

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA - CAMPUS JARAGUÁ DO SUL - RAU
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA

THIAGO MANOEL NOVACK MOTA

ESTUDO DOS EFEITOS DO AQUECIMENTO EM BAIXAS TEMPERATURAS NAS
ALTERAÇÕES DA RESISTÊNCIA MECÂNICA E USINABILIDADE DO AÇO ABNT

4140

JARAGUÁ DO SUL

FEVEREIRO DE 2022

THIAGO MANOEL NOVACK MOTA

ESTUDO DOS EFEITOS DO AQUECIMENTO EM BAIXAS TEMPERATURAS NAS
ALTERAÇÕES DA RESISTÊNCIA MECÂNICA E USINABILIDADE DO AÇO ABNT

4140

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso Superior de Tecnologia em
Fabricação Mecânica do Campus Jaraguá do
Sul – Rau, do Instituto Federal de Santa
Catarina como requisito parcial para a
obtenção do diploma de Tecnólogo em
Fabricação Mecânica.

Orientador: (Tiago da Silva, Mestre)

JARAGUÁ DO SUL

FEVEREIRO DE 2022

(a ficha catalográfica deverá ser gerada pelo próprio aluno em
<http://gw.ifsc.edu.br/ficha>)

P 324f	Paula, Joãozinho de.
Ficha catalográfica para trabalhos acadêmicos /	
Joãozinho de	Paula. - Florianópolis, 2015.
100p.	
Monografia (graduação) - Instituto	
Federal de Santa Catarina,	
Câmpus Florianópolis, Curso de Metodologia	
do Trabalho Acadêmico,	
Florianópolis, 2015.	
Orientador: Mariazinha da Silva	
1. Metodologia. 2. Métodos de estudo. 3.	
Pesquisa. 4. Trabalhos científicos. I. Mariazinha da Silva.	
II. Título	
CDD 001.4	

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, por meio do
programa de geração automática do câmpus Rau, do IFSC

THIAGO MANOEL NOVACK MOTA

ESTUDO DOS EFEITOS DO AQUECIMENTO EM BAIXAS TEMPERATURAS NAS
ALTERAÇÕES DA RESISTÊNCIA MECÂNICA E USINABILIDADE DO AÇO ABNT
4140

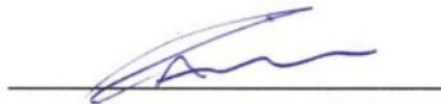
Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnólogo em
Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo
indicada.

Jaraguá do Sul, 11 de fevereiro de 2022

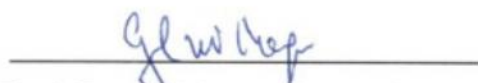


Prof. Tiago da Silva, Mestre
Orientador

IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU



Prof. Cassiano Rodrigues Moura, Me.
IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU



Prof. Dr. Gil Magno Portal Chagas
IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU

RESUMO

A utilização de tratamentos térmicos para alterar as características dos materiais é utilizada com frequência nos processos produtivos. Porém, por seu alto custo na maioria dos casos, tornam-se inviáveis se for visado somente para melhorar as características de usinabilidade. Portanto, caso ele seja realizado com um custo menor, pode ser gerada uma usinagem mais eficiente e de menor custo. Assim, este trabalho tem como objetivo estudar a possibilidade do aço ABNT 4140 ter suas propriedades mecânicas e usinabilidade alteradas pelo aquecimento em baixas temperaturas similar ao aquecimento pela exposição a energia térmica solar. Deste modo o aço ABNT 4140 será separado em 3 condições, a primeira será a de controle, a segunda a usinagem será feita antes do tratamento e a terceira o tratamento será feito antes da usinagem. O tratamento térmico será efetuado em um forno elétrico, serão feitos ciclos de aquecimento para simular a variação da temperatura similar ao aquecimento a exposição ao sol. As diferentes condições serão comparadas em relação ao desgaste da ferramenta, rugosidade do material após a usinagem e ensaio de tração.

Palavras-Chave: Usinagem. ABNT 4140. Desgaste de ferramenta.

ABSTRACT

The use of heat treatments to change the characteristics of materials is frequently used in production processes. However, due to their high cost in most cases, they become unviable if it is aimed only to improve the machinability characteristics. Therefore, if it is performed at a lower cost, a more efficient and lower cost machining can be generated. Thus, this work aims to study the possibility of ABNT 4140 steel having its mechanical properties and machinability changed by heating at low temperatures similar to heating by exposure to solar thermal energy. In this way the ABNT 4140 steel will be separated into 3 conditions, the first will be the control, the second the machining will be done before the treatment and the third the treatment will be done before the machining. The heat treatment will be carried out in an electric oven, heating cycles will be performed to simulate temperature variation similar to heating and exposure to the sun. The different conditions will be compared in relation to tool wear, material roughness after machining and traction test.

Keywords: Machining. ABNT 4140. Tool wears.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de fase Fe-C indicando temperaturas de tratamento térmico para aços comuns.....	15
Figura 2 - Tempo de formação de 100% dos precipitados.....	16
Figura 3 - Variação da dureza durante o envelhecimento.....	16
Figura 4 – Exemplo de gráfico tensão x deformação.....	18
Figura 5 – Corpos de prova para o ensaio de tração.....	18
Figura 6 - Sugestão dimensional dos corpos de prova.....	19
Figura 7 – Diagrama de torneamento.....	20
Figura 8 – Diagrama de rugosidade média.....	21
Figura 9 – Desgaste de flanco.....	21
Figura 10 – Desgaste de entalhe.....	22
Figura 11 – Desgaste de cratera.....	22
Figura 12 - Deformação plástica.....	23
Figura 13 – Trinca por esforço mecânico.....	23
Figura 14 – Trinca por variação de temperatura.....	24
Figura 15 - Medição do desgaste.....	24
Figura 16 – Aresta postiça de corte.....	26
Figura 17 – Comparativo de usinabilidade em aço ABNT 4140 em diversas condições.....	29
Figura 18 – Estrutura dos processos das condições avaliadas.....	30
Figura 19 – Corpo de prova do ensaio de tração.....	31
Figura 20 – Torno CNC Romi GL 240.....	31
Figura 21 – Ferramenta de corte.....	32
Figura 22 – Material exposto ao sol.....	33
Figura 23 - Câmera térmica.....	33
Figura 24 – Foto térmica.....	34
Figura 25 - Representação dos ciclos de temperatura.....	35
Figura 26 – Corpo de prova após forno e usinagem.....	35
Figura 27 – Forno elétrico.....	35
Figura 28 - Dimensões do estaleiro.....	36
Figura 29 - Máquina de ensaios.....	36

Figura 30 - Estereoscópio.....	37
Figura 31 - Rugosímetro TR210.....	37
Figura 32 – Conjunto de material reservado.....	38
Figura 33 – Corpo de prova após ensaio de tração.....	38
Figura 34 – Resultado do ensaio de tração no corpo de prova com tratamento anterior a usinagem 1.....	39
Figura 35 - Gráfico comparativo de alongamento %.....	40
Figura 36 - Gráfico comparativo de tensão de escoamento.....	40
Figura 37 - Gráfico comparativo de tensão máxima de tração.....	41
Figura 38 – Quadro dos desgastes da condição de usinagem de baixo volume.....	42
Figura 39 – Comparativo dos desgastes nas ferramentas de baixo volume (50.000 mm ³).....	43
Figura 40 – Desgaste comparativo na condição de usinagem de alto volume.....	43
Figura 41 – Comparativo dos desgastes nas ferramentas de alto volume (159.000 mm ³).....	44
Figura 42 - Medições de rugosidade.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

MPa – Mega Pascal (kN/mm^2)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Objetivos.....	12
1.1.1 Objetivo geral.....	12
1.1.2 Objetivo específico.....	12
2 DESENVOLVIMENTO.....	13
2.1 Tratamento térmico.....	13
2.1.1 Normalização e Recozimento.....	14
2.1.2 Envelhecimento.....	15
2.2 Ensaaios Mecânicos.....	17
2.2.1 Ensaio de tração.....	17
2.3 Usinagem.....	19
2.3.1 Rugosidade.....	20
2.3.2 Desgaste.....	21
2.3.3 Usinabilidade.....	27
3 METODOLOGIA.....	30
3.1 Material.....	30
3.2 Tratamento térmico.....	33
3.3 Ensaio de tração.....	36
3.4 Desgaste.....	37
3.5 Rugosidade.....	37
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	38
4.1 Usinagem.....	38
4.2 Ensaaios de tração.....	38
4.3 Desgaste da ferramenta.....	42
4.4 Rugosidade.....	45
5 CONCLUSÃO.....	46

1 INTRODUÇÃO

Segundo Chiaverini (1986) os tratamentos térmicos são essenciais para a indústria como um todo, a maior parte das operações e atividades são somente possíveis por conta dos tratamentos térmicos e termoquímicos, além disso sua utilização pode fazer com que materiais obtenham propriedades mecânicas desejadas em vista alguma aplicação.

Dentre estes tratamentos existe o recozimento, que, segundo Callister (2002), consiste em elevar a temperatura do material até atingir alguma faixa desejada, manter nessa temperatura por um tempo determinado, depois resfriar lentamente.

Segundo Chiaverini (1954), um dos tipos de recozimento é o recozimento para alívio de tensões, que é recomendado após qualquer processo de conformação a frio, usinagem ou soldagem, para aliviar as tensões geradas por estas atividades, tensões estas que começam a ser aliviadas com temperaturas logo acima da temperatura ambiente, não ditando nenhuma margem mínima que o material deve ser aquecido, somente a temperatura aconselhada de 500°C.

Outro processo importante dentro da indústria é a usinagem, segundo Groover (2016), é o processo de fabricação que em geral utiliza uma ferramenta afiada para remover material com isso produzindo a peça na geometria desejada, é o mais versátil e preciso dentre todos os processos de fabricação, tendo a capacidade de produzir peças com características com geometria muito diversas, porém, uma de suas desvantagens é o consumo de ferramentas e o tempo da usinagem em si, portanto otimizar a vida das ferramentas ou permiti-las usinarem mais material faria a usinagem mais eficiente.

Segundo Callister (1982), o fator que melhor caracteriza a usinabilidade em aços é a microestrutura, se ela for modificada pode-se facilmente obter-se uma usinabilidade diferente, um dos exemplos que ele traz é da usinagem do aço ABNT 4140 que dependendo das condições de corte pode ter a vida da ferramenta aumenta em até 58% comparando material normalizado com material recozido, afirmando assim que o recozimento pode gerar uma grande melhora na usinagem deste aço.

Para o material ser recozido com a temperatura próxima a zona de

austenitização, ou, mesmo a temperatura de 500°C recomendada, é consumido uma grande quantidade de energia que se transfigura em custo do produto. Sendo assim, caso o recozimento possa ser realizado em baixa temperatura reduziria o custo além da redução de impacto ambiental por utilizar uma menor quantidade de energia.

Na pesquisa bibliográfica para este trabalho não foram encontrados estudos analisando a viabilidade de realizar este tratamento com baixas temperaturas para a utilização no processo de usinagem. Então, sabendo do potencial térmico da energia solar, viu-se a possibilidade de avaliar um possível efeito do aquecimento similar à energia solar na usinabilidade e propriedades mecânicas do aço.

A prática de se deixar materiais expostos à incidência solar é empírica e metodológica pois não há estudos científicos que comprovem a eficiência desta prática, na melhoria da usinabilidade dos materiais.

