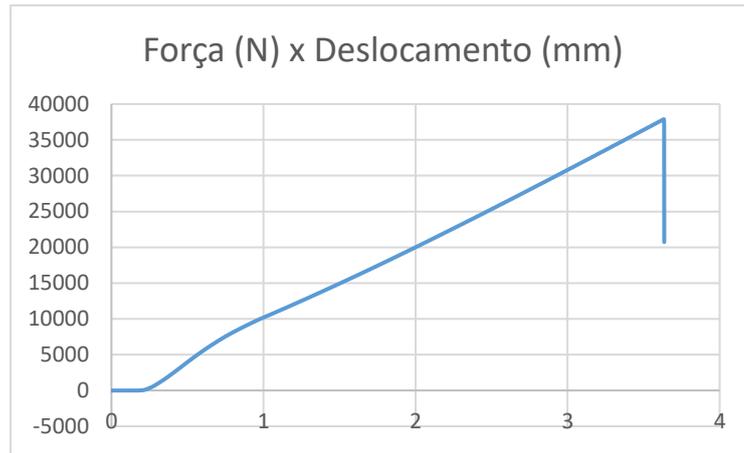


Fig.42: Gráfico força x deslocamento do 2°CP comum.

- 3°CP

Text Inputs :		
Specimen label	3	
Dimension : Length	35	mm
Dimension : Final length	35	mm
Test : Rate 1	1	mm/min

Tabela 4: Comprimento inicial e final do terceiro corpo de prova comum.

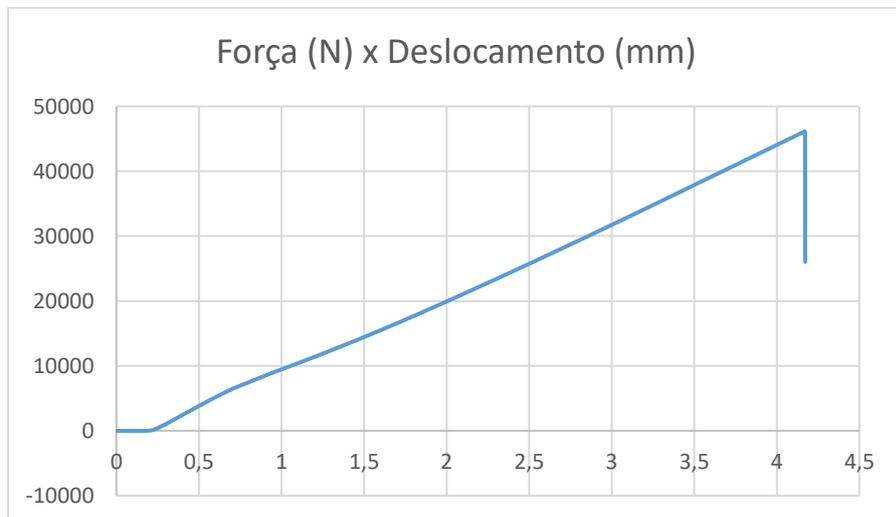


Fig.43: Gráfico força x deslocamento do 3°CP comum.

- Média dos três corpos de prova

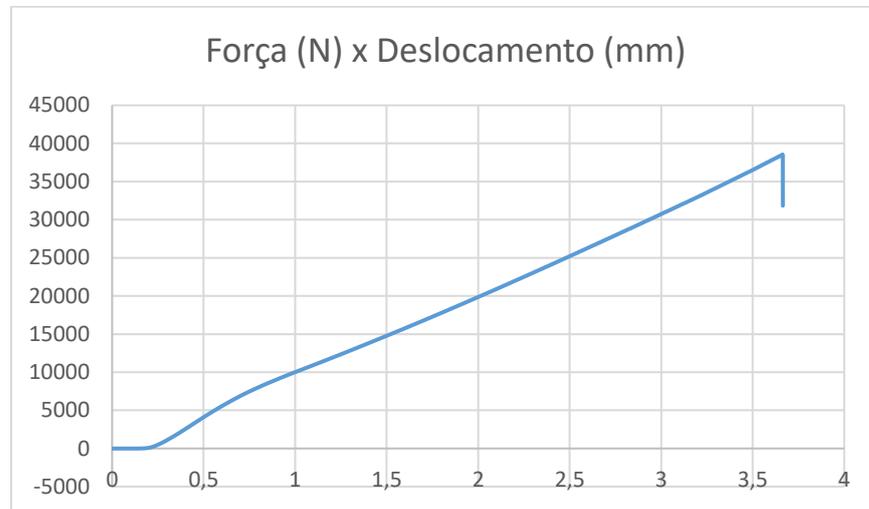


Fig.44: Gráfico força x deslocamento médio.

Todos os três corpos de prova, apesar das diferenças de forças para seu rompimento, se romperam da mesma maneira sem haver deformação plástica, mostrado na figura 40.

Corpo de prova caldeado:



Fig.45 e 46: Corpo de prova caldeado antes e após o ensaio.

- 1°CP

Text Inputs : Specimen label	1	
Dimension : Length	35	mm
Dimension : Final length	35	mm
Test : Rate 1	1	mm/min

Tabela 5: Comprimento inicial e final do primeiro corpo de prova caldeado.

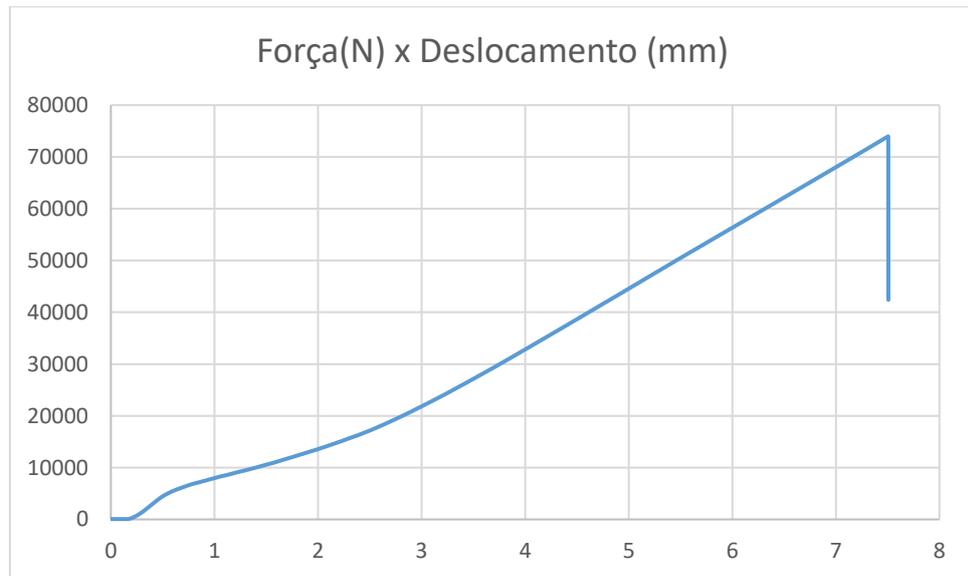


Fig.47: Gráfico força x deslocamento do 1°CP caldeado.

Ao romper não houve deformação plástica, mas rompeu em camadas mostrando alguma das dobras do caldeamento, sendo o CP de número 1 da Figura 46.

- 2°CP

Text Inputs : Specimen label	2	
Dimension : Length	35	mm
Dimension : Final length	35	mm
Test : Rate 1	1	mm/min

Tabela 6: Comprimento inicial e final do primeiro corpo de prova caldeado.

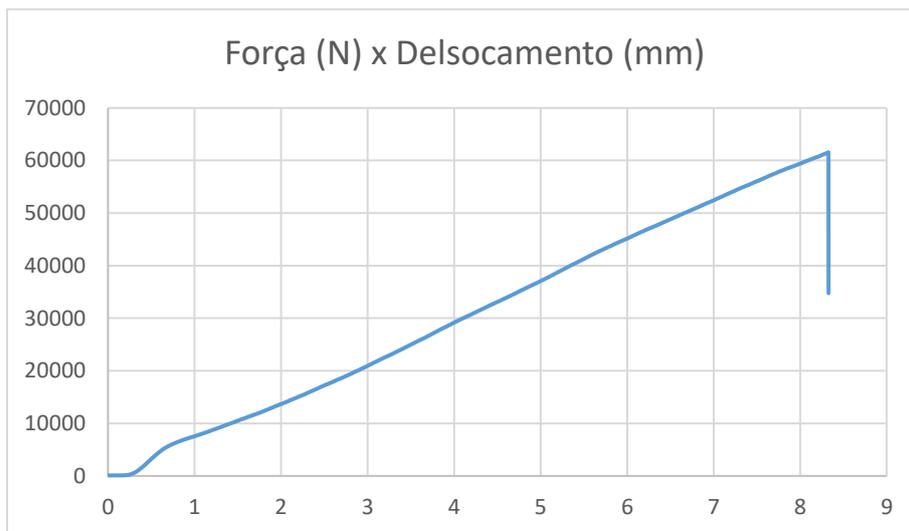


Fig.48: Gráfico força x deslocamento do 2ºCP caldeado.

Ao romper mostrou as camadas novamente e não houve deformação plástica, mas trincou em uma destas camadas, tendo uma extensão no comprimento da área mais fina do corpo de prova inteiro, mostrado com número 2 na figura 46.

- 3ºCP

Text Inputs :		
Specimen label	3	
Dimension : Length	35	mm
Dimension : Final length	35	mm
Test : Rate 1	1	mm/min

Tabela7: Comprimento inicial e final do primeiro corpo de prova caldeado.

