

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
ENGENHARIA MECÂNICA

EDILSON MATIAS JUNIOR

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DO AÇO AISI H13 TEMPERADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018

EDILSON MATIAS JUNIOR

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DO AÇO AISI H13 TEMPERADO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Celso Alves Correa.

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Cornélio Procópio**  
**Departamento Acadêmico de Mecânica**  
**Curso de Engenharia Mecânica**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Edilson Matias Junior**

### **COMPORTAMENTO MECÂNICO DO AÇO AISI H13 TEMPERADO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 10:00hs do dia 05/12/2018, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Celso Alves Correa - Presidente (Orientador)

---

Prof. PhD. João Roberto Sartori Moreno - (Membro)

---

Prof. Dra. Émillyn F. Trevisani - (Membro)

“A folha de aprovação assinada se encontra na coordenação do curso.”

Dedico esse trabalho a minha mãe, avós e irmãs, pois essas são mulheres fortes e sempre me deram conforto espiritual e psicológico quando eu mais precisei.

## AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer inicialmente a minha mãe Ana Claudia de Oliveira, minhas avós Maria Sinvalina Matias e Cleuza Gomes de Oliveira, minha tia Tatiane de Oliveira e irmãs Caroline, Stephanie, Geovana e Maria Eduarda, pois nesses últimos 6 anos têm sido o real motivo por eu ainda está de pé lutando por um futuro melhor e por ter me tornado o homem que sou.

Agradeço a meus orientadores professor PhD. João Roberto Sartori Moreno, professor Dr. Celso Alves Correa e professor, Dr. Fernando de Medeiros Diório e Dra. Émillyn F. Trevisani, por todo auxílio que recebi nesses últimos anos, pois foram além da orientação técnica e científica, são verdadeiros amigos que me ofereceram um ombro amigo na instituição quando mais precisei, me confortaram em momentos de derrota e auxiliaram com seu conhecimento na criação dessa pesquisa.

A instituição de ensino UTFPR, deixo minha gratidão por toda oportunidade que me proporcionou, onde um rapaz pobre teve a oportunidade de tentar se graduar em engenharia mecânica e pode acreditar em um futuro melhor para sua família e vida, pois essa instituição proveu nos últimos anos os recursos para esse fim e deixo um carinho especial as servidoras do NUAPE que nesses últimos anos se tornaram amigas e conselheiras, possibilitando meu crescimento dentro da instituição.

A empresa Normatic Tratamentos térmicos deixo aqui o reconhecimento pelo excelente trabalho realizado no tratamento térmico das amostras da pesquisa e com maestria garantiram uma ótima qualidade na martêmpera e assim possibilitou uma maior facilidade no tratamento dos dados da pesquisa.

E por fim queria deixar um agradecimento aos meus amigos, em especial ao Reynold, Nadine, Tadashi, Lucas e Jean, que por todos esses anos me ajudaram e se tornaram minha segunda família, que devido a sua grande diversidade, me mostraram novas linhas de pensamento e nos dias mais escuros, onde senti que não poderiam seguir em frente seguraram em minhas mãos e foram o escudo a frente das adversidades no caminho até o final da graduação.

"Ninguém baterá tão forte quanto a vida. Mas, não se trata de bater duro, se trata de quanto aguenta apanhar e seguir em frente, o quanto e capaz de aguentar e continuar tentando. É assim que a vitória é conquistada". (STALLONE, Sylvester, 2006).

## RESUMO

Matias Júnior, Edilson. **Comportamento mecânico do aço AISI H13 temperado**. 2018. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018

O presente trabalho, foi analisado um comportamento mecânico do Aço AISI H13 temperado, utilizado para construção de moldes para termoplásticos e injeção de alumínio. O intuito de avaliar a relação do comportamento mecânico a partir de ensaios de dureza (Rockwell e Vickers), possibilitou que na faixa de dureza de 45 HRC, qual o material apresentou melhor homogeneidade, pois o desvio padrão evidenciou essa proposta. Portanto foi possível comparar que a faixa de dureza de 45 HRC possui a melhor aproximação com os dados registrados pela norma ASTM E140, pois apresentou um erro de apenas 0,44%.