Portanto, o objetivo deste trabalho é buscar indícios se o aquecimento similar à energia térmica solar pode gerar alterações nas propriedades mecânicas e na usinabilidade que material aço ABNT 4140.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Estudar a possibilidade de o aço ABNT 4140 ter as suas propriedades mecânicas e usinabilidade alteradas pelo aquecimento em baixas temperaturas similar ao aquecimento pela exposição a energia térmica solar.

1.1.2 Objetivo específico

- Mensurar a quantidade de temperatura que o material é exposto.
- Estudar as mudanças nas propriedades mecânicas que essa exposição causa.
- Analisar se o tratamento gera variações no desgaste da ferramenta e rugosidade.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Tratamentos térmico

Segundo Chiaverini (1977), tratamentos térmicos são utilizados para minimizar e eliminar condições indesejadas na microestrutura do aço, deixadas por operações anteriores, como usinagem ou fundição, para permitir que o material esteja o melhor adequado para sua aplicação. Estes tratamentos têm entre vários objetivos: redução de tensões internas; melhora da dureza do material; aumento da resistência mecânica; melhora da ductilidade; melhora da usinabilidade; entre várias outras. De acordo com o mesmo autor os parâmetros que são importantes para a realização dos tratamentos térmicos são:

- Aquecimento; que é fundamental para as modificações da microestrutura desejadas, e determinam em quanto tempo o material atingirá a temperatura desejada, aquecimentos muito acelerados podem causar danos ao material como empenamento ou fissuras, aquecimentos lentos aumentam muito o tamanho do grão, o que reduz a resistência mecânica do material.
- Temperatura de aquecimento; possibilita as mudanças requisitadas na estrutura do material, dependendo do tratamento a ser realizado, em geral é mantido uma margem acima do patamar para garantir que o material esteja na fase desejada. Porém, como falado anteriormente, quanto maior a temperatura maior o tamanho do grão metálico, o que pode piorar o resultado dependendo da aplicação deste material.
- Tempo de permanência na temperatura; deve ser suficiente para que a peça se aqueça de forma uniforme, ou seja, garantindo que a temperatura de aquecimento seja a mesma ou próxima por toda a seção do material.
- Ambiente de aquecimento; aços oxidam e sofrem descarbonetação com mais facilidade em altas temperaturas, o que é prejudicial a qualidade do material, então é empregada uma atmosfera protetora para que a peça não seja afetada por estes fenômenos.
- Resfriamento; em geral determina a condição final da peça, sendo um parâmetro mais importante segundo o autor, para aços, quanto mais brusca for esse resfriamento resultará em um material com mais tensões internas, por

consequência com maior dureza, porém, caso a peça tenha uma geometria muito fina isto pode causar falhas nela, então deve-se buscar uma forma mais adequada para resfriar. Caso o resfriamento seja mais brando o resultado em geral é uma microestrutura com menores tensões internas, menor dureza, maior ductilidade e em geral mais fácil usinabilidade.

Segundo Chiaverini (1977), o tratamento térmico de têmpera é o mais importante para aços, ele consiste em elevar a temperatura acima do ponto de recristalização e resfriar bruscamente em água ou óleo, garantindo um grau alto de tensões internas tendo assim maior dureza, menor deformação, resistência ao desgaste e mecânica. Porém, pelo grande aumento de dureza é necessário após a têmpera um tratamento chamado de revenimento, para aliviar o excesso de tensões internas, ao preço de um pouco de redução na dureza.

2.1.1 Normalização e Recozimento

Para aços, Chiaverini (1977) e Callister (2000) afirmam que a normalização é um tratamento térmico que consiste em aquecer o material em temperaturas acima do ponto de recristalização por um tempo suficiente e após isso resfriar o material ao ar, o que garante uma microestrutura mais refinada, este tratamento é indicado para peças que foram laminadas ou que sofreram processos de deformação mecânica ou fundição, com a finalidade de homogeneizar sua microestrutura.

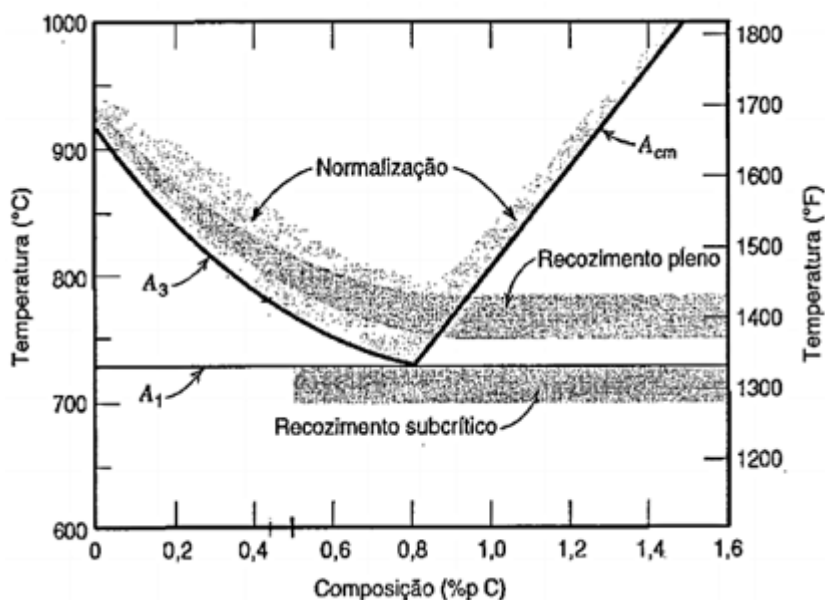
Segundo Callister (2000), dentro dos tratamentos térmicos existem os tratamentos de recozimento, que tem como principal objetivo aliviar tensões, tornar o material mais macio, tenaz e/ou dúctil e produzir alguma microestrutura específica desejada.

De acordo com Chiaverini (1955), o recozimento pode ser realizado em temperaturas abaixo do ponto de recristalização, chamados de subcríticos, tem seu objetivo retirar ou reduzir tensões mecânicas ou soldadas, ou que foram cortadas com chama, esta pode ser realizada com temperaturas acima dos 500 °C.

O recozimento pleno é empregado em aços que ainda serão usinados ou conformados mecanicamente e sua temperatura é elevada acima do ponto de recristalização e seu resfriamento no forno, porém, o resultado é uma microestrutura

mais grosseira em relação a normalização. As faixas de temperatura de alguns dos tratamentos térmicos citados acima podem ser vistas na figura 1.

Figura 1 – Diagrama de fase Fe-C indicando temperaturas de tratamento térmico para aços comuns

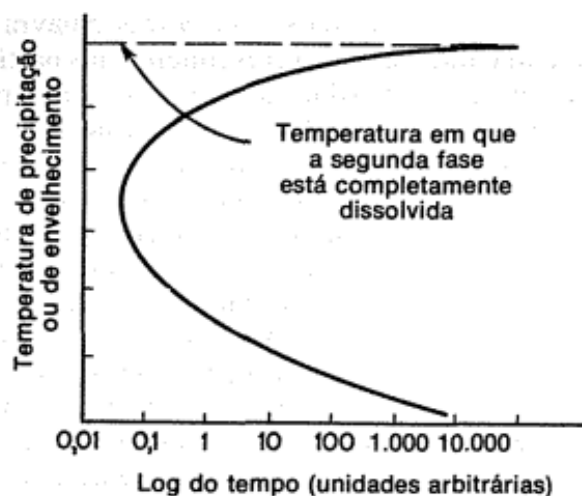


Fonte: Callister (2000)

2.1.2 Envelhecimento

De acordo com Reed-Hill (1973), o envelhecimento é um tratamento térmico que em aços funciona a partir do processo de precipitação da cementita possível quando há ferrita supersaturada. A cementita é muito dura, por sua maior presença o metal se torna mais duro. A velocidade de precipitação varia com a temperatura da seguinte forma: a) Valores baixos de temperatura necessitam de longos períodos de tempo para completarem a precipitação. b) Temperaturas muito altas existe menos ferrita supersaturada, então a reação acontece menos. c) Temperaturas intermediárias o efeito acontece com uma maior velocidade com menos tempo necessário para completar a precipitação. Como demonstra a figura 2.

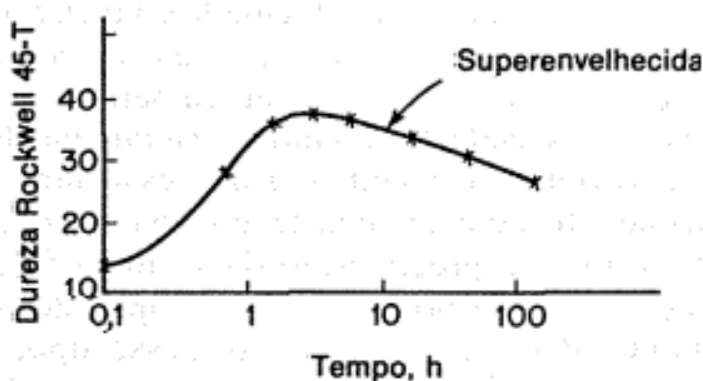
Figura 2 - Tempo de formação de 100% dos precipitados



Fonte: Reed-hill

Segundo Reed-Hill (1973), este efeito tem seu valor máximo de dureza, se o tratamento continuar por longos períodos a dureza é reduzida, representado na figura 3, este processo é chamado de superenvelhecimento. Causado pelo crescimento contínuo dos precipitados que ocorre quando o metal é mantido na temperatura do tratamento. Já que a tendência é o grão aumentar com o passar do tratamento. Este aumento dos grãos em média torna o material menos duro.

Figura 3 - Variação da dureza durante o envelhecimento



Fonte: Reed-hill (1973) Dados de Wert, C., ASM Seminar, Thermodynamics In Physical Metallurgy, 1950.)

2.2 Ensaios Mecânicos

Ensaios mecânicos são procedimentos padronizados que segundo, Souza (1982), são utilizados para determinar as propriedades mecânicas de um material, estes podem ser destrutivos, que inutilizam este material, ou não destrutivos, esta segunda categoria é utilizada para determinar pequenas trincas ou falhas internas no material. Dentre ensaios destrutivos há ensaios de tração, compressão, flexão, dobramento, impacto, fadiga e entre outros.

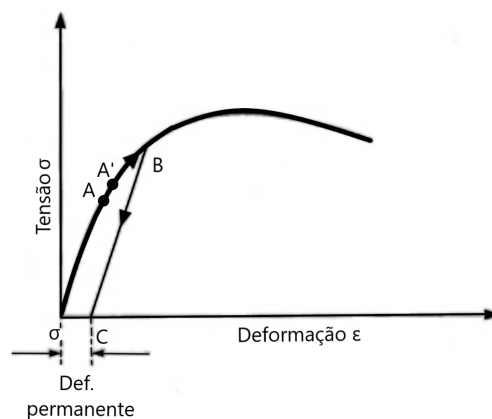
Existe o ensaio de dureza, que embora nem sempre inutilize o material ele também é considerado um ensaio destrutivo. Ensaios não destrutivos tem-se ensaios com raios X, ultrassom, Magnaflux.

Segundo ABNT NBR ISO 6892-1:2013 (VERSÃO CORRIGIDA 2:2018) estes procedimentos dependem de normas e padrões para poderem resultar em resultados confiáveis e repetíveis.