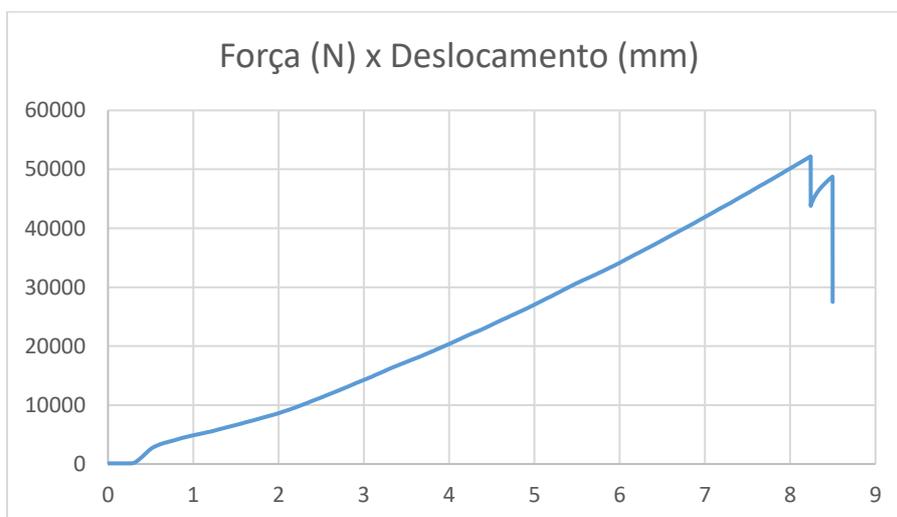


Fig.49: Gráfico força x deslocamento do 3ºCP caldeado.

Neste corpo de prova também não houve deformação plástica e rompeu em camadas, só que teve um acontecimento diferente. Ao atingir o ponto de rompimento não houve a fratura total do corpo de prova e sim parcial, e após mais um tempo sofrendo tração se rompeu totalmente na outra área entre o chanfro e a parte mais fina, podendo ser observado abaixo o momento de seu rompimento (sendo o CP de número 3 na figura 46).

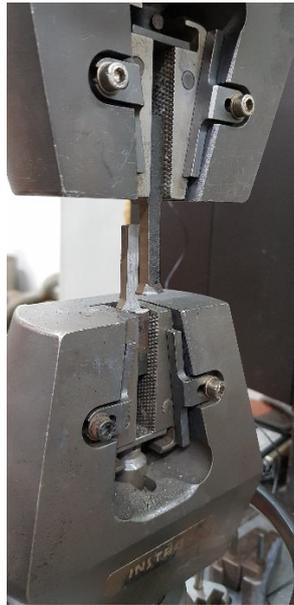


Fig.50: Momento após rompimento total do terceiro corpo de prova.

Tendo o rompimento parcial ocorrido na parte de trás e o total na frente, sendo esse tão brusco que retirou até um pedaço na frente do CP, que saiu voando.

- Média dos três corpos de prova

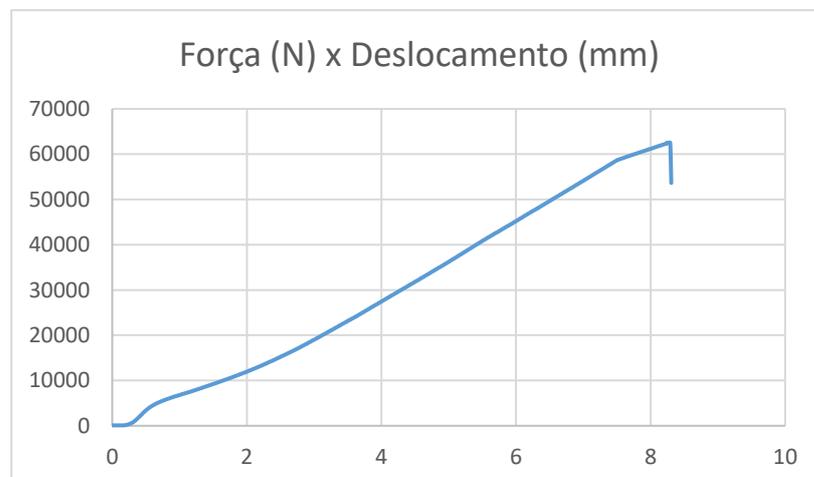


Fig.51: Gráfico força x deslocamento médio.

Queremos estudar e observar as propriedades dos materiais, então para ter uma boa noção do comportamento do material fazemos um estudo através do gráfico de Tensão x Deformação.

Este gráfico de Tensão x Deformação pode ser dividido em dois tipos: de Engenharia e Real:

- De engenharia - deformação de engenharia é uma grandeza adimensional e representa um valor médio da deformação sobre o seu comprimento inicial. Admitindo que a seção transversal inicial do corpo de prova tenha área A_0 e que a força se distribui uniformemente em todos os pontos da seção transversal, a tensão de engenharia pode ser expressa como a força sobre A_0 , como mostrado abaixo:

$$\sigma_{eng} = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{eng} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

- Real – A deformação real pode ser definida imaginando uma sequência de etapas de carregamento onde o corpo alonga-se de um valor ΔL . Pegando intervalos ΔL_i muito pequenos, ou seja, aumentando indefinidamente o número de etapas i , a deformação pode ser definida através se tornará um $d\varepsilon$ que será igual a taxa de deformação sobre o comprimento inicial, então se integramos tudo vamos obter a equação mostrada abaixo:

$$\sigma_{real} = \frac{F}{A_{inst}} = \sigma_{eng}(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{real} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (4)$$

Na área elástica, a deformação é diretamente proporcional a carga aplicada, podendo assim utilizar a lei de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

σ = tensão
 E = módulo de elasticidade ou módulo de Young
 ε = deformação

(5)

O módulo de elasticidade representa a rigidez do material, logo quanto maior, mais rígido e assim menor sua deformação. Podemos definir através de dois pontos

na região elástica do gráfico e calculando sua tangente (admitindo que o caminho elástico é linear).

Através das fórmulas ditas anteriormente e dados obtidos (utilizando a média dos CP's), defino as tensões e deformações reais e de engenharia tanto para o aço comum quanto para o aço caldeado e assim monto os gráficos para cada uma dessas relações de Tensão x Deformação: (definindo o valor do módulo de elasticidade do aço 5160, como 200GPa)

Corpo de prova comum:

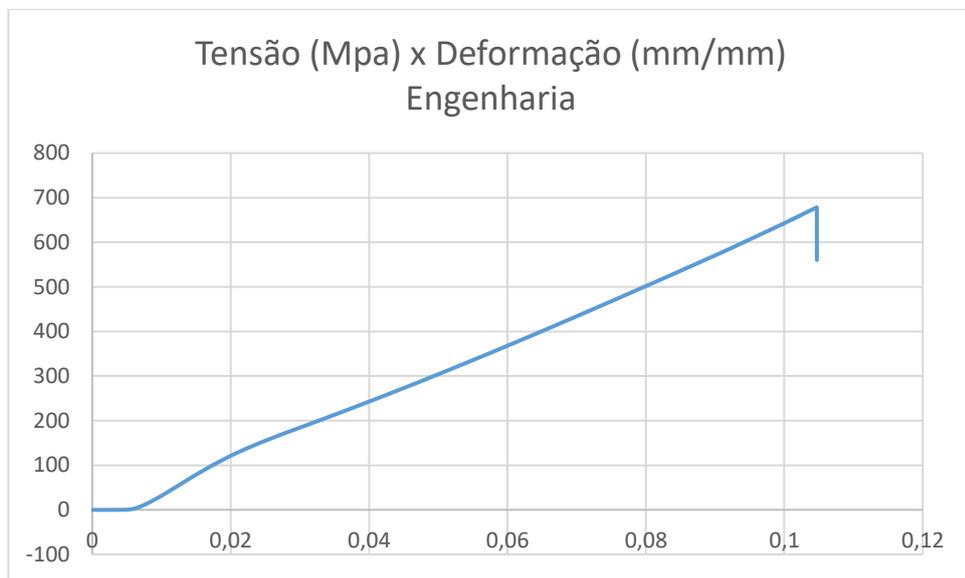


Fig.52: Gráfico de Tensão x Deformação de Engenharia do CP comum.

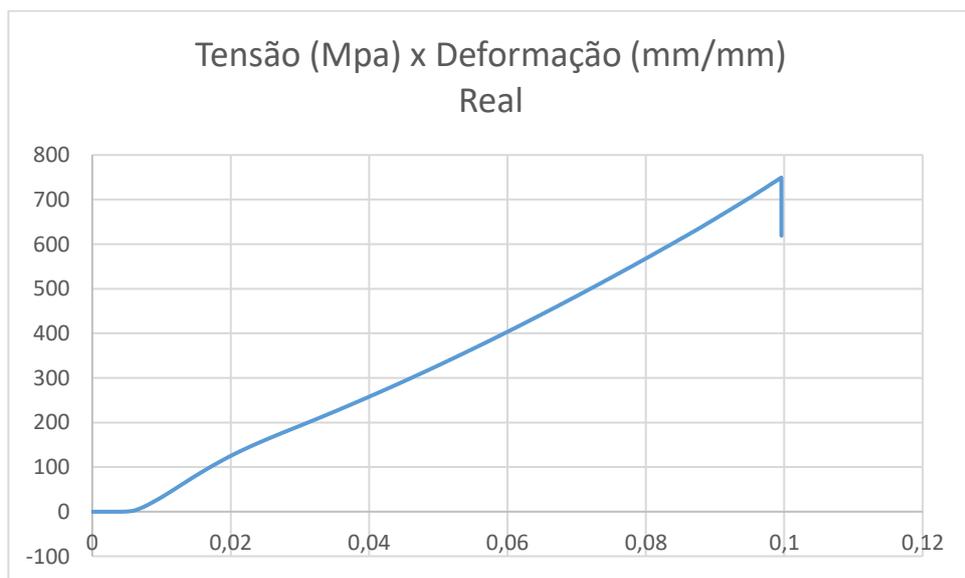


Fig.53: Gráfico Tensão x Deformação Real do CP comum.