**Palavras-chave:** Aço AISI H13, Martêmpera, Ensaio de dureza, Limite de Resistência.

## ABSTRACT

Matias Júnior, Edilson. **Mechanical behavior of tempered AISI H13 steel**. 2018. 38 f. Completion of Course Work (University graduate) – Mechanical Engineering. Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procópio, 2018

The present work analyzed a mechanical behavior of tempered AISI H13 Steel, used for the construction of molds for thermoplastics and aluminum injection. In order to evaluate the relationship of mechanical behavior from hardness tests (Rockwell and Vickers), it was possible that in the 45 HRC hardness range the material presented better homogeneity, since the standard deviation evidenced this proposal. Therefore, it was possible to compare that the 45 HRC hardness range has the best approximation with the data recorded by the ASTM E140 standard, since it presented an error of only 0.44%.

**Keywords:** AISI H13 steel, Martempering, Hardness test, Tensile Strength

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de fases Ferro - Carbetos de Ferro (Fe – Fe <sub>3</sub> C).....	16
Figura 2 – Diagrama TTT para (a) têmpera, (b) martêmpera e (c) martêmpera modificada.....	18
Figura 3 – Processo de dureza Rockwell .....	22
Figura 4 – Particularidades do Ensaio e equipamento de dureza Vickers .....	23
Figura 5 – Medidas acabadas do Aço AISI H13.....	25
Figura 6 – Gráfico dureza por temperatura de revenimento.....	26
Figura 7- Disposição das indentações no ensaio de dureza Vickers .....	27
Figura 8 - Resultados dos ensaios de Dureza Vickers.....	29

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do aço AISI H13 .....	15
Tabela 2 - Curva Limite de Resistência vs Dureza Brinell.....	20
Tabela 3 – Escalas de dureza Rockwell.....	21
Tabela 4 – Tabela de qualidade da Villares Metal para o aço AISI H13 .....	24
Tabela 5 – Durezas das amostras.....	27
Tabela 6 - Durezas medidas das amostras de H13 .....	28
Tabela 7 - Médias e desvio padrão .....	30
Tabela 8 - Comparativo dados Reais e norma ASTM E140.....	30
Tabela 9 - Tensões estimadas para o aço AISI H13 .....	31
Tabela 10 - Propriedades do aço AISI H13 e Tensões estimadas para o aço AISI H13.....	31

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
2.1 AÇO AISI H13 .....	14
2.2 TÊMPERA E REVENIMENTO .....	15
2.3 MARTÊMPERA .....	18
2.4 MARTENSITA .....	19
2.5 ENSAIO DE DUREZA .....	19
2.5.1 Correlação entre dureza e Limite de Resistência .....	20
2.5.2 Dureza Rockwell .....	21
2.6 DUREZA VICKERS .....	22
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>24</b>
3.1 AÇO AISI H13 .....	24
3.2 TEMPERA, MARTÊMPERA E REVENIMENTO .....	25
3.3 ENSAIO DE DUREZAS .....	26
3.4 ENSAIO DE DUREZA VICKERS .....	27
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>28</b>
4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DUREZA .....	28
4.2 RESULTADO DO ENSAIO DE DUREZA VICKERS .....	29
4.3 ESTIMATIVA DE LIMITE DE RESISTÊNCIA .....	30
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>32</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>33</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>34</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A humanidade descobriu nos metais muitas aplicações para seus cotidianos, alavancando assim seu desenvolvimento, dados apontam para aproximadamente que no 1000 a. C., a humanidade aprendeu que metais poderiam ser aquecidos e moldados para criação de utensílios, ferramentas e armas. Cerca de 350 a. C., na Índia o ferro de fusão foi extraído do minério por meio de fornos, esse por sua vez era esponjoso e era obtido após longo processamento por martelagem para remoção de escórias e posteriormente refundido em pequenos cadinhos e deixados esfriar lentamente (VALE, 2011).

Povos da antiguidade sempre tiveram a preocupação de desenvolver armas mais resistentes para batalhas, pois essas traziam vantagem técnica e tática em batalhas, assim demonstrando que a ciência metalúrgica por milênios se desenvolveu da necessidade bélica desses povos. Mesmo após a descoberta do processamento do ferro ainda eram necessários mais processos para um beneficiamento do material, o imperador Júlio César já desfrutava de vantagens no seu arsenal uma vez que os romanos já dominavam técnicas de endurecimento do aço, que era aquecido em durante um longo tempo em carvão vegetal e resfriado em salmoura. Essa vantagem bélica era visível uma vez que guerreiros bretões tinham como problemas em batalha a deformação excessiva de suas armas de ferro o que implicava em paradas frequentes para concerto, o que implicou em vitórias significativas para o império romano e conseqüentemente facilitou sua expansão territorial durante essa fase. (VALE, 2011) (SENAI, 2000).