2.2.1 Ensaio de tração

Em um ensaio de tração o material utilizado no teste é confeccionado em uma forma dimensional específica, chamada corpo de prova, sua geometria propicia uma deformação homogênea além de gerar um teste repetível e comparável. Este corpo de prova é fixado em uma máquina que o submete a esforços crescentes e axiais, com a intenção de alongá-lo até o momento de sua ruptura. Este ensaio obtém com precisão a resistência à tração do material, além de mostrar sua deformação em resposta a carga crescente aplicada ao corpo de prova, gerando assim um gráfico de Tração x Deformação, como mostrado da Figura 4. Também há a redução de área inerente ao alongamento do material, gerando uma estricção logo antes do rompimento.

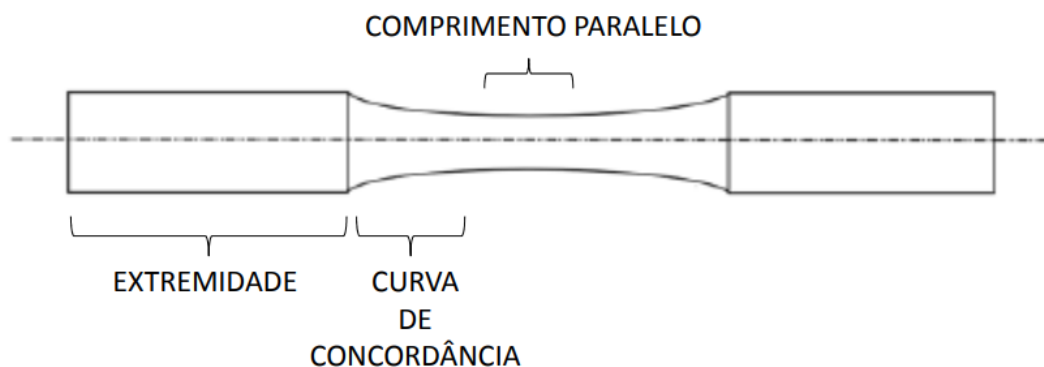
Figura 4 – Exemplo de gráfico tensão x deformação



Fonte: Souza (1982)

Outro ponto importante para a repetibilidade do ensaio é o corpo de prova, este em geral deve ser confeccionado seguindo as normas vigentes, segundo a ABNT NBR ISO 6892-1:2013 (VERSÃO CORRIGIDA 2:2018) em corpos de prova usinados é necessário o corpo de prova ter a curva de concordância, a figura 5 mostra o corpo de prova usinado com perfil redondo utilizado para ensaios de tração.

Figura 5 – Corpos de prova para o ensaio de tração

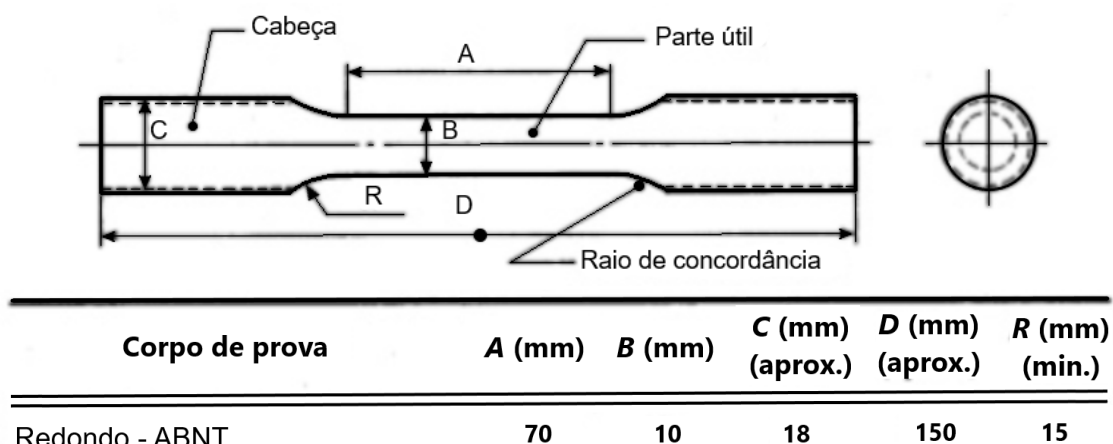


Fonte: ABNT NBR ISO 6892-2 (2018)

As medidas utilizadas para os corpos de prova foram adquiridas segundo a

sugestão de Souza (1982), mostradas na figura 6.

Figura 6 – Sugestão dimensional dos corpos de prova



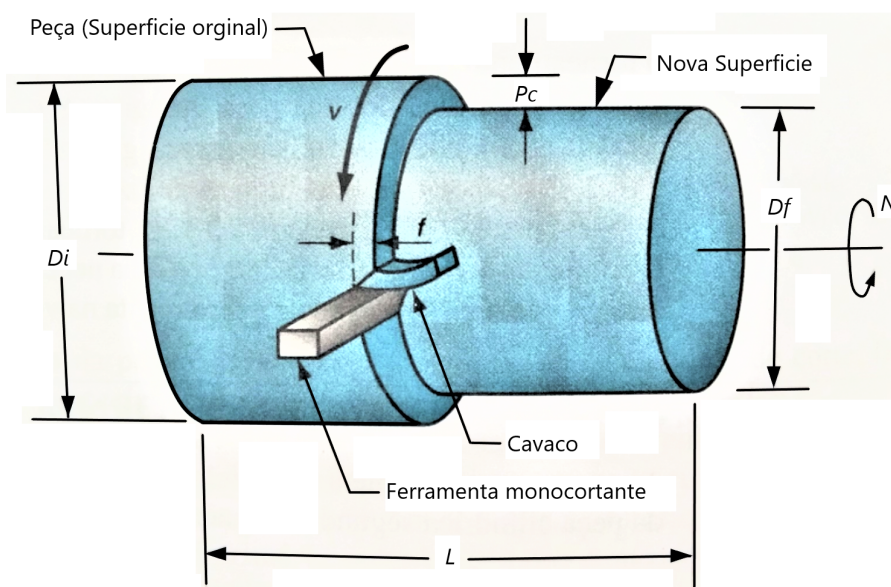
Fonte: Adaptado de Souza (1982)

2.3 Usinagem

Segundo Groover (2016) usinagem é um processo de fabricação que consiste em utilizar uma aresta afiada para remover material até que ele gere um produto com as dimensões desejadas. Tem abrangência em relação a materiais usinados, tem grande variedade de geometrias que ele pode gerar, alta precisão dimensional e bons acabamentos superficiais, além de ser um dos principais processos de fabricação na atualidade.

De acordo com Groover (2016) uma das principais operações de usinagem é chamado torneamento e é baseado em uma ferramenta que remove material de uma peça que rotaciona e esta ferramenta se move linearmente em paralelo ao eixo da peça criando assim um perfil cilíndrico neste material, este processo pode ser observado na figura 7.

Figura 7 – Diagrama de torneamento



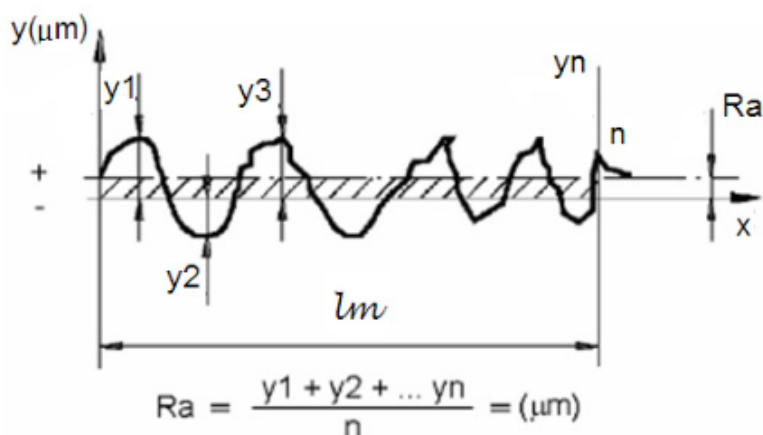
Fonte: Adaptado de Groover (2016)

2.3.1 Rugosidade

De acordo com Groover (2016) rugosidade é a textura da peça usinada, que define o acabamento da peça e é influenciado pelos seguintes fatores: a) Geometria do corte. b) Material usinado. c) Vibração da máquina e da fixação da ferramenta. Em relação ao corte em si as seguintes variáveis podem ser modificadas e impactam na rugosidade: a) Tipo da operação. b) Geometria da ferramenta de corte, especialmente o raio de ponta. c) Avanço

Dentre as formas de quantificar a rugosidade segundo a ABNT 4287 (2005) pode-se utilizar um método chamado desvio aritmético médio do perfil avaliado, que pode ser explicado como os valores médios da altura dos picos e da profundidade dos vales, o diagrama de representação de rugosidade média (R_a) pode ser observado na figura 8.

Figura 8 – Diagrama de rugosidade média



Fonte: Piratelli (2011)

2.3.2 Desgaste

Segundo Diniz (2013) são diversos tipos de desgastes e avarias que podem ocorrer em uma ferramenta de usinagem, eles são:

- Desgaste de flanco ou frontal; ocorre na superfície de folga entre a ferramenta e a peça, como mostrado na figura 9, sendo o mais comum dos tipos de desgaste, acontecendo em todas as formas de usinagem que utilizam ferramentas, seu desgaste faz com que a aresta de corte se retraia mudando a dimensão da peça usinada, é principalmente influenciado pela velocidade de corte, porém, caso houver a criação de aresta postiça de corte o aumento da velocidade de corte faz o desgaste reduzir.

Figura 9 – Desgaste de flanco



Fonte: Sandvik (2021)

- Desgaste de entalhe: em algumas ocasiões acontece o desgaste dos dois extremos de contato entre a peça e a ferramenta, representado na figura 10, ou seja, as laterais de onde ocorre o desgaste de flanco. Influenciado pela velocidade de corte, mas também pelo aumento da temperatura.

Figura 10 – Desgaste de entalhe



Fonte: Sandvik (2021)

- Desgaste de cratera: acontece na superfície de saída da ferramenta onde há atrito entre ela e o cavaco, mostrada na figura 11, não acontece em todos os processos de usinagem e várias ferramentas como metal duro recoberto, ferramentas cerâmicas ou o material usinado gera cavacos curtos. O crescimento desta cratera pode ocasionar a quebra da ferramenta caso ela se encontre com o desgaste de flanco.

Figura 11 – Desgaste de cratera



Fonte: Sandvik (2021)

- Deformação plástica na aresta de corte; é causado muitas vezes por muita pressão aplicada na ponta da ferramenta, somada com uma alta temperatura acaba gerando deformação plástica na aresta de corte. Essa deformação muda a geometria da aresta, representada na figura 12, fazendo com que ela tenha problemas com geração de cavaco e acabamento superficial, essa deformação se for acentuada pode gerar a quebra da ferramenta de corte. Pode ser evitado pela substituição da ferramenta por uma com maior dureza quando quente, resistência à deformação além da mudança de parâmetros do corte.