Escoamento		Ruptura	
Tensão real	Deformação real	Tensão real	Deformação real
749,4144	0,099563	618,9969	0,099583
Tensão de eng.	Deformação de eng.	Tensão de eng.	Deformação de eng.
678,3944	0,104688	560,3254	0,10471

Tabela 8: Tensões e deformações reais e de engenharia máximas no escoamento e de ruptura do CP comum.

Corpo de prova caldeado:

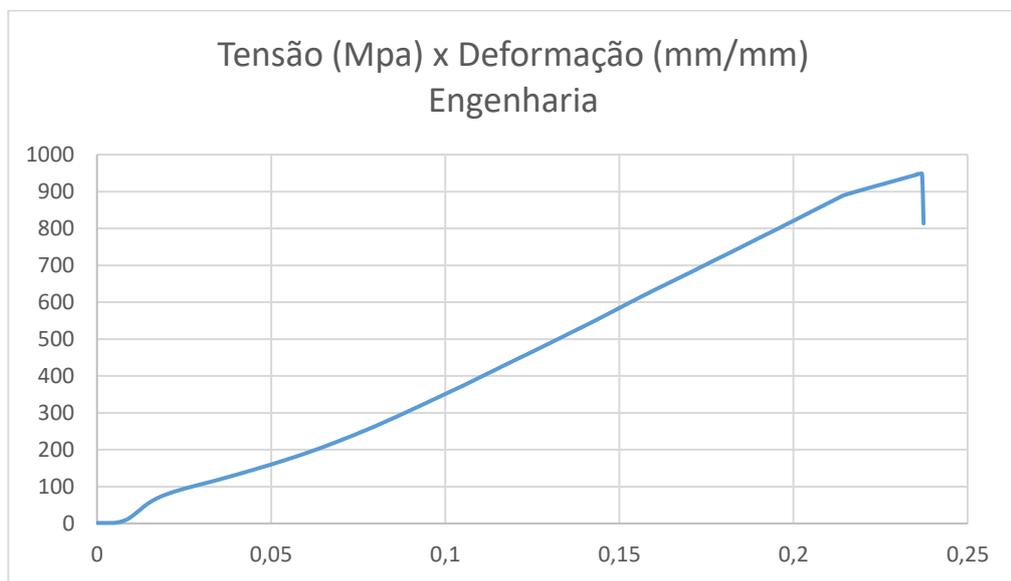


Fig.54: Gráfico de Tensão x Deformação de Engenharia do CP caldeado.

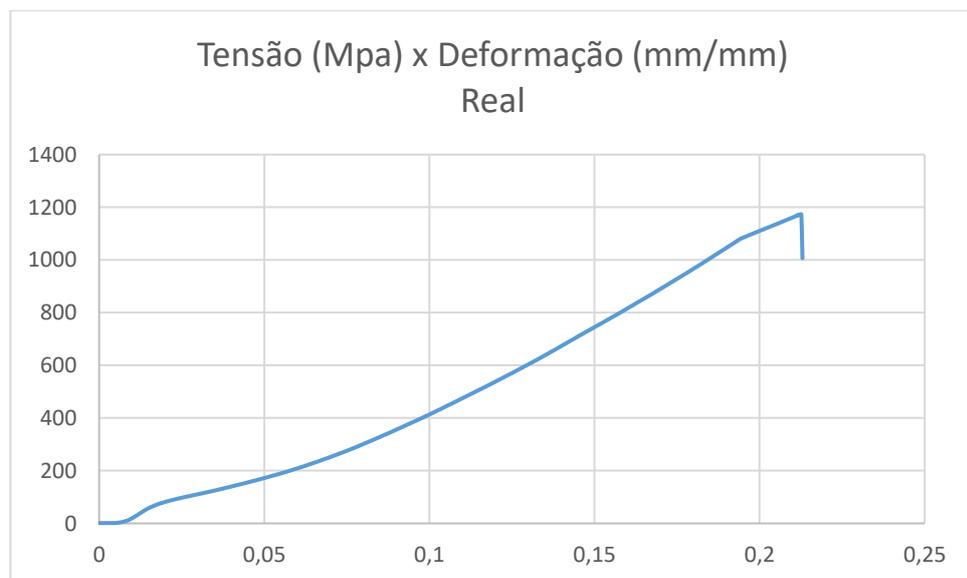


Fig.55: Gráfico Tensão x Deformação Real do CP caldeado.

Escoamento		Ruptura	
Tensão real	Deformação real	Tensão real	Deformação real
1173,731	0,212594	1006,461	0,212981
Tensão de eng.	Deformação de eng.	Tensão de eng.	Deformação de eng.
948,9435	0,236882	813,3932	0,237361

Tabela 9: Tensões e deformações reais e de engenharia máximas no escoamento e de ruptura do CP caldeado.

Observando e comparando os gráficos podemos dizer que a parte Real leva em consideração um estado de tensão x deformação diferenciado com relação ao de Engenharia, logo seu valor de tensão acaba sendo um pouco maior e com isso sua ruptura acontece mais cedo.

Usando a lei de Hooke, determinamos o módulo de elasticidade dividindo a tensão pela deformação entre dois pontos na região elástica e calculando sua tangente, obtendo assim:

Corpo de prova comum:

módulo de elasticidade		
Real	8557,552	MPa
Engenharia	6845,168	MPa

Tabela10: Módulo de elasticidade real e de engenharia do CP comum.

Corpo de prova caldeado:

módulo de elasticidade		
Real	7096,589	MPa
Engenharia	4819,136	MPa

Tabela11: Módulo de elasticidade real e de engenharia do CP caldeado.

Podemos ver através dos gráficos que o comportamento dos dois aços é igual e isto já era de se esperar já que o material é o mesmo. O corpo de prova caldeado possui uma maior resistência a tração, concluindo que esta ferramenta de caldear dobrando o material melhora qualitativamente sua resistência tanto na tensão quanto na deformação, passando sua resistência ao escoamento de 749,4MPa para

1173,7MPa e deformação de 0,0996 para 0,2126 na parte real, com um aumento de 424,3MPa na tensão e 0,113mm/mm na deformação real (na parte de engenharia a variação na tensão foi um pouco menor e a deformação um pouco maior). Mas ao mesmo tempo diminui um pouco seu módulo de elasticidade, passando de 8,56GPa para 7,1GPa na parte real (na parte de engenharia ocorre uma diferença um pouco maior). Nenhum dos dois obteve uma parte plástica, ambos romperam após a parte elástica.

4.3. Ensaio Charpy

O ensaio Charpy é um ensaio de impacto, onde visa mensurar o acúmulo de energia absorvida por um material a uma dada temperatura. Assim da para se fazer um estudo de tenacidade, podendo definir comportamentos e aplicações de diferentes tipos de materiais.

O aparelho de ensaio é um pêndulo, com forma de um martelo, de massa conhecido que é deixado cair a uma altura conhecida, com queda livre até impactar com o material a ser testado. A energia transferida ao material pode ser medida através das diferenças de altura deste martelo antes e depois da fratura, no nosso caso ela já é feita através de um ponteiro, onde vemos podemos ver direto o resultado, desconsiderando as forças de atrito e aerodinâmicas. As fissuras no corpo de prova, decorrentes do impacto do martelo, avalia os resultados do teste de impacto. O tamanho da amostra pode afetar os resultados já que ela determina se o material está em plano de deformação, então temos que fazer este teste com corpos de prova idênticos com o entalhe de dimensões regulares e geométricos.

O corpo de prova possui o formato de uma seção quadrada com um entalhe em "V". Esse é bi-apoiado na máquina onde irá ser feito o teste, com o entalhe no lado oposto ao impacto, podendo ser observado na figura abaixo:

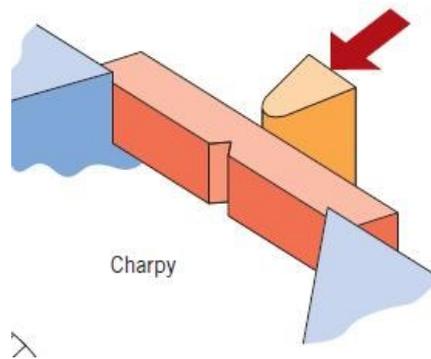


Fig.56: Corpo de prova bi-apoiado.