Durante a idade média houve a redescoberta da produção do aço, onde era produzido com o aquecimento do ferro em contato direto com materiais ricos em carbono, mas apenas no século XVII (1740) Benjamin Huntsman foi capaz de produzir o aço fundido com uniformidade estrutural satisfatória. Com o passar dos anos pesquisadores analisaram as diversas características do aço e os defeitos causados com a adição de ligas durante a fabricação do mesmo (VALE, 2011).

Com os avanços nos estudos dos aços, tornou-se necessário um conhecimento minucioso dos materiais produzidos, pois o comportamento mecânico dos aços depende da configuração de suas estruturas cristalinas, onde cada uma tem características mecânicas próprias e a sua combinação dão ao aço seu comportamento próprio. Essas estruturas têm suas características particulares

estudas e relacionadas ao comportamento do aço durante anos pois um entendimento aprimorado dessas características ajuda o engenheiro moderno a prever comportamento do material as cargas exigidas de um projeto, garantindo um uso mais eficaz e seguro do aço em projetos. Uma investigação exta pode ser feita no processo de endurecimento do aço, pois as estruturas cristalinas se alteram sobre calor, assim gerando novas estruturas que se comportam de maneiras diferentes, onde podem ser instáveis a temperatura ambiente ou com elevada dureza, mas com grande fragilidade e sua combinação podem prover ao aço qualidades para trabalhos específicos.

Outra característica a qual um engenheiro deve se atentar é a influência dos elementos de liga no aço, pois esses alteram as propriedades das estruturas cristalinas de um aço, dando ao aço ligado mais resistência ou fragilidade a um fator externo ao qual e submetido.

Todas as características entorno do aço H13 o tornam um aço adequado para aplicações de confecções de moldes termoplásticos e em alguns casos até para molde de injeção de alumínio (VILLARES METALS, 2006).

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Estudar as influências das propriedades de dureza comparadas com o limite de resistência e limite de escoamento aço AISI H13 após tratamento térmico em martêmpera e revenimento para 3 faixas de mudança de propriedades distintas. Com os resultados poder estimar o fator de correlação  $k$  que ajusta o valor de dureza Rockwell com o Limite de resistência.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar tratamento térmico de martêmpera e revenimento no aço AISI H13 e obter durezas nas faixas de 30, 45 e 60 HRC;
- Realizar ensaio de microdureza Vickers e dureza Rockwell nas amostras, para demonstrar distribuição de dureza após tratamento térmico;
- Definir Limite de resistência a partir de ensaios de compressão;

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o presente capítulo serão levantadas características químicas e mecânicas do aço AISI H13 dos referenciais teóricos da literatura. Ainda relacionado ao aço serão apresentados os efeitos dos elementos de liga, as descrições teóricas dos processos de tratamento térmico de têmpera, martêmpera e revenimento e por fim será apresentado as características da microestrutura martensita, pois essa é esperada durante a transformação de fase do material. Para avaliar algumas das características mecânicas do aço H13 será apresentado brevemente o funcionamento dos ensaio de compressão e dureza Rockwell, pois os mesmos serão necessários para uma melhor compreensão das transformações de fase do H13.

### 2.1 AÇO AISI H13

Dentro da indústria metal mecânica são utilizados materiais com diversas características, pois, cada particularidade auxilia os equipamentos a manter sua eficiência e precisão. Segundo a pesquisa de RIBEIRO (2007) os aços classificados como aços H são devidos em 3 grupos:

- Ao cromo (Cr) – H10 ao H19;
- Ao tungstênio (W) – H21 ao H26;
- Ao molibdênio (Mo) – H42 e H43.

O aço AISI H13 foi desenvolvido com o intuito de ser destinado a fabricação de matrizes para forjamento a quente, já que seus elementos de liga como cromo, vanádio e molibdênio, proporcionam ao aço ótimas características para trabalho a quente. (VILLARES METALS, 2006)

O trabalho a quente se caracteriza onde em situações normais a temperatura de trabalho seja superior a 200 °C e aços usados para esse fim necessitam ter alta resistência ao desgaste em temperaturas elevadas, alta resistência mecânica, alta tenacidade, alta resistência a fadiga e alta resistência a formação de trincas oriundas de variações térmicas bruscas (RIBEIRO, 2007).