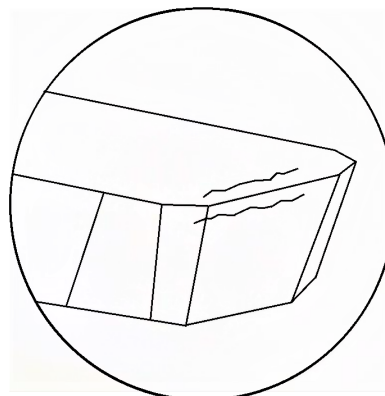
Figura 12 – Deformação plástica



Fonte: Sandvik (2021)

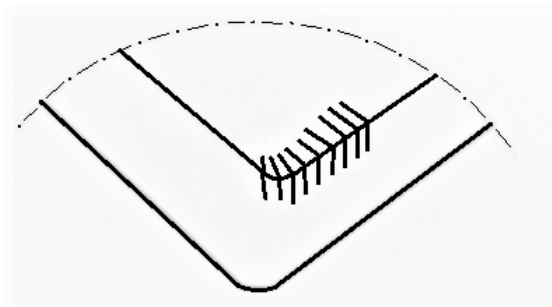
Além disso, há trincas por esforço mecânico e por variação na temperatura de corte que podem ser vistas nas figuras 13 e 14, respectivamente.

Figura 13 – Trinca por esforço mecânico



Fonte: Diniz (2013)

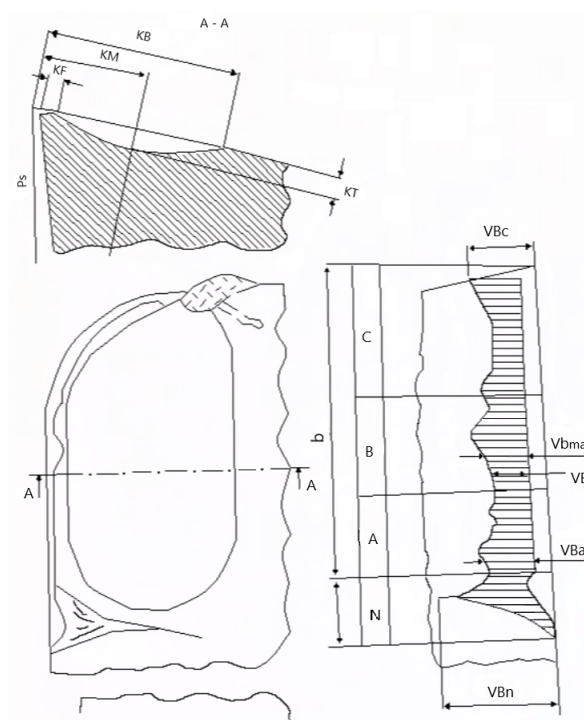
Figura 14 – Trinca por variação de temperatura



Fonte: Diniz (2013)

A partir disto é necessário quantificar este desgaste, segundo Diniz (2013) convencionou-se medir o desgaste no plano ortogonal da ferramenta, distinguem-se os desgastes na superfície de saída e na superfície de folga da ferramenta, conforme mostrado na figura 15 e a legenda na tabela 2.

Figura 15 - Medição do desgaste



Fonte: Diniz (2013)

Tabela 2 – Símbolos de medição de desgaste

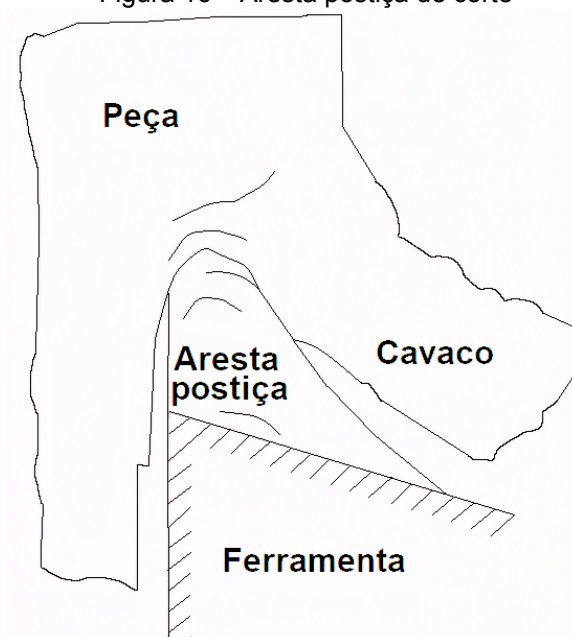
Símbolo	Significado
KT	Profundidade da cratera
KB	Largura da cratera
KM	Distância do centro da cratera à aresta de corte
VB	Desgaste de flanco
VBmax	Largura máxima do desgaste de flanco
VBn e VBc	Desgaste gerado na superfície de folga N

Fonte: Autor (2021)

Os mecanismos que causam o desgaste, segundo Diniz (2013) podem ser:

- Aresta postiça de corte; durante a usinagem é possível que uma camada de cavaco permaneça junto a aresta de corte, aderida nela, sob a pressão da zona de aderência ela mantém seu contato por tempo o suficiente para se soldar na ferramenta. Com o fluxo de cavaco este material aderido vai se deformando e encruando, formando assim uma nova aresta de corte, como mostrado na figura 16, tende a crescer gradualmente até que subitamente se rompe, esse rompimento além de danificar a ferramenta, causando um desgaste de flanco grande, também compromete o acabamento superficial no momento que é carregada pelo fluxo de cavaco, logo após seu colapso. À medida que a velocidade de corte aumenta a temperatura do corte também aumenta, quando ela ultrapassa a temperatura de recristalização do material a aresta postiça não se forma mais, afinal nessa faixa o material não se encrua mais, tornando não possível ele adquirir resistência o suficiente para se manter à frente da aresta de corte.

Figura 16 – Aresta postiça de corte



Fonte: Diniz (2013)

- Abrasão mecânica; ou atrito é uma das principais formas de desgaste da ferramenta, ele se mostra em desgaste de cratera, mas, principalmente no desgaste de flanco. Este tipo de desgaste é gerado pela abrasão da ferramenta com a peça e é incentivado pela presença de partículas de maior dureza no material da peça e também pelo aumento da temperatura do corte, que reduz a dureza da ferramenta. Ferramentas que possuem maior dureza a quente tem maior resistência a abrasão. Pode ocorrer que partículas duras se soltem de alguma parte da ferramenta sejam arrastadas pelo fluxo de cavaco e acabam por causar desgaste em outras áreas da ferramenta, se for este o caso poderá ser observado sulcos abrasivos seguindo o fluxo do cavaco.
- Aderência; caso duas superfícies metálicas forem postas em contato sob cargas moderadas, baixas temperaturas e baixas velocidades, forma entre elas um extrato metálico que provoca aderência. Esse extrato tem a resistência elevada, o suficiente para caso tentar ser separado ele causa ruptura em um dos metais e não no extrato em si, assim um dos metais agora tem esse extrato em sua superfície. Esse fenômeno pode implicar na criação de uma aresta postiça de corte, porém, ele pode causar desgaste sem a formação dela, pois esse extrato será removido da superfície do material logo em sequência pelo fluxo de cavaco e por conter partículas duras ele causará

desgaste por abrasão na parte mais à frente da ferramenta. Este fenômeno pode ser intensificado por um fluxo desigual de cavaco, seja por corte interrompido, profundidade de corte irregular ou falta de rigidez. Ele acontece principalmente em baixas velocidades, mas pode ocorrer também em altas velocidades de corte, caso exista um fluxo irregular de cavaco, causando desgaste de flanco e de cratera.

- Difusão; é um fenômeno microscópico que acontece caso o material da ferramenta e da peça tenham afinidade química e existam altas temperaturas, com essas duas características os átomos de um material ao outro, um exemplo é com ferramentas de metal duro e aço, formando carbonetos na superfície da ferramenta, que tem menos resistência que o metal duro em si, sendo removidos rapidamente por abrasão. Outro exemplo é a usinagem de aço com ferramentas de diamante, difundindo assim o carbono do diamante no ferro que compõe o aço, criando assim desgaste de cratera na ferramenta de diamante. Outro exemplo é o aço rápido, que não ocorre difusão, pois as velocidades de corte não são suficientes para que ela ocorra.
- Oxidação; quando há um conjunto entre altas temperaturas e ar ou água é provocada a oxidação na maioria dos metais. Metais como cobalto e tungstênio durante o corte formam um filme de óxidos sobre a ferramenta, que tem baixa resistência e são facilmente removidos pelo fluxo de cavaco, gerando assim mais desgaste nas ferramentas, outros materiais como alumínio que tem um óxido muito duro, que no caso não aumentaria o desgaste da ferramenta. Este mecanismo é provavelmente o causador do desgaste de entalhe.

2.3.3 Usinabilidade

Usinabilidade de acordo com Diniz (2013) pode ser definida como o grau de dificuldade de usinagem de um determinado material podendo ser comparada observando a vida útil da ferramenta, rugosidade do acabamento, esforço de corte, temperatura de corte, produtividade e até as características do cavaco. Ela depende de fatores como estado metalúrgico da peça, dureza, propriedades mecânicas, sua

composição química, operações anteriores efetuadas e encruamento.

Fatores da ferramenta também podem influenciar, como rigidez, condições de refrigeração, características da ferramenta, condições do corte como corte contínuo ou intermitente e entrada da ferramenta. A partir disso pode se dizer que um mesmo material pode ter diferentes valores de usinabilidade dependendo do que está sendo avaliado.

Para ser avaliado a usinabilidade é proposto diversos métodos, obtendo índices de usinabilidade, segundo Diniz (2013) o mais aceito chama-se ensaio de longa duração, onde o material ensaiado e o material dito como padrão são usinados até o fim da vida de uma determinada ferramenta, ou, até um valor pré determinado de desgaste em diversas velocidades de corte. Este ensaio obtém a vida da ferramenta para vários valores de velocidade de corte, por fim, o índice de usinabilidade é dado com a relação da vida da ferramenta no material ensaiado sobre o material padrão, gerando um percentual.

As principais propriedades que influenciam a usinabilidade segundo Diniz (2013) são:

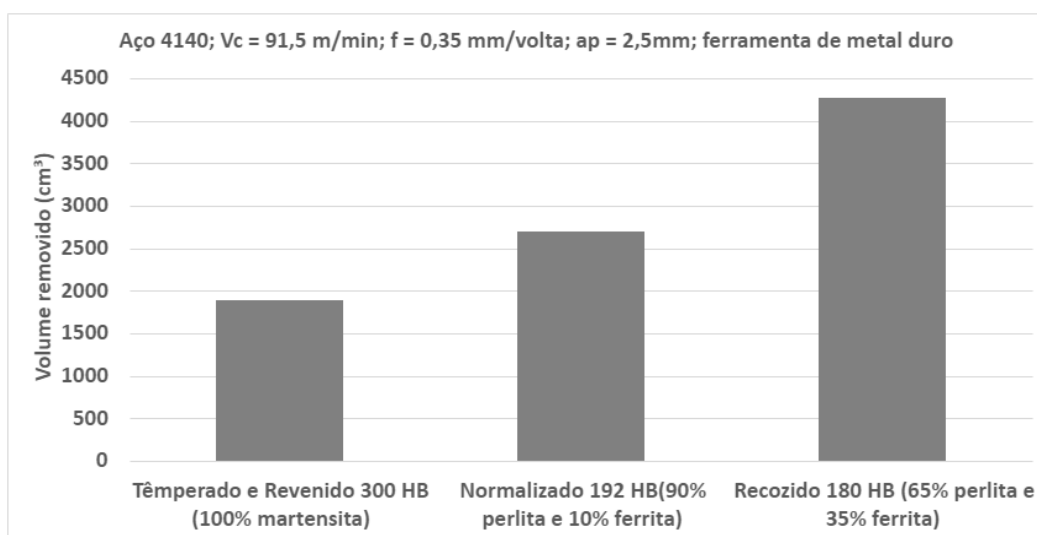
- Dureza e Resistência mecânica; baixas durezas e resistências mecânicas em geral são associados a fácil usinagem, porém, para materiais muito dúcteis a falta de resistência mecânica e baixa dureza dificultam a usinagem, prevalecendo a criação de aresta postiça de corte.
- Ductilidade; baixas ductilidades favorecem uma usinagem mais fácil, porém, caso for feita alguma operação que reduz a ductilidade ela também aumenta a dureza e resistência mecânica, o que pode dificultar a usinagem, então até o momento pode-se dizer que não necessariamente aumentar muito nem reduzir demais fazem uma usinagem mais fácil.
- Condutividade térmica; quanto maior esta característica melhor a temperatura é conduzida pela peça e menos ela aquece a ferramenta, então, quanto maior a condutividade melhor a usinabilidade, porém, em alguns casos essa temperatura pode causar distorções, por conta disso às vezes é necessária uma refrigeração adequada.