A dimensão do corpo de prova interfere nos resultados logo deve ser feita a partir da norma padrão válida para o ensaio Charpy, podendo ser observado no desenho abaixo:

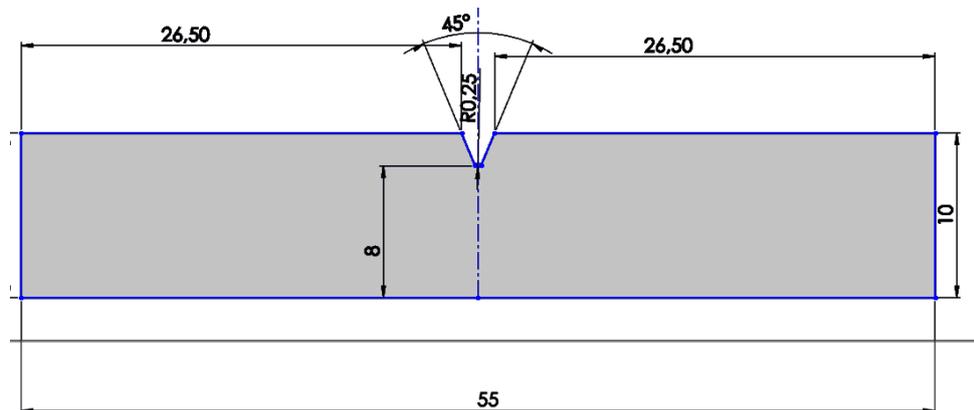


Fig.57:Corpo de prova padrão de ensaio Charpy, feito no SolidWorks.

O corpo de prova, ao ser utilizado em diferentes temperaturas apresentará diferentes comportamentos, o tornando mais dúctil ou frágil. Conhecendo a temperatura crítica deste corpo de prova, sabendo que abaixo disso ele se tornará frágil, podemos ter um maior aprofundamento sobre sua utilidade. Abaixo podemos observar esta diferença de comportamento com a temperatura de alguns tipos de materiais, sabendo que quanto maior a energia absorvida maior a ductilidade do material

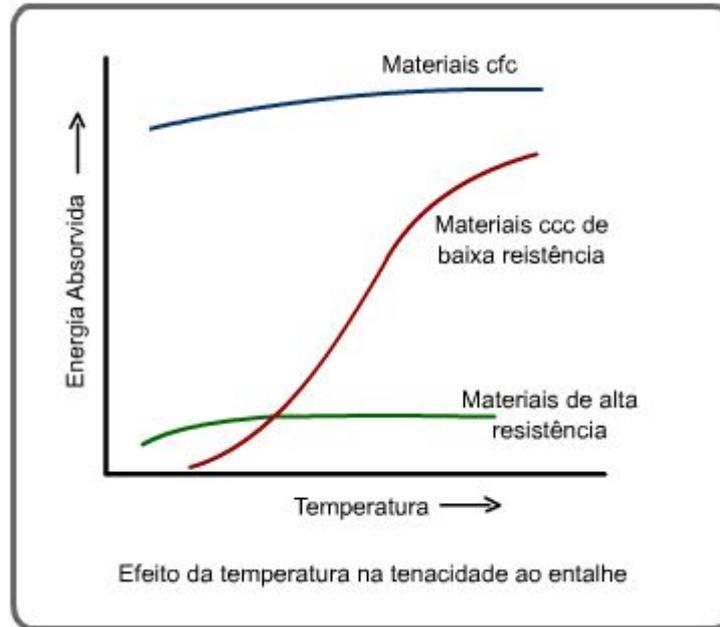


Fig.58: Energia absorvida no impacto em função da temperatura do material
 - CIMM, Temperatura de transição.

Dentre as funções dos ensaios de impacto nós o utilizaremos para comparar a energia absorvida entre as duas barras de aço, medidas em Joules, e para termos uma boa ideia de suas tenacidades, quanto a ductilidade ou fragilidade.

A máquina utilizada foi um pêndulo em formato de um martelo com um medidor de ponteiro e um apoio para o corpo de prova. Não foi necessário utilização do multímetro pois como é um teste comparativo e não de transição dúctil-frágil, por exemplo, todos os corpos de prova de ambas as barras foram feitas na temperatura ambiente.



Fig.59 e 60: Imagem da máquina utilizada e do corpo de prova sendo inserido na posição correta através de um “pegador” específico para este ensaio.

Foram utilizados 3 corpos de prova de cada barra para termos uma boa confirmação de suas características, assim poder compará-los com mais precisão.

Abaixo veremos os resultados do ensaio em cada barra:

Corpo de prova comum:

	1° CP	2° CP	3° CP	média
Energia absorvida	4,0 (J)	3,9 (J)	4,1 (J)	4 (J)
Tenacidade	Frágil	Frágil	Frágil	

Tabela 12: resultado do ensaio Charpy do CP comum.



Fig.61, 62 e 63: Resultado de um dos ensaios e o corpo de prova antes e depois do impacto, totalmente frágil.

Corpo de prova caldeado:

	1° CP	2° CP	3° CP	média
Energia absorvida	7,3 (J)	4,2 (J)	5,0 (J)	5,5 (J)
Tenacidade	Frágil	Frágil	Frágil	

Tabela 13: resultado do ensaio Charpy do CP caldeado.



Fig.64, 65 e 66: Resultado de um dos ensaios e o corpo de prova antes e depois do impacto, totalmente frágil.

Ao romper conseguimos observar algumas das camadas das dobras de seu caldeamento como visto também no ensaio de tração.

Os diferentes resultados dos ensaios de impacto nos corpos de prova podem ter como causa alguma diferença na temperatura da barra no momento do aquecimento para a têmpera, como dito anteriormente no ensaio de dureza. E a fragilidade de ambos os aços já era de se esperar devido a alta dureza.

4.4. Ensaio de Fadiga

Fadiga é o tipo de falha mecânica causada primariamente pela aplicação repetida de carregamentos variáveis ao longo do tempo. Estas falhas são localizadas, progressivas e cumulativas, e caracterizam-se pela geração e/ou propagação de uma trinca, a qual diminui paulatinamente a resistência da peça, levando à fratura. Por isso, o projeto à fadiga é um problema local que depende dos detalhes da geometria, do material e do carregamento do ponto mais solicitado da peça. O processo de trincamento é muito influenciado pelos detalhes do acabamento superficial, do gradiente das tensões atuantes (incluindo as tensões residuais) e das propriedades mecânicas de determinado material. Nestes casos a resistência à iniciação de uma trinca por fadiga tende a aumentar com a resistência à ruptura S_u , com a melhoria do acabamento superficial, com o aumento do gradiente de tensões e com a presença de tensões residuais compressivas.

O teste da/dN estuda a fase posterior do surgimento da trinca, durante sua propagação pelo material, onde é capaz de prever o número de ciclos que a trinca propaga antes da fratura.

A propagação da trinca pode ser medida de diversas formas: o mais barato de todos é riscar o corpo de prova de 0,5 em 0,5mm e a seguir ir observando o caminho da trinca, sabendo que a cada vez que passar por um traço mostra que andou 0,5mm, mas é um processo ruim pois depende muito da sua mão para riscar as linhas de 0,5mm corretamente e o traço tem espessura então como saberemos se o correto é o início, meio ou fim deste traço; outro meio, utilizado neste ensaio, através de uma mesinha que anda em micrometro, com lentes de aumento que focam no local onde ela se encontra na peça e, junto à instrumentos eletrônicos, ela pode ser medida onde definimos a quantidade de ciclos e observamos o caminho da trinca; agora, nesses últimos 10 anos, já possui uma câmera que você consegue observar o caminho ampliado em uma tela.

Neste ensaio realizado, serão consideradas apenas forças de tração sobre o corpo de prova. Em geral, a taxa de propagação das trincas da/dN é primariamente controlada por:

$$\Delta KI = [\Delta \sigma] \times [\pi a] \times [f(a_w)] \quad (6)$$

Sendo a gama do fator de intensidade de tensões em modo I (a ser visto na figura 53 mais a diante). A variável ' $\Delta\sigma$ ' é a gama principal de tensões trativas, ' a ' é o tamanho da trinca e ' $f(a/w)$ ' é a função adimensional que quantifica o efeito de como todos os outros fatores geométricos afetam o campo de tensões (linear elástico) na peça trincada.

Paris, Gomez e Anderson foram os primeiros a propor a ideia de que da/dN seria controlada por ΔK , em vez de $\Delta\sigma$ ou $\Delta\varepsilon$. Pouco depois Paris e Erdogan demonstraram de forma convincente de que ΔK é de fato o parâmetro que controla da/dN – Fadiga Volume 1. Eles mediram a propagação de trincas centrais de tamanho inicial $2a$ em dois conjuntos de placas, com largura ' w ', espessura ' t ' e $w \gg t$, aplicando em todas as placas a mesma gama de tensões $\Delta\sigma = \Delta P/wt$, onde ΔP é a gama fixa da força. O primeiro conjunto aplicaram carga nas faces da trinca, enquanto no outro a carga foi aplicada na borda da placa, então se fosse a gama de tensões $\Delta\sigma$ que controlasse a propagação das trincas, as taxas da/dN seriam as mesmas, mas este não foi o ocorrido e seu comportamento foi o oposto, quando a carga foi aplicada nas faces, da/dN decresceu, mas quando foi aplicada nas bordas, da/dN cresceu. Entretanto as curvas $da/dN \times \Delta K$ medidas nas duas placas coincidiram comprovando a teoria. Podendo ser observado abaixo:

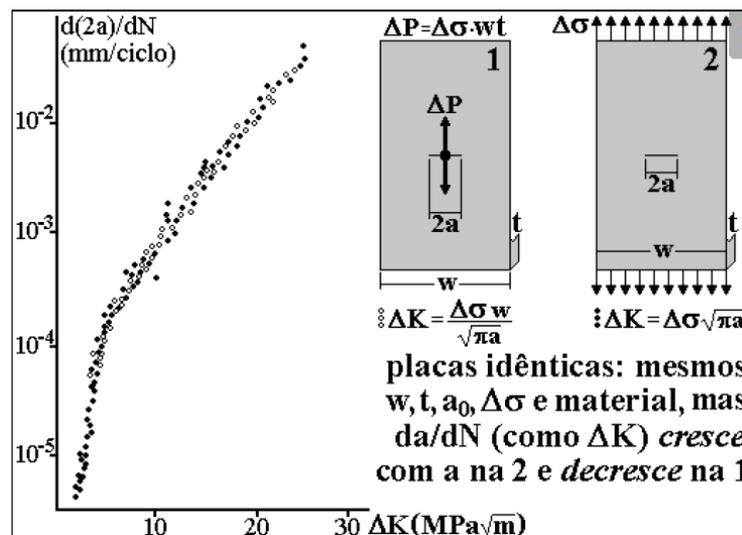


Fig.67: Gráfico da/dN por ΔK . – Fadiga Volume 2.