No site de banco de dados MatWeb, as propriedades do aço AISI H13 podem ser consultadas e na Tabela 1 esses valores são apresentados.

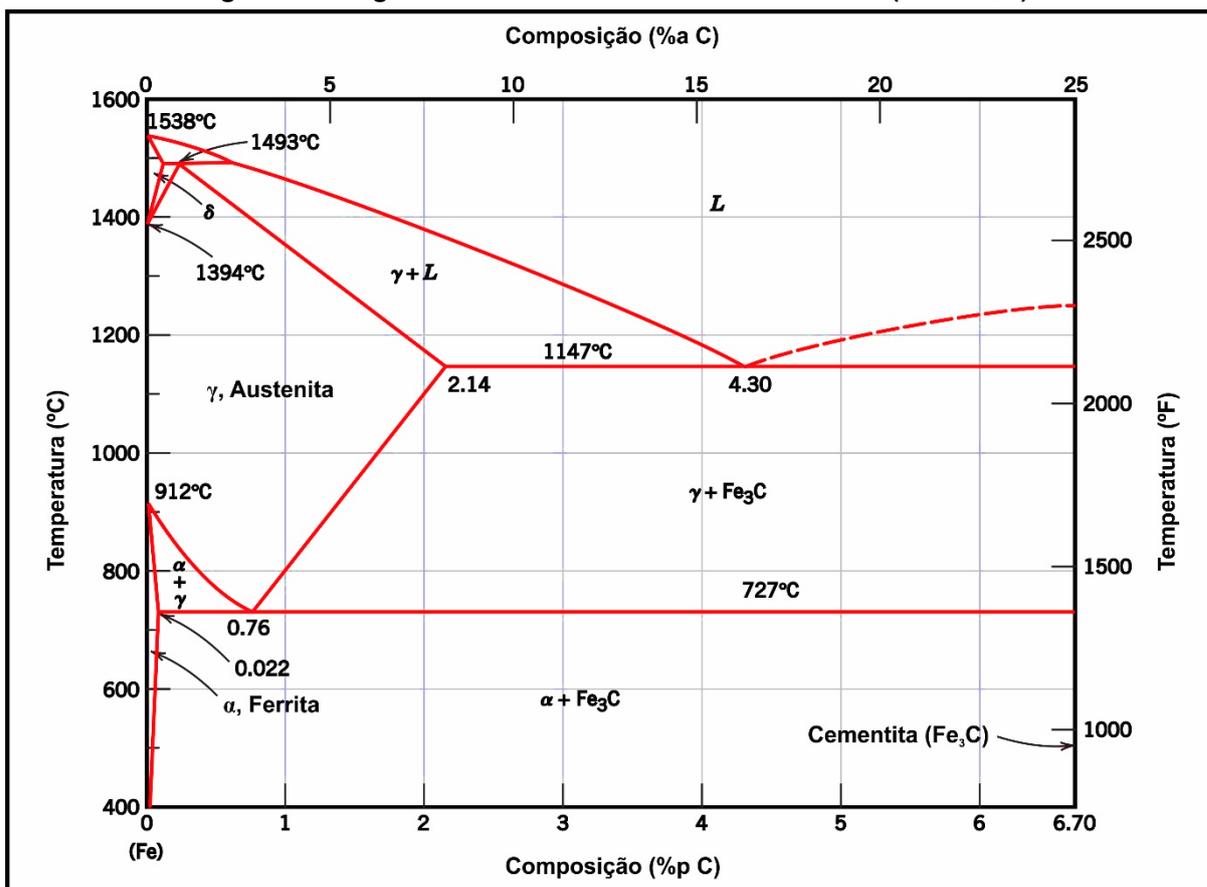
**Tabela 1 – Propriedades do aço AISI H13**