-

- Taxa de encruamento; metais deformados plasticamente aumentam sua resistência, este fenômeno chama-se encruamento, o nível deste encruamento depende do material, uma alta taxa de encruamento significa que a resistência do material aumentará bastante quando for usinado, além disso exige mais energia para ser usinado, esse encruamento criará uma pequena camada com uma dureza substancialmente superior. Essa taxa sendo alta contribui para a criação de aresta postiça de corte, para estes materiais pode ser vantajoso alguma operação anterior, pois ela encruará o material antes da usinagem então ele não o fará tanto durante o corte.

A figura 17 mostra um comparativo da usinabilidade em aço ABNT 4140 em diversos estados microestruturais.

Figura 17 – Comparativo de usinabilidade em aço ABNT 4140 em diversas condições



Fonte: Adaptado de Chiaverini (1981)

Segundo Diniz (2013), a presença de inclusões influencia na usinabilidade e podem ser de três tipos, inclusão de partículas duras, que dificulta a usinagem, partículas que não influenciam a usinagem, como alguns óxidos e por fim partículas desejáveis, que auxiliam na usinagem, como silicatos por exemplo. Por fim, elementos de liga tem seu impacto quanto a usinabilidade, elementos como vanádio, tungstênio e nióbio geram carbonetos tendem a dificultar a usinagem, por outro lado, elementos como chumbo e fósforo tem efeito positivo na usinagem, além do teor de carbono, onde tem sua melhor usinagem entre 0,3% até 0,6%.

3 METODOLOGIA

3.1 Material

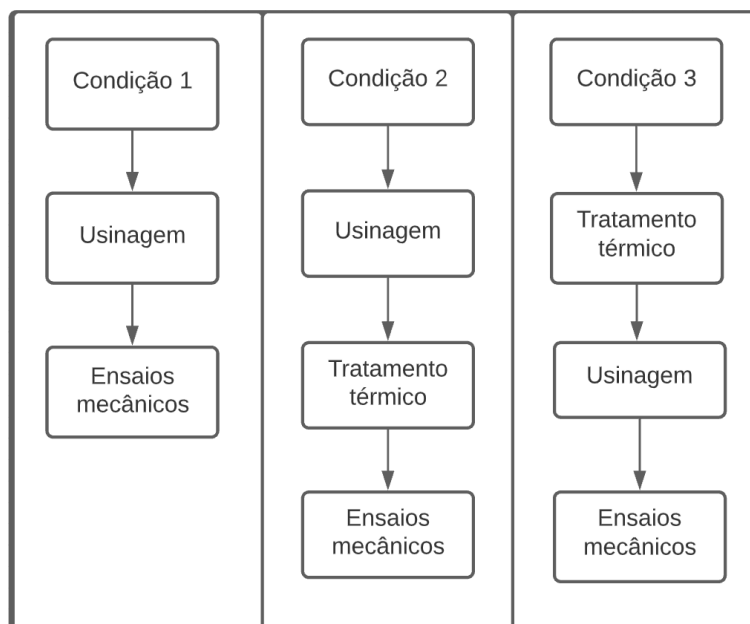
O material escolhido para ser estudado é o aço ABNT 4140 em decorrência de suas propriedades mecânicas e sua larga utilização na indústria.

Foram selecionadas barras de 28 mm de diâmetro e 240mm de comprimento para a usinagem dos corpos de prova, foram produzidos nove corpos de prova, três para cada uma das três condições:

- Condição 1: material não foi tratado;
- Condição 2: material com usinagem anterior ao tratamento térmico;
- Condição 3: material com tratamento anterior a usinagem;

Os processos realizados em cada uma das condições podem ser vistos na Figura 18.

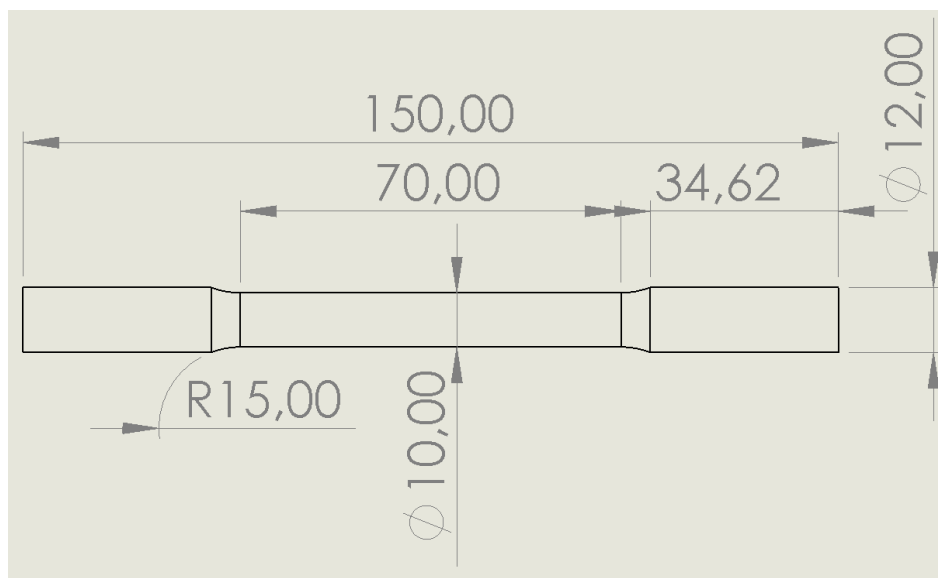
Figura 18 - Estrutura dos processos das condições avaliadas



Fonte: Autor (2021)

Com os materiais definidos foram usinados os corpos de prova segundo a norma ABNT NBR ISO 6892-1:2013 (VERSÃO CORRIGIDA 2:2018), como mostrado na figura 19.

Figura 19 – Corpo de prova do ensaio de tração



Fonte: Autor (2021)

O equipamento utilizado para efetuar a usinagem foi o torno CNC Romi GL 240, mostrado na figura 20.

Figura 20 – Torno CNC Romi GL 240



Fonte: Autor (2021)

A ferramenta utilizada foi a VBMT160404 – MP da marca KORLOY, ferramenta vista na figura 21.

Figura 21 – Ferramenta de corte



Fonte: Autor (2021)

Os parâmetros de corte utilizados para a usinagem podem ser observados na tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros de usinagem

Ferramenta	Velocidade de corte	Profundidade de corte	Avanço
VBMT160404 da Korloy	280 m/min	1 mm	0,2 mm/rotação

Fonte: Autor (2021)

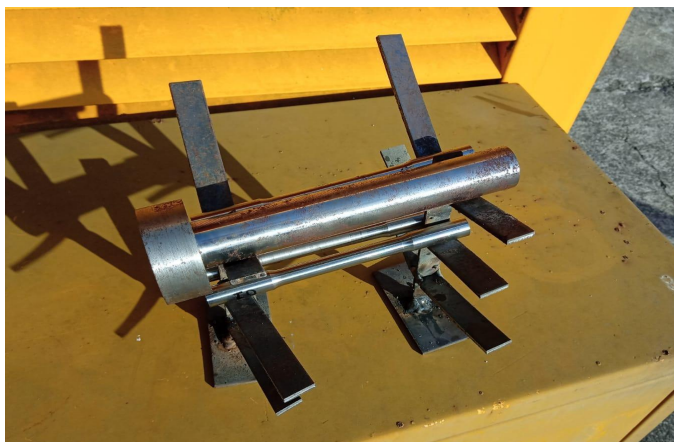
Para o desgaste ser comparado foi determinado uma quantidade de volume de material removido e em duas quantidades diferentes, sendo a primeira especificada como usinagem de baixo volume removendo 50.000 mm³ e a segunda especificada como usinagem de alto volume removendo 159.000 mm³.

3.2 Tratamento térmico

Como o objetivo do trabalho é promover o aquecimento do material na faixa de temperatura obtida com a exposição do material a energia solar, foi necessário primeiramente mensurar a que faixa de temperatura o material poderia atingir se exposto ao sol.

Para isso o material foi exposto ao sol por 4 horas na data de 26/07/2021 procedimento este pode ser visto na figura 22, aliado a isso segundo IBM (2021) neste dia a temperatura máxima foi 27° e a mínima foi 13°.

Figura 22 – Material exposto ao sol



Fonte: Autor (2021)

Para estimar qual a temperatura atingida foi utilizada uma câmera térmica da marca Flir modelo TG165 que pode ser vista na figura 23.

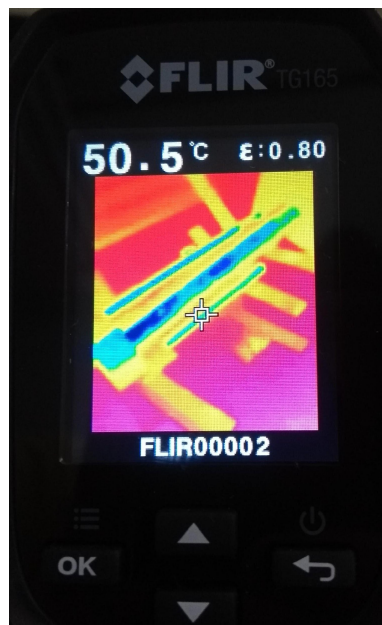
Figura 23 - Câmera térmica



Fonte: ANTFerramentas (2015)

A temperatura obtida pelo material, nesta data segundo a foto térmica da câmera foi 50.5°C, que pode ser vista na figura 24.