Como dito anteriormente, o método da/dN relaciona a taxa de propagação de uma trinca do momento posterior ao seu surgimento até o colapso do material com o fator de intensidades de tensões ΔK , obtido através da equação abaixo, que depende de fatores geométricos do corpo de prova (a, w, t) e da carga P aplicada no corpo durante o ensaio e de um fator ' α ' que será equacionado posteriormente.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{t\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{1,5}} (0,886 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4) \quad (7)$$

O gráfico $da/dN \times \Delta K$ é uma curva em escala log-log que pode ser dividido em três fases de propagação da trinca no material. Um exemplo deste modelo de gráfico está ilustrado pela figura abaixo:

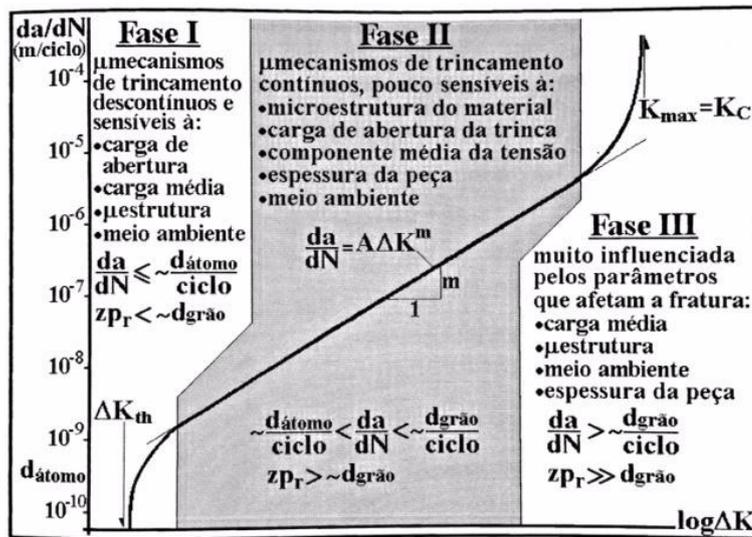


Fig.68: Gráfico das três fases da falha de um material por fadiga

- Fadiga Volume 2.

A primeira fase deste gráfico corresponde ao intervalo onde a propagação da trinca é menor do que um átomo por ciclo, que parte de um limiar de propagação ΔK_{th} com derivada decrescente à medida que ΔK cresce, e termina quando se estabiliza. A segunda fase tem a velocidade de propagação da trinca que pode variar entre um átomo a um grão por ciclo, parte onde a derivada de $\log(da/dN) \times \log(\Delta K)$ é aproximadamente constante e $da/dN \cong A \cdot \Delta K^m$. A fase final tem uma velocidade de propagação alta, de mais de um grão por ciclo e a derivada cresce com ΔK até que a peça fratura quando $K_{max} = \Delta K / (1-R) = K_c$.

Este estudo pode ser realizado considerando a propagação da trinca em três condições de aplicação de cargas onde cada uma afeta um deslocamento diferente da superfície da trinca.

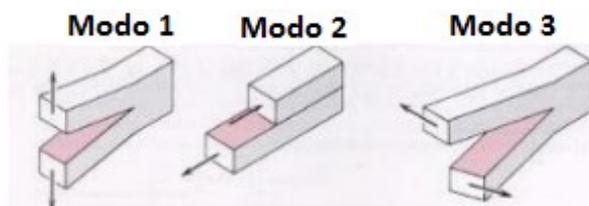


Fig.69: Configurações de cargas para estudo de propagação da trinca.

O modo 1 é o modo mais frequente de estudo e qual será estudado aqui, este modo é trativo ou de abertura de trincas, onde as superfícies da trinca são tracionadas a parte. O modo 2, de deslizamento ou cisalhamento no plano, faz com que as superfícies da trinca deslizem uma sobre as outras. O modo 3, de rasgamento ou cisalhamento fora do plano, faz com que as superfícies da trinca se movam paralelamente entre si. É importante ressaltar que esses modos só são validos durante o início da propagação da trinca pois sua propagação tende a desviar para o modo 1.

O corpo de prova utilizado no experimento foi do tipo C(T) com dimensões padronizadas da norma ASTM E647.

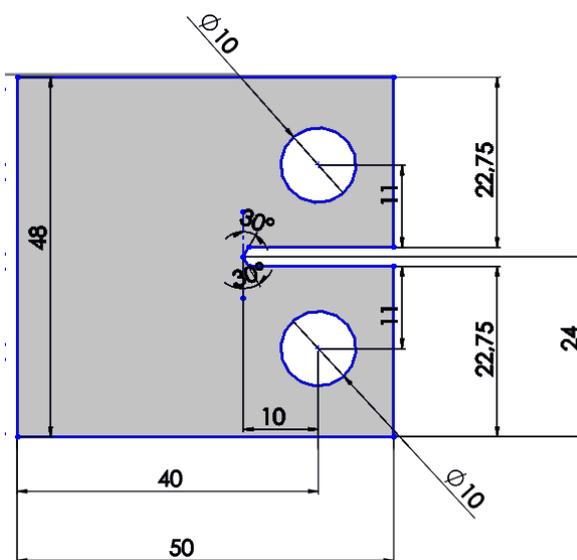


Fig.70: Corpo de prova tipo C(T) padrão, feito no SolidWorks.

A construção deste corpo de prova foi a mais difícil de todas, pois a máquina de eletroerosão não faz furo e devido a sua alta dureza nenhuma broca conseguiu perfurá-la, até a com revestimento de titânio onde perfurou só enquanto possuía este revestimento e depois parou. A solução foi recozer o aço para conseguir furá-lo e depois temperá-lo novamente.

Para fazer este recozimento foi necessário colocar as peças em um forno e aquecê-las por um determinado tempo para depois resfriá-las de uma forma lenta. Então foi inserido os corpos de prova em um forno, ligado a 600°C e o deixado por 3h para que eles aqueçam de uma forma homogênea até chegar a esta temperatura, após este tempo é desligado o forno e deixados por mais 1h lá dentro sem abrir, para haver o recozimento. Ao terminar estas 4h, foi aberto o forno e mantidos os corpos de prova em seu interior, para que eles tivessem um resfriamento com o ar mas de uma maneira mais lenta possível, como observado na figura abaixo.



Fig.71: Corpos de prova sendo resfriados após o recozimento.

A seguir com o auxílio de uma fresadora foram feitos os furos nos corpos de prova, utilizando uma broca fazendo um pequeno furo para servir como guia, uma

segunda broca com revestimento de titânio para fazer o furo na peça e a terceira para deixar o furo com as dimensões corretas.



Fig.72 e 73: Fresadora após aplicação do furo e brocas utilizadas.

Após isto foi feita a têmpera, onde são aquecidos os corpos de prova até uma temperatura de 1000°C, austenítica, e resfriados rapidamente no óleo, para se transformarem em martensita.



Fig.74, 75 e 76: Corpo de prova retirado do forno, temperado no óleo e após a têmpera.

Por fim houve o polimento do material para poder observar a trinca e toda a sua propagação no teste de fadiga, inserindo um papel milimetrado para definir o tamanho da propagação.



Fig.77, 78 e 79: Corpo de prova antes, durante e depois do polimento já com o papel milimetrado.

O corpo de prova foi fixado na máquina de ensaios e nestes dois orifícios foi aplicado uma carga trativa cíclica variando de 9kN à 1kN. Durante o experimento, paralelamente deve ser mensurando a variação da propagação da trinca, anotando a quantidade de ciclos a cada milímetro que a trinca se propagava. Isto gera dados de propagação de trinca em [mm] e a quantidade de ciclos dos dois corpos de prova.