	Métrico	Inglês	Comentários
Densidade	7,80 g/cm <sup>3</sup>	0,282 lb/in <sup>3</sup>	
	28 – 30	28 – 30	Revenido à 705 °C
	31 – 33	31 – 33	Revenido à 675 °C
Dureza Rockwell C	39 – 41	39 – 41	Revenido à 650 °C
	45 – 47	45 – 47	Revenido à 620 °C
	49 – 51	49 – 51	Revenido à 595 °C
	51 – 53	51 – 53	Revenido à 565 °C
Limite de Resistência	1990 MPa	289000 psi	HRC = 55,0
Limite de Escoamento	1650 MPa	239000 psi	HRC = 55,0
Alongamento até a ruptura	9,0 %	9,0 %	HRC = 55,0
Modulo de Elasticidade	210 GPa	30500 ksi	
Modulo Volumétrico	160 GPa	23200 ksi	Típico para aço
Módulo de Cisalhamento	81,0 GPa	117000 ksi	Calculado
Coefficiente de Poisson	0,30	0,30	Calculado
Temperatura de processamento	540 – 650 °C	1000 – 1200 °F	Facha de revenimento
	995 – 1040 °C	1820 – 1900 °F	Facha de tempera
Temperatura de recozimento	850 – 870 °C	1560 – 1600 °F	4 horas de resfriamento

**Fonte: Adaptado de MatWEB (2018).**

## 2.2 TÊMPERA E REVENIMENTO

Os processos de tratamento térmico são utilizados para alterar as propriedades de um material por uma mudança de fases no aço por meio de aplicação de energia térmica, para os aços pode-se destacar o processo de têmpera que tem como objetivo aumentar a dureza e resistência mecânica do material. Durante o processo de têmpera o material é aquecido acima da sua temperatura crítica (temperatura de austenitização), geralmente em torno de 50 °C acima dessa temperatura, o que difere esse processo dos demais e o tempo de resfriamento da peça que na têmpera é feito muito rápido o que assim transformando a austenita em martensita. Na Figura 1 é mostrado um diagrama de fases do ferro carbono onde é apresentado as principais fases.

Figura 1 – Diagrama de fases Ferro - Carbeto de Ferro (Fe – Fe<sub>3</sub>C)

Fonte: Callister (2008).

No processo de têmpera os elementos de liga afetam as reações internas, exceto o cobalto, deslocam as curvas de inflexão de transformação da austenita para a direita, assim facilitando a formação de martensita isso ocorre, pois, os elementos de liga ajudam no aumento do contorno assim a formação de perlita se dá em maiores tempos de resfriamento. Nas Quadro 1 é demonstrada a ação de cada elemento de liga no aço AISI H13.

Após todo processo de têmpera realizado é necessário realização do processo de revenimento, que por sua vez é responsável por aliviar as tensões provenientes do resfriamento brusco da têmpera.