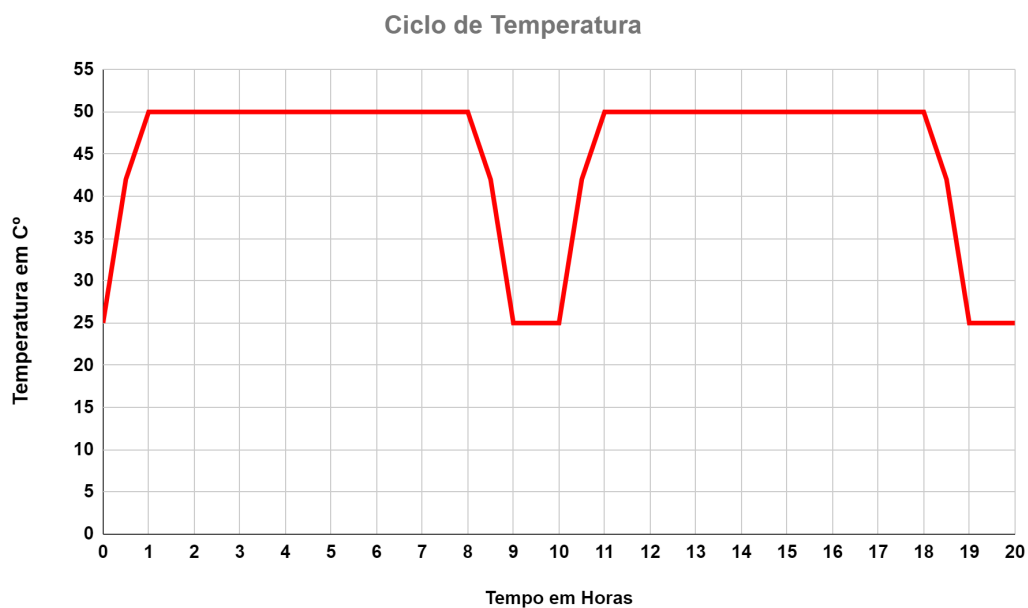
Figura 24 – Foto térmica



Fonte: Autor (2021)

Assim, os corpos de prova foram mantidos a 50°C por 8 horas e o forno foi desligado por duas horas para que o material retorne à temperatura ambiente, somando 10 horas. No total foram feitos 80 ciclos, que estão representados na figura 25. Deste modo estes ciclos tentaram simular a exposição deste material a aproximadamente 3 meses de exposição ao sol.

Figura 25 – Representação dos ciclos de temperatura



Fonte: Autor (2021)

Um corpo de prova que foi submetido ao tratamento pode ser visto na figura 26.

Figura 26 – Corpo de prova após forno e usinagem



Fonte: Autor (2021)

O forno utilizado foi do tipo elétrico, mostrado na figura 27.

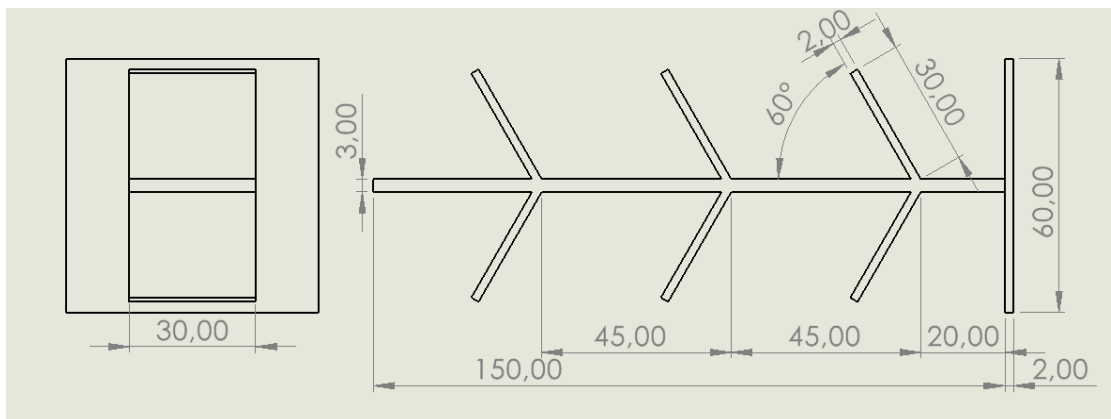
Figura 27 – Forno elétrico



Fonte: Autor (2021)

Para o material ser acomodado dentro do forno foi confeccionado um estaleiro, o dimensional dele pode ser visto na figura 28.

Figura 28 – Dimensões do estaleiro



Fonte: Autor (2021)

3.3 Ensaio de tração

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração em uma máquina universal de ensaios da marca EMIC linha DL de 100 kN, que pode ser visto na figura 29.

Figura 29 – Máquina de ensaios



Fonte: Autor (2021)

3.4 Desgaste

As medições de desgaste foram obtidas com um estereoscópio da marca Zeiss, modelo da câmera do dispositivo AxioCam ERc 5s, como demonstrado na figura 30.

Figura 30 – Estereoscópio



Fonte: Autor (2021)

3.5 Rugosidade

A medição da rugosidade foi feita com o rugosímetro portátil Time TR210 mostrado na figura 31, a medição da rugosidade será feita em três posições distintas da peça, com cut off de 1,2 mm.

Figura 31 – Rugosímetro TR210



Fonte: Homis (2017)

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Usinagem

O passo inicial foi a usinagem dos materiais sem tratamento com a intenção de se obter valores de desgaste e produzir os corpos de prova. Foram usinadas 6 barras inicialmente produzindo os corpos de prova, enquanto as demais barras foram reservadas pois iriam primeiramente ao forno antes de sua respectiva usinagem, a figura 32 mostra as barras reservadas antes do tratamento.

Figura 32 – Conjunto de material reservado



Fonte: Autor (2021)

4.2 Ensaio de tração

Após a usinagem dos corpos de prova foram efetuados os ensaios de tração nas três diferentes condições, um corpo de prova após o ensaio pode ser visto na figura 33.

Figura 33 – Corpo de prova após ensaio de tração



Fonte: Autor (2021)

O ensaio gerou um gráfico mostrando as grandezas mensuradas, comparando somente a tensão de escoamento e tensão máxima de tração, um destes gráficos pode ser visto na figura 34.

Figura 34 – Resultado do ensaio de tração no corpo de prova com tratamento anterior a usinagem 1

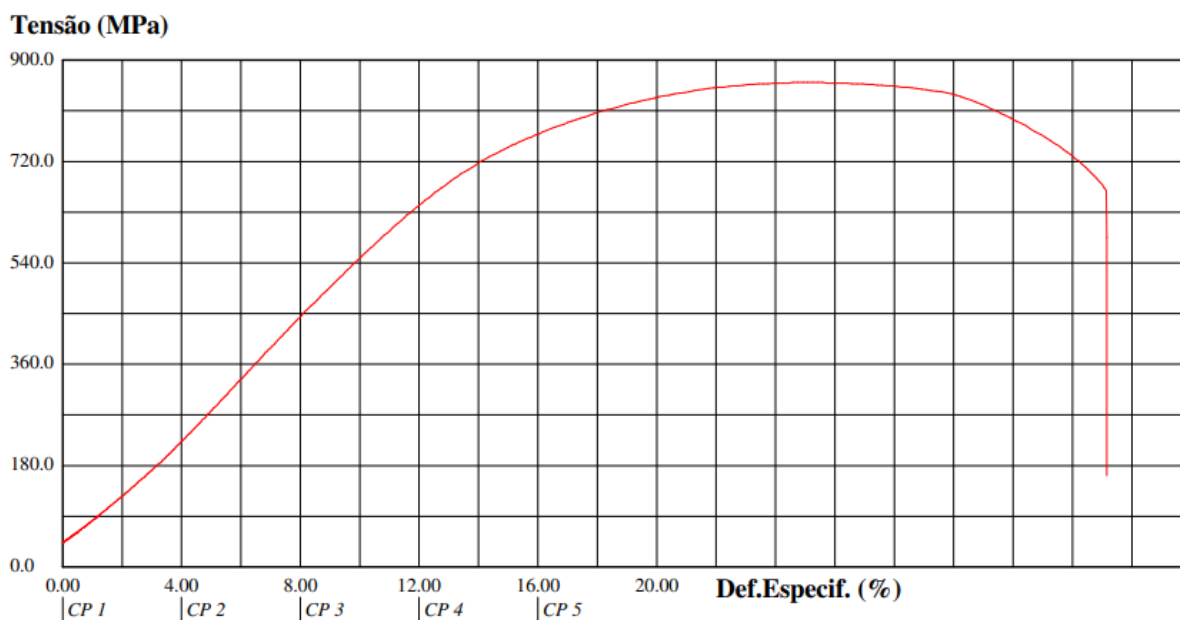
CEFET - JARAGUÁ
LABORATORIO DE ENSAIOS

Relatório de Ensaio

[illegible]

Corpo de Prova	Diâmetro	Compr. Base	Força @Força Max. (kN)	Tensão @Escoam. ES1 (MPa)	Tensão @Força Max. (MPa)	Def.Especif. @Ruptura (%)
	(mm)	(mm)				
CP 1	10.00	50.00	67.6	577.8	861	35
Número CPs	1	1	1	1	1	1
Média	10.00	50.00	67.60	577.8	860.7	35.08
Mediana	10.00	50.00	67.60	577.8	860.7	35.08
Desv.Padrão	*	*	*	*	*	*
Coef.Var.(%)	*	*	*	*	*	*
Mínimo	10.00	50.00	67.60	577.8	860.7	35.08
Máximo	10.00	50.00	67.60	577.8	860.7	35.08

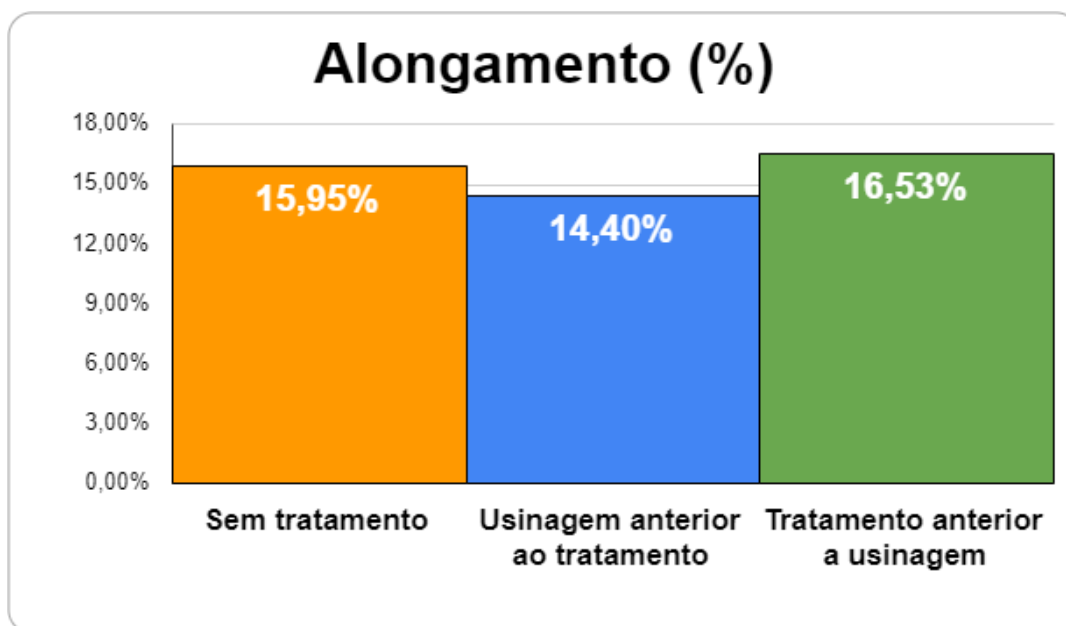
Escoam. ES1 - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: : **0.200 %**



Fonte: Autor (2021)