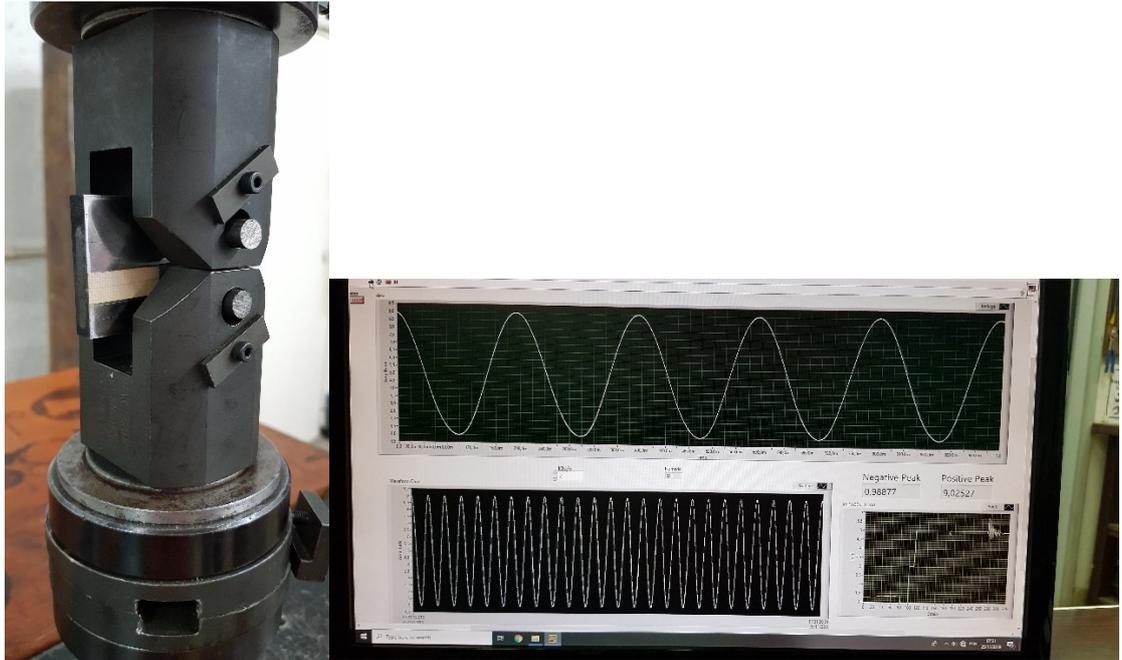


Fig.80 e 81:Corpo de prova fixado na máquina instron 850I e sua senoidal de aplicação de carga mínima e máxima.

Ao iniciar o experimento devido a alta dureza e baixa tenacidade do material, por causa de sua têmpera, não houve uma propagação de trinca de ambos os corpos de prova e sim um rompimento total assim que a trinca se iniciou. Não havendo então a mensuração de variação da propagação da trinca.



Fig.82: Corpo de prova no momento que se iniciou a trinca.

Corpo de prova comum:

Propagação da Trinca		
	mm	Ciclos (N)
a0	10	0
a1	30	946

Tabela 14: Propagação de trinca e quantidade de ciclos do CP comum.

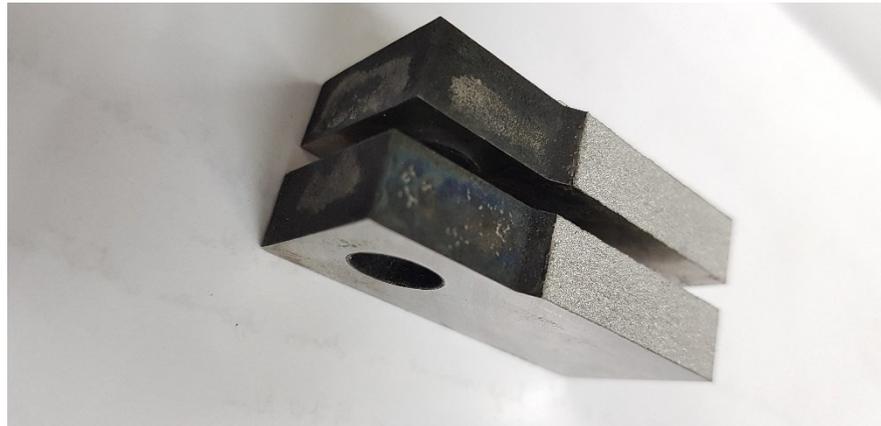


Fig.83: Corpo de prova comum rompido completamente.

Foi inserida uma frequência de 5Hz para observar a propagação da trinca, mas ao chegar em 946 ciclos a peça deu um ligeiro estalo e logo após se rompeu completamente.

Corpo de prova caldeado:

Propagação da Trinca		
	mm	Ciclos (N)
a0	10	0
a1	30	2550

Tabela 15: Propagação de trinca e quantidade de ciclos do CP caldeado.



Fig.84: Corpo de prova caldeado rompido completamente.

Para este teste foi diminuída a frequência para 2Hz com o objetivo de tentar observar e parar assim que houvesse o início da trinca, mas da mesma maneira ao dar um ligeiro estalo essa se rompeu totalmente. Só que desta vez ao observar o corpo de prova rompido foi visto que havia pequenas trincas internas.

Com os dados da tabela mostrada anteriormente e através das equações abaixo foi montado a tabela a seguir:

$$\left(\frac{da}{dN}\right) = \frac{a_{i+1}-a_i}{N_{i+1}-N_i}, \quad \alpha = \frac{\bar{a}}{W}, \quad \bar{a} = \frac{1}{2}(a_{i+1} - a_i) \quad (8)$$

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{t\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{1,5}} (0,886 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4) \quad (9)$$

Corpo de prova comum:

a(i+1)-a(i)	N(i+1)-N(i)	(da/dn) x (10 ⁵)	\bar{a}	α	ΔK	log(ΔK)	log(da/dn)
20	946	2114,1649	20	0,5	2183,297	3,339112773	3,325138859

Tabela 16: valores de da/dN e ΔK e seus logaritmos do CP comum.

Corpo de prova caldeado:

a(i+1)-a(i)	N(i+1)-N(i)	(da/dn) x (10 ⁵)	\bar{a}	α	ΔK	log(ΔK)	log(da/dn)
20	2550	784,3137	20	0,5	2183,297	3,339112773	3,325138859

Tabela 17: valores de da/dN, ΔK e seus logaritmos do CP caldeado.

Como não houve propagação de trinca e sim um rompimento total de ambos os corpos de prova, não foi obtido os gráficos da/dN por ΔK para observar as fases de falha do material por fadiga.

Após o rompimento de ambos os corpos de prova foi feita uma análise com um microscópio para observar o início da trinca de ambos os corpos de prova.

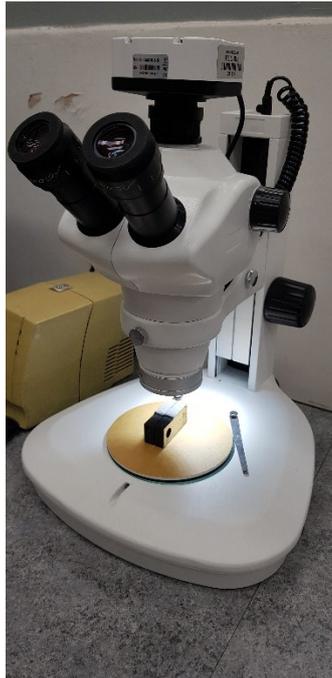


Fig.85: Microscópio usado para analisar o início da trinca.

Corpo de prova comum:

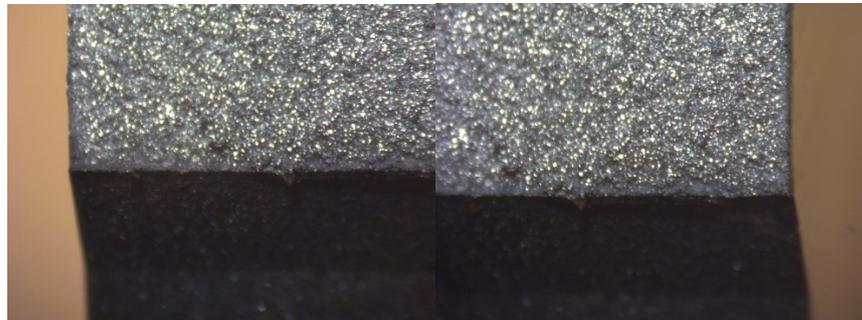


Fig.86 e 87: Vista superior do corpo de prova comum, sem nenhuma microtrinca.

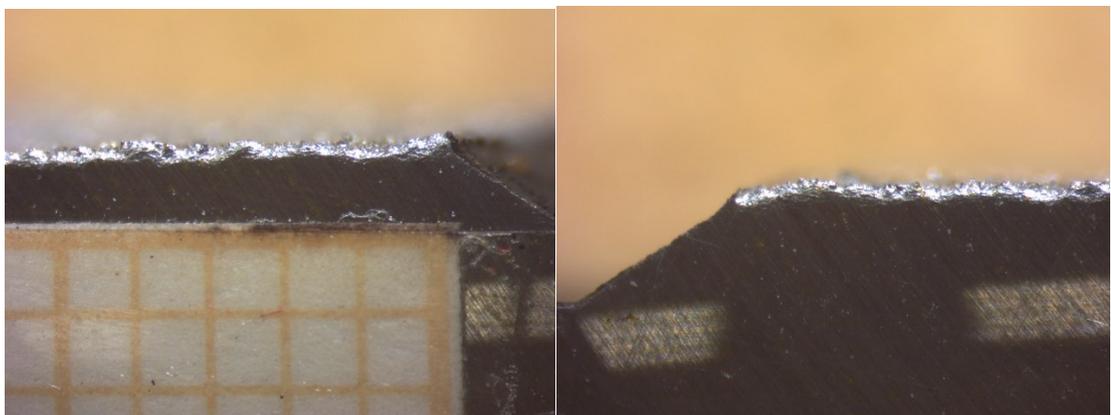


Fig.88 e 89: Vista frontal do corpo de prova comum.