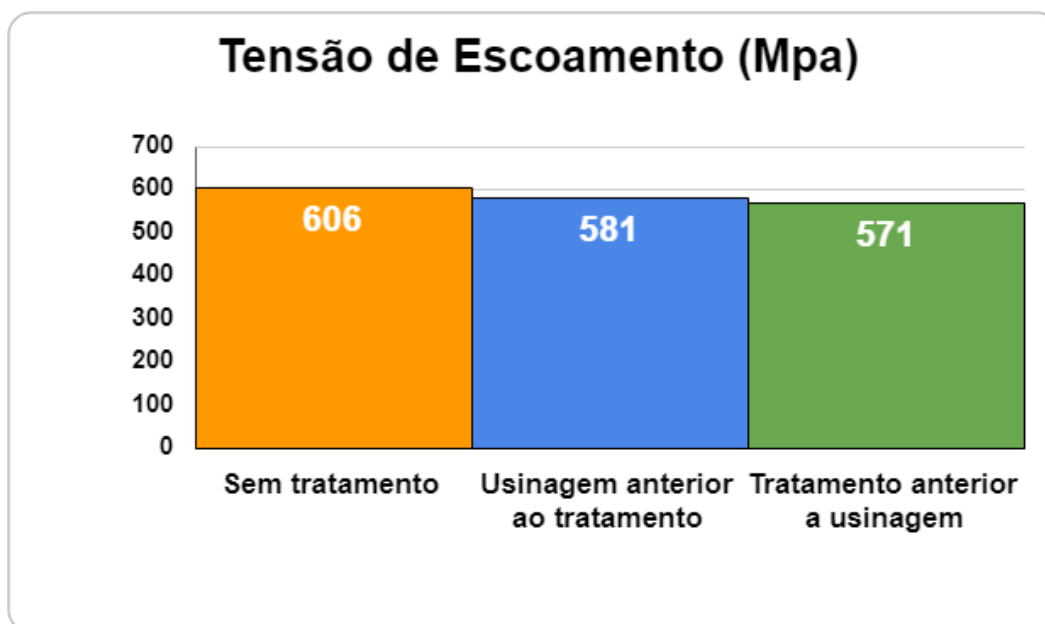
Foi também comparado o alongamento %. Os dados obtidos foram compilados e geraram gráficos de comparação: Alongamento %; Tensão de escoamento (Mpa); Tensão máxima de tração (Mpa), podem ser vistos nas figuras 35, 36 e 37. Os dados brutos podem ser vistos na tabela 4.

Figura 35 - Gráfico comparativo de alongamento %



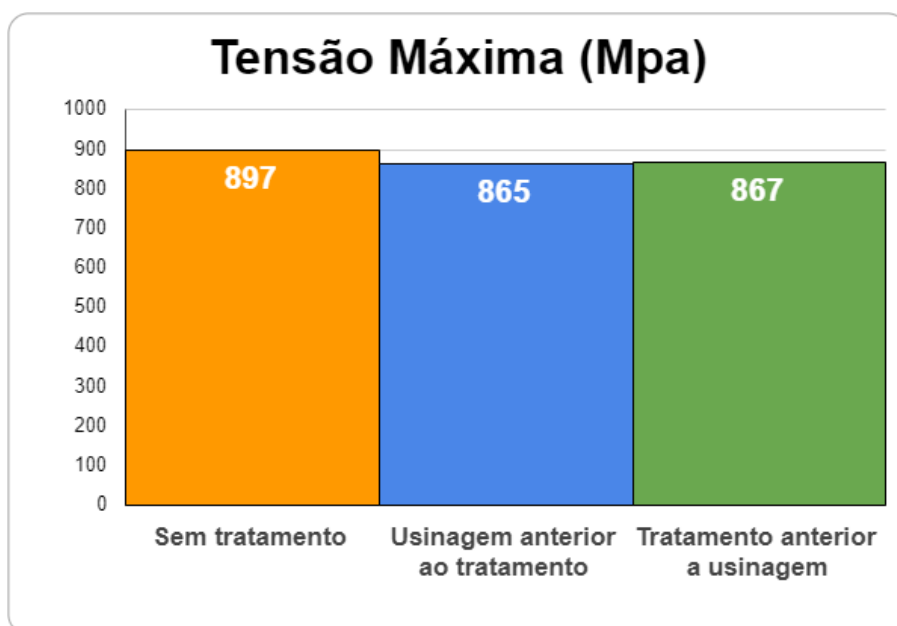
Fonte: Autor (2021)

Figura 36 - Gráfico comparativo de tensão de escoamento



Fonte: Autor (2021)

Figura 37 - Gráfico comparativo de tensão máxima de tração



Fonte: Autor (2021)

Tabela 4 – Comparativo ensaio de tração

Amostra	Tensão de Escoamento (Mpa)	Tensão máxima (Mpa)	Alongamento (%)
Sem tratamento 1	600,9	895	19,20%
Sem tratamento 2	611,2	899	12,70%
Sem tratamento 3	Erro	Erro	Erro
Usinagem anterior ao tratamento 1	548,2	833	Erro
Usinagem anterior ao tratamento 2	614,4	896	14,40%
Usinagem anterior ao tratamento 3	Erro	Erro	Erro
Tratamento anterior a usinagem 1	577,8	861	20,00%
Tratamento anterior a usinagem 2	575,9	874	16,90%
Tratamento anterior a usinagem 3	559,9	867	12,70%

Fonte: Autor (2021)

Um dos corpos de prova com usinagem anterior ao tratamento apresentou problemas de fixação e foi especificado na tabela como “Erro”. Além disso, uma das amostras sem tratamento térmico também falhou.

Os corpos de prova tratados antes da usinagem apresentaram menor tensão máxima, menor tensão de escoamento e maior alongamento.

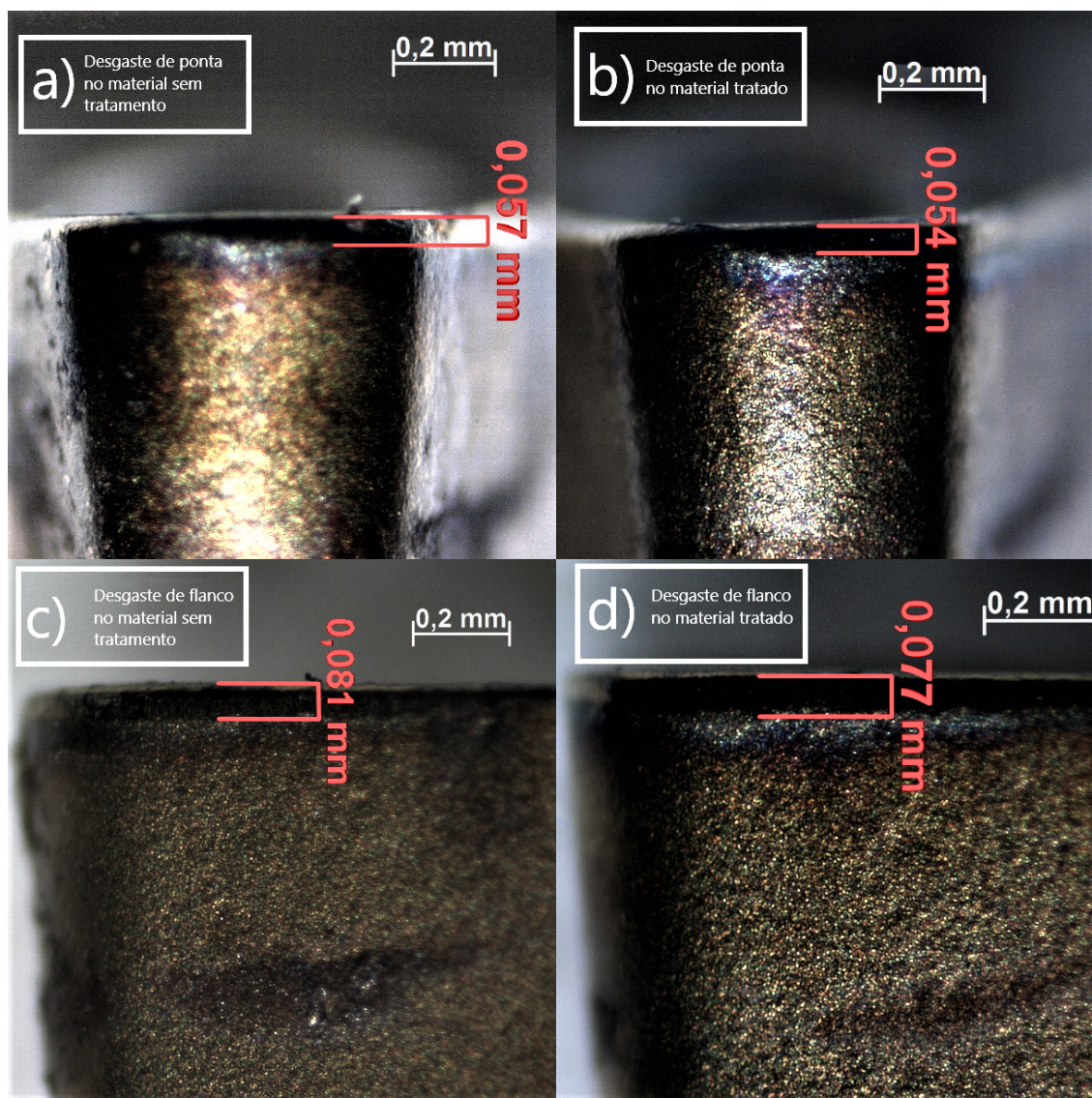
No entanto estas diferenças não foram significativas sendo assim os resultados ficaram próximos. Porém é possível afirmar que com os tratamentos

térmicos houve um aumento no alongamento das peças e uma redução na sua tensão máxima de ruptura.

4.3 Desgaste da ferramenta

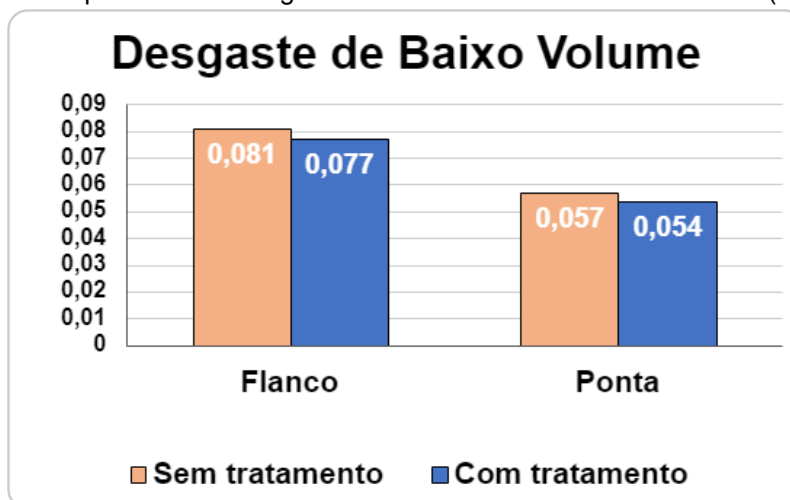
Os desgastes nas ferramentas medidas com o estereoscópio foram de flanco e de ponta nas duas condições. A figura 38 mostra as fotos dos desgastes obtidos na condição de usinagem de baixo volume. Os valores podem ser vistos novamente na figura 39.

Figura 38 – Quadro dos desgastes da condição de usinagem de baixo volume



Fonte: Autor (2021)

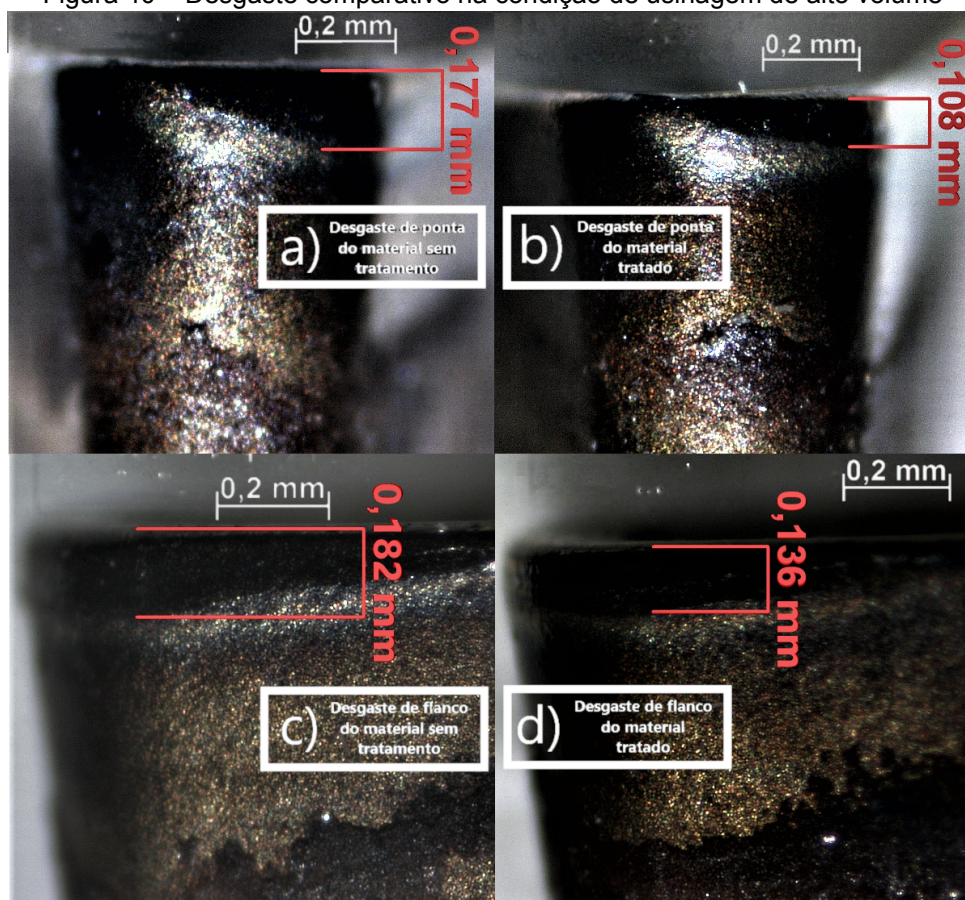
Figura 39 – Comparativo dos desgastes nas ferramentas de baixo volume (50.000 mm³)



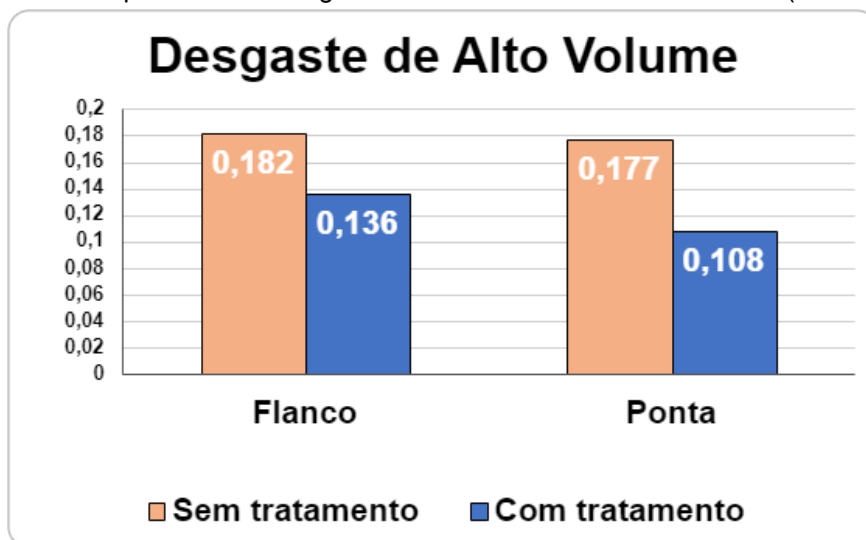
Fonte: Autor (2021)

A figura 40 mostra as fotos dos desgastes obtidos na condição de usinagem de alto volume. Os valores dos desgastes podem ser vistos também na figura 41.

Figura 40 – Desgaste comparativo na condição de usinagem de alto volume



Fonte: Autor (2021)

Figura 41 – Comparativo dos desgastes nas ferramentas de alto volume (159.000 mm³)

Fonte: Autor (2021)

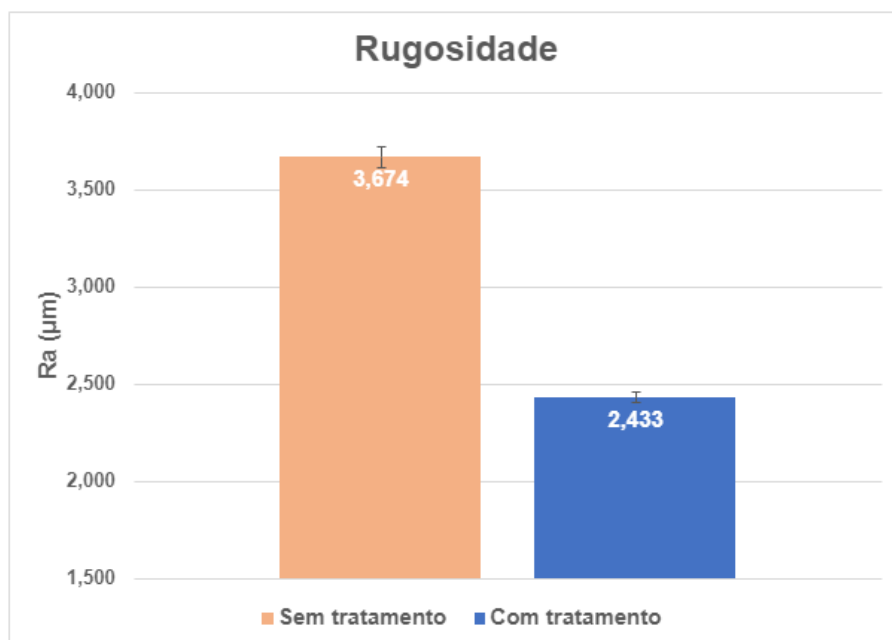
A partir destes dados pode se observar que usar o material tratado produz menor desgaste tanto de ponta como de flanco, em relação ao material sem o tratamento, essa diferença é menor inicialmente, mas pode se supor que ela tende a aumentar quanto maior volume removido. Nas amostras de baixa usinagem o desgaste foi reduzido em aproximadamente 5% tanto de ponta como de flanco, já nas de aquelas de usinagem de alto volume variou de 25% no desgaste de flanco em até 38% no desgaste de ponta.

A redução do desgaste pode ter ocorrido pelo efeito similar ao que acontece no superenvelhecimento, o material teria sua dureza reduzida tendo em vista que o tamanho do grão teria aumentado, como uma alta dureza dificulta a usinagem esta redução poderia estar ocasionando um desgaste menor da ferramenta.

4.4 Rugosidade

As medidas de rugosidade obtidas podem ser observadas na figura 42.

Figura 42 - Medições de rugosidade



Fonte: Autor (2021)

Na condição de usinagem em que os corpos de prova foram usinados sem tratamento térmico, a rugosidade foi superior ao material usinado com o tratamento, esta redução na rugosidade foi em torno de 33%.

5 CONCLUSÃO

Após as análises relacionadas à resistência mecânica, não foram encontradas alterações significativas com o uso do tratamento térmico. No entanto, o material tratado demonstrou uma redução de aproximadamente 5% da tensão de escoamento, redução de 3,5% aproximadamente no limite de resistência à tração e aumento de aproximadamente 3,6%.

Em relação a usinagem o material tratado promoveu menor desgaste na ferramenta, tanto de ponta como de flanco, em até 25% na condição de alto volume o que demonstra ser significativo

Além disso, a rugosidade do material tratado obteve valores de rugosidade menores, em torno de 33%.

Portanto é possível afirmar que há indícios que expor o aço ABNT 4140 a incidência da energia térmica solar, por tempo e condições similares ao estudado, melhora a sua usinabilidade. Também é possível afirmar que conforme Reed-Hill (1973) relatou, pode ser que o material tenha sofrido o processo de envelhecimento.

No entanto, em relação às propriedades mecânicas precisam ser feitos ensaios complementares, para se comprovar a eficiência deste método de exposição.

Como sugestão aos trabalhos futuros:

- Metodologia estatística com mais corpos de prova.
- Ciclos de tratamento térmico com maior fidelidade a exposição real do material

REFERÊNCIAS

ANTFERRAMENTAS. ANT Ferramentas, c2015. Página inicial. Disponível em: <[Câmera Térmica Flir TG165 -25 a 380°C - ANT Ferramentas - AntFerramentas](#)>.

Acesso em: 02 de jan. de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT 4287 2005:** Especificações geométricas do produto (GPS) -Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. 3 ed. Rio de Janeiro, 2005. 20 p. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/22323/abnt-nbriso4287-especificacoes-geometricas-do-produto-gps-rugosidade-metodo-do-perfil-termos-definicoes-e-parametros-da-rugosidade>. Acesso em: 06 dez. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6892-1:2013 (VERSÃO CORRIGIDA 2:2018):** Materiais metálicos — Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. 3 ed. Rio de Janeiro, 2018. 80 p.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de materiais:** Uma introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2002. 589 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**, Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 1981.

CHIAVERINI, Vicente. **Geologia e Metalurgia:** Aços carbono e aços liga. 11. ed. São Paulo: Centro Moraes Rego, 1954. 196 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica:** Processo de fabricação e tratamentos. 2. ed. São Paulo: Mcgraw-hill, 1986. 315 p.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Metais**. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013. 270 p.

GROOVER, Mikell P. **Introdução aos Processos de Fabricação**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2016. 737 p. Tradução Anna Carla Araujo.

HOMIS, Homis do Brasil, c2017, Página inicial, disponível em: <<https://www.homis.com.br/outros/rugosimetro-digital-portatil-tr-210-time>>. Acesso em 06 dez. 2021.

IBM, **TheWeatherChannel**, c2021, Página inicial, disponível em: <<https://weather.com//pt-BR/clima/mensalmente//Jaraguá+do+Sul+Santa+Catarina?canonicalCityId=617cccee64d9923b11c5578afa3a6acef664a7ee64a5e916af70d7671da99c44>>. Acesso em 06 dez. 2021.

PIRATELLI A. Rugosidade Superficial. Anais do 3º Seminário de Metrologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

REED-HILL, Robert E. (ed.). **Physical Metallurgy Principles**. 2. ed. New York City: Litton Educational Publishing, Inc., 1973. 776 p. Tradução por editora Guanabara Dois.

SANDVIK (Suécia) (org.). **Problemas e Soluções**: desgaste da pastilha. Estocolmo, 2021. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/general-turning/pages/troubleshooting.aspx>. Acesso em: 06 dez. 2021.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos**: fundamentos teóricos e práticos. 5. ed. São Paulo: Edgar Bluncher, 1982. 287 p.