Corpo de prova caldeado:

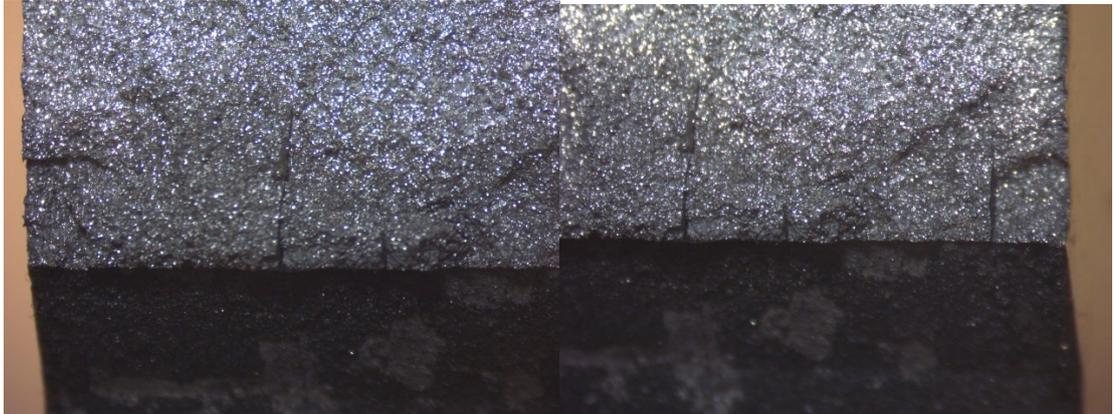


Fig.90 e 91: Vista superior do corpo de prova caldeado, com microtrincas.

Acima podemos observar que surgiram 4 microtrincas internas:

Indo da esquerda para a direita, a primeira surgiu em 1mm da superfície lateral, com 1,3mm de comprimento. A segunda apareceu a 3,1mm da primeira, com comprimento de 2,66mm. A terceira a 1,66mm da segunda, com 0,56mm de comprimento. A quarta a 3,31mm da terceira, com 2,4mm de comprimento. Todas as medições são aproximadas pois a régua do computador não consegue fazer a forma do corpo de prova para conseguir os valores exatos.

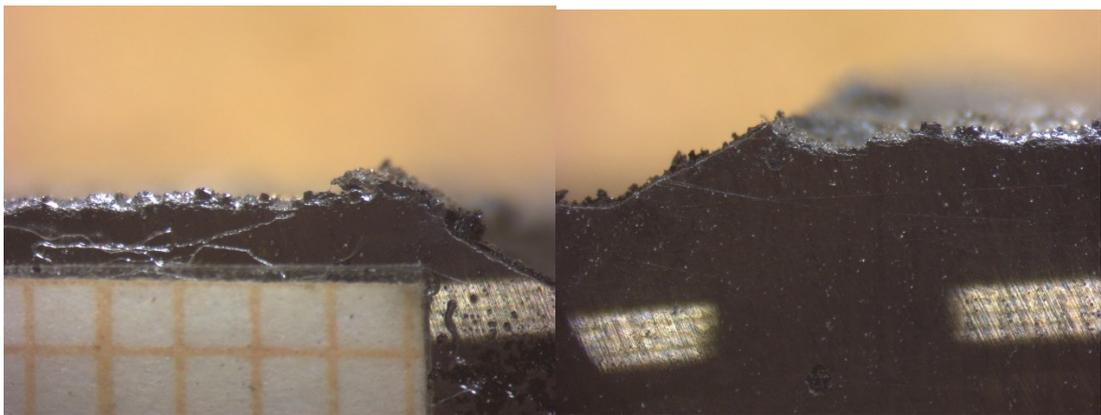


Fig.92 e 93: Vista frontal do corpo de prova caldeado, sem nenhuma microtrinca.

Na figura 92 parecia haver microtrincas também, mas depois foi visto que era apenas fios transparentes, podendo ter saído do durex ou do papel milimetrado.

Abaixo veremos os dois corpos de prova juntos para podermos compará-los ao mesmo tempo e observar que só possui microtrincas no caldeado (da direita).



Fig.94: Vista superior dos dois corpos de prova.

4.5. Metalografia

A metalografia é o estudo morfológico e estrutural dos metais, que faz análise de determinação de seus constituintes, textura e fase. Para este tipo de análise é necessário que a área esteja polida e atacada com algum reagente químico adequado para mostrar com mais facilidade os constituintes do material, ficando em destaque os grãos diversos formados com suas estruturas.

Existem duas classes de análises metalográficas para se observar o material, sendo estas microscópicas e macroscópicas:

- Microscopia: é a análise que necessita de um microscópio para ser efetuada, podendo ter aumentos de 50, 100, 200, 500, 1000, 1500 e 2500 vezes. Estes microscópios são específicos e podem ser chamados de “microscópios metalográficos ou metalúrgicos”. A área a ser analisada é pequena por isso é necessário que a superfície esteja perfeitamente plana e polida, com isso sua preparação é de extrema importância.

- **Macroscopia:** é a análise que pode ser feita no próprio olho nu, ou usando lupa ou microscópios estéreos que aumentam a área analisada, podendo variar de 5 a 64 vezes, dando uma visão mais tridimensional.

Além de análises estruturais dos metais a metalografia também nos dá a possibilidade de observar as causas de suas falhas, como desgastes, fraturas, corrosão entre outras.



Fig.95 e 96: Microscópio utilizado e corpos de prova polidos para análise.

Para o nosso estudo fizemos uma análise microscópica com aumentos de 100, 200 e 500 vezes, sendo este o maior aumento do microscópio. Como o objetivo é de comparação e não de análise a fundo do aço em si, esses aumentos já nos deu um bom resultado.

Corpo de prova comum:



Fig.97: Microestrutura do CP comum aumentada 100x.



Fig.98: Microestrutura do CP comum aumentada 200x.

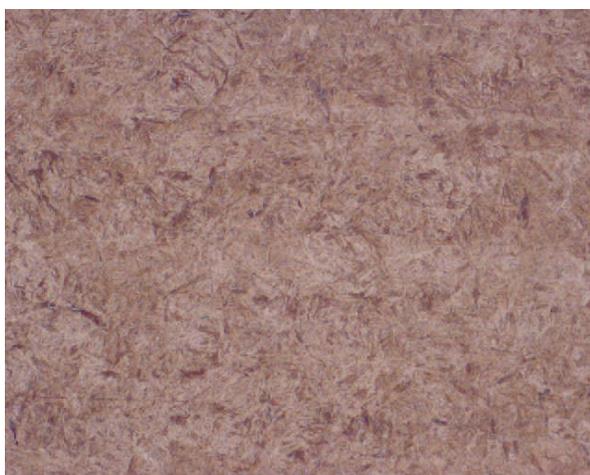


Fig.99: Microestrutura do CP comum aumentada 500x.

Os riscos observados no aumento de 100 vezes nos dizem que são linhas de deformações e isto ocorre por causa do forjamento, onde o material é prensado.

Corpo de prova caldeado:

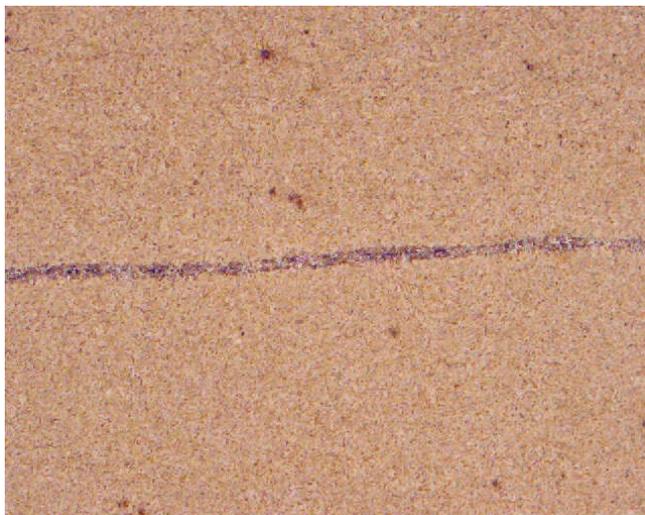


Fig.100: Microestrutura do CP caldeado aumentada 100x.

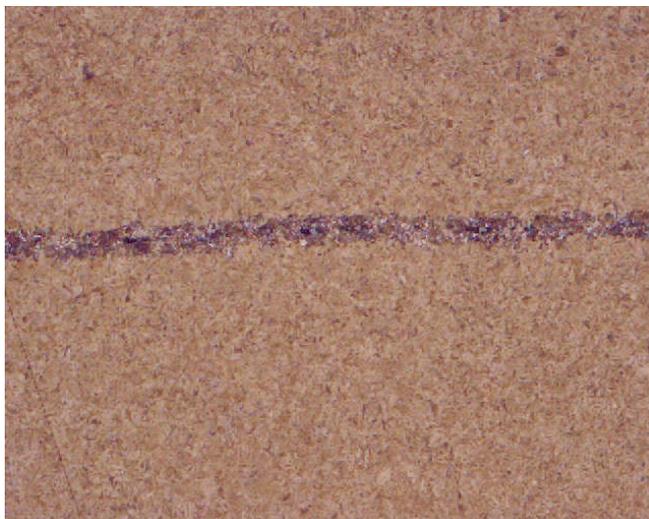


Fig.101: Microestrutura do CP caldeado aumentada 200x.

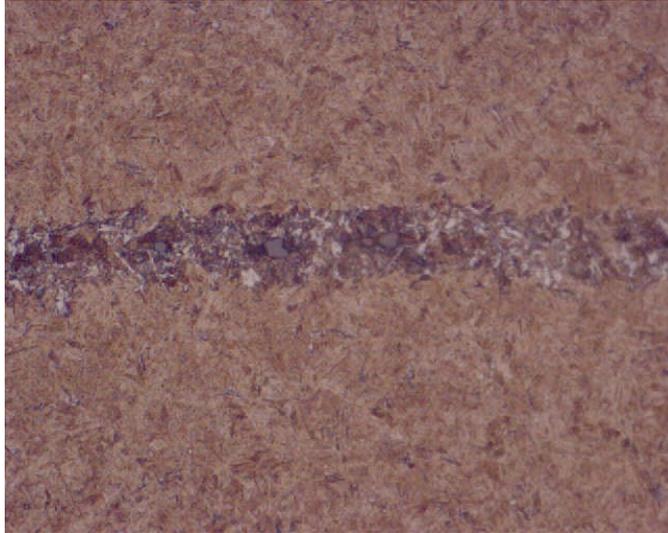


Fig.102: Microestrutura do CP caldeado aumentada 500x.

O traço no meio nos mostra que no processo de dobra ocorrido no caldeamento houve inserção de impurezas no seu forjamento e estas aparecem outras vezes, todas paralelas, confirmando que foi devido as dobras do aço.

5 CONCLUSÃO

Com análise na logística reversa e no forjamento experimental e teórico das barras chego à conclusão de que é possível forjar uma faca utilizando o processo de caldeamento para formar um aço damasco, visando melhorar seu desempenho, a partir de um feixe de mola de caminhão e, com isso, dá-se uma nova utilidade para este aço e novos fins lucrativos a sociedade.

Para criar um aço damasco uma boa maneira de se dobrar o aço é cortá-lo em barrinhas menores e soldá-las uma em cima da outra, logo se algum tipo de feixe de mola estiver trincado pode ser aproveitado a parte boa para criar estas barrinhas.

Através dos ensaios descritos anteriormente consegui obter uma série de resultados para ter uma boa comparação entre as duas barras de aço e assim poder confirmar que o caldeamento, dobrando o aço uma série de vezes para formar um aço damasco, melhora qualitativamente a faca.

No ensaio de dureza podemos ver que ambos os aços estão com durezas muito altas, de 47HC para o aço caldeado e 45,9HC para o comum em média, o que nos leva a crer que as peças são bem frágeis e poderão ter pouca ou nenhuma deformação plástica. Esta dureza alta se deve ao fato de as barras estarem temperadas e suas variações de valores no ensaio são justificadas por ter sido feito através de um ferreiro e à mão, sem muitos utensílios para ajuda-lo logo um lado pode ter aquecido um pouco mais do que o outro, não tendo meios para se averiguar se a barra está homogeneamente com a mesma temperatura.

O ensaio de tração nos faz concluir que o caldeamento do aço melhora sim qualitativamente a sua resistência a tração, dando um aumento significativo no aço tanto na tensão quanto na deformação. Mas ao mesmo tempo diminui seu módulo de elasticidade e continua se rompendo sem haver deformação plástica, o que mostra a necessidade da inserção de um aço mais tenaz em suas camadas na hora

de fazer seu caldeamento para assim melhorar sua tenacidade e aumentar seu módulo de elasticidade e plasticidade.

Buscando em sites foi encontrado que um valor para o módulo de elasticidade do aço 5160 é em média de 200GPa enquanto o gerado deu 8,6GPa no aço comum e 7,1GPa no aço damasco. Isto mostra o quanto o forjamento e o tratamento térmico influenciam em cima disso, diminuindo bastante e seu caldeamento ajuda a diminuir mais um pouco. Já o limite de escoamento para este aço quando normalizado é de 530Mpa e recozido é de 275MPa, ao forjá-lo e tratá-lo termicamente passa para 749,4Mpa no aço comum e 1174MPa no aço damasco (caldeado), mostrando uma melhora significativa, principalmente ao caldear dando um valor um pouco maior do que o dobro do aço normalizado.

Todos os corpos de prova se romperam nos cantos da parte mais fina dos corpos, ao invés de romper em seu centro. Isso pode nos levar a pensar que houve uma ligeira variação da usinagem no momento da passagem do chanfro para a parte mais fina, determinando uma área minimamente mais fina e assim se tornando a área de rompimento. O rompimento ocorreu diretamente após a elasticidade, sem haver plasticidade, o que era de se esperar devido a alta dureza do material.

Com o ensaio Charpy podemos concluir que ambos os aços possuem baixa resistência ao impacto, sendo bastante frágeis (já esperado devido as suas durezas). O aço dito comum obteve uma resistência média de 4J, enquanto o aço damasco (caldeado) de 5,5J (diferença de 1,5J), mostrando uma melhora qualitativa para o aço damasco, mas não sendo uma melhora muito significativa pois este continua muito frágil.

O de fadiga tinha por objetivo mostrar a diferença da propagação de trinca das duas barras, mas como ambas romperam totalmente após o início da trinca não foi possível efetuar esta análise, tendo que observar outros casos. Com o rompimento total em ambos os corpos de prova, nos mostrou que os dois estavam muito duros e pouco tenazes, o que já era de se esperar devido aos outros ensaios. Mas o corpo de prova comum se rompeu em 946 ciclos e o caldeado em 2550 ciclos e isto mostra o quão resistente o aço damasco se tornou com relação ao comum. Ao romper foi visto que o aço damasco estava com algumas microtrincas em seu

interior e isto nos mostra que o material tentou resistir um pouco antes de fraturar completamente. Logo podemos concluir que o aço ao ser caldeado sofreu uma melhora significativa, tendo uma resistência a fadiga de mais do que o dobro, apesar de também se romper completamente.

Na metalografia vemos que a matriz é toda martensita e isso se deve ao fato dele ser temperado, sendo igual nas duas barras, mostrando que o caldeamento não interferiu nesta microestrutura. Ao observar o corpo de prova caldeado, vemos alguns traços paralelos e isto se deve ao fato de ter entrado impurezas no momento que ocorreram as dobras. Estas impurezas podem ter entrado junto com o bórax (tetraborato de sódio), sendo esse mostrado em branco no aumento de 500 vezes mais alguma reação dele com o aço ou com o ambiente, podendo também ter ficado algum óxido de ferro. Estas impurezas são sempre mais tenazes e isso nos confirma um dos motivos da melhora do aço, como mostrado nos ensaios, mesmo tendo uma maior dureza.

Assim podemos ver que em um forjamento de uma faca, ao caldeá-la dobrando suas partes ocorre uma melhora qualitativa no aço, confirmando que um aço damasco é um aço realmente superior ao comum.

Um ponto que ajudaria para aumentar a tenacidade era fazer o revenimento após a têmpera, isso diminuiria um pouco sua fragilidade. Podemos sugerir também que se inserirmos camadas alternadas de um aço mais tenaz no caldeamento poderá deixá-lo mais dúctil, o melhorando mais ainda, mas sempre haverá a questão de que estas camadas devem estar muito bem soldadas umas nas outras, trazendo um grande peso para o ferreiro que irá produzir e assim favorecendo aqueles que possuem maiores experiências.

Outro ponto mostrado é que no forjamento de uma faca é difícil de ter uma homogeneidade nela inteira, o que nos leva a pensar em alguns artifícios para melhorar isto, como por exemplo: um termômetro digital infravermelho medindo a temperatura de todas as partes da faca na hora da têmpera para ter certeza de que ela está por inteira com a mesma temperatura e não apenas observando sua cor; prensa hidráulica mais precisa, com alguma definição para força aplicada, assim terá um forjamento mais uniforme; pensar em meios de se automatizar esta linha de

produção da faca. Assim teria um produto reutilizável podendo ser vendido a um valor superior aos comuns, melhorando a economia do país, o meio ambiente e lucrando com isto.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

JAIME TUPIASSÚ PINHO DE CASTRO. MARCO ANTONIO MEGGIOLARO., **Fadiga - Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço: Volume I - Iniciação de Trincas; Volume II – Propagação de Trincas, Efeitos Térmicos e Estocásticos** – LIVRO, 2009.

LUCIANO MONTEIRO RODRIGUES. CARLOS HENRIQUE REIS DOS SANTOS. RODRIGO RIBEIRO VELOSO. MARIANNE VIEIRA LEMOS. CLAUDINEI DOS SANTOS. RICARDO DE FREITAS CABRAL., **Estudo da microestrutura e da microdureza dos aços 1020 e 1060** – Artigo Original, Cadernos UniFOA – Edição Especial do Curso de Mestrado Profissional em Materiais, 2014.

CHRISTIAN SLAUGHTER, **Espada de damasco. Um produto da civilização Islâmica** – Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade de São Paulo, 2014.

¹ANTONIA MARIA GIMENES. ²MARCO ANTÔNIO F. DAVID. ³MARCIO FERREIRA. ⁴VICTOR DEIRÓ B. N., **Logística Reversa de peças e sucatas automotiva no Brasil** - FACULDADE INESUL, 2017.

THIAGO OLIVEIRA DOS SANTOS. JULIANA CORTEZ BARBOSA. DANIEL VILLAS BÔAS. ALEXANDRE JORGE DUARTE DE SOUZA., **Utilização de aços recicláveis na fabricação de facas radiais para corte longitudinal de bambu** – Artigo Original – Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 15, n. 1, p. 15-21, jan./mar. 2018

CLEBER MICHEL CHIQUETI, **Estudo das Distorções em Aços AISI 5160 e AISI 6150 com Variação da Temperatura e da Agitação do Meio de Resfriamento** – Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009

[1] – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES – www.anfavea.com.br/

[2] – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – www.ibge.gov.br/

[3] – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM International – www.astm.org/