**Quadro 1 – Efeitos dos elementos de liga no aço AISI H13**

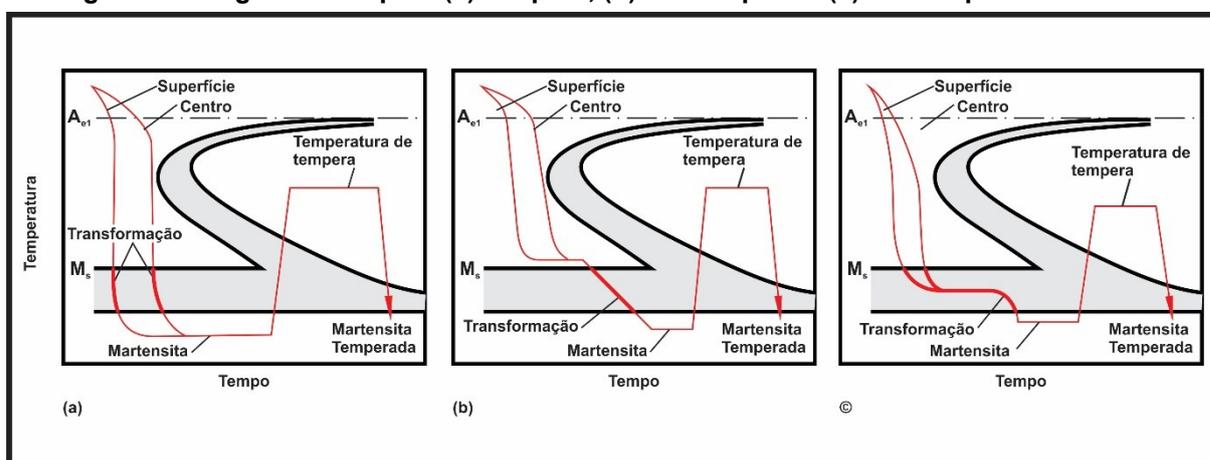
Elemento	Solubilidade sólida		Influência sobre a Austenita	Influência exercida através dos carbonetos		Principais funções
	No ferro $\gamma$	No ferro $\alpha$		Tendência formadora de carbonetos	Ação durante o revenido	
Si	2% $\pm$ (9% com 0,35% C)	18,5% (não muito alterada pelo C)	Aumenta a endurecibilidade moderadamente	Negativa (grafitiza)	Sustenta a dureza por solução sólida	1 – Desoxidante 2 - Elemento de liga para chapas elétricas e magnéticas 3 - Aumenta a endurecibilidade de aços contendo elementos não grafitizantes 4 - Aumenta a resistência de aços de baixo teor em liga 5 – Aumenta a resistência à oxidação
Mn	Sem limites	3%	Aumenta a endurecibilidade moderadamente	Maior que o Fe Menor que o Cr	Muito pequena nos teores normais	1 – Contrabalança a fragilidade a quente pelo endurecimento ao S 2 – Aumenta a endurecibilidade economicamente
Cr	12,8% $\pm$ (20% com 0,5% C)	Sem limites	Aumenta a endurecibilidade moderadamente	Maior que o Mn Menor que o W	Moderada Resiste à diminuição de dureza	1 – Aumenta a resistência à corrosão e à oxidação 2 – Aumenta a endurecibilidade 3 – Melhora a resistência a altas temperaturas 4 – Resiste ao desgaste (com alo C)
Mo	3% $\pm$ (8% com 0,3% C)	37,5%	Aumenta a endurecibilidade fortemente (Mo > Cr)	Forte: maior que o Cr	Opõe-se à diminuição de dureza criando a dureza secundária	1 – Eleva a temperatura de crescimento de grão de austenita 2 – Produz maior profundidade de endurecimento 3 – Contrabalança a tendência à fragilidade de revenido 4 – Eleva a dureza a quente, a resistência a quente e a fluência 5 – Melhora a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis 6 – Forma partículas resistentes à abrasão
V	1% $\pm$ (4% com 0,20% C)	Sem limites	Aumenta muito fortemente a endurecibilidade no estado dissolvido	Muito forte (V < Ti ou Cb)	Máxima para endurecimento secundário	1 – Eleva a temperatura de crescimento de grão de austenita (promove refino do grão) 2 – Aumenta a endurecibilidade (quando dissolvido) 3 – Resiste ao revenido e causa acentuado endurecimento secundário

Fonte: Modificado Santor e Canale (2005).

## 2.3 MARTÊMPERA

O processo de martêmpera tem como objetivo retardar o resfriamento do material acima da transformação martensítica por um período de tempo para equalizar a temperatura ao longo da peça, isso minimizará a deformação, trincas e estresse residual. Ainda e ressaltado que o nome martêmpera e um nome que pode causar engano pois a microestrutura presente nesse processo e a martensita primaria e não martensita temperada e quebradiça (ASM INTERNATIONAL, 1991). A Figura 2 demonstra a diferença entre o processo convencional de tempera convencional, martêmpera e martêmpera modificada.

**Figura 2 – Diagrama TTT para (a) têmpera, (b) martêmpera e (c) martêmpera modificada**



Fonte: ASM Internacional (1991).

Na Figura 2 são apresentadas as diferenças entre os processos, onde em (a) é feito um processo de tratamento térmico convencional, nesse caso para aços de alta liga pode provocar uma não uniformidade da martensita no material, bem como uma maior quantidade de tensões residuais após o processo, em (b) e (c) como o resfriamento não é feito de maneira abrupta a formação de martensita ocorre de maneira bastante uniforme em toda a peça durante o resfriamento até a temperatura ambiente, desse modo evitando a formação de quantidades excessivas de estresse residual. O aquecimento martensítico pode ser realizado em uma variedade de banhos, incluindo óleo quente, sal fundido, metal fundido ou leito fluidizado de partículas.

## 2.4 MARTENSITA

O resfriamento brusco dos processos de tratamento térmico de têmpera e martêmpera promovem um rearranjo na estrutura atômica do aço o que resulta em uma estrutura denominada martensita.

A martensita tem como características ser uma estrutura frágil, ou seja possui dureza elevada, tem forma acicular (em forma de agulhas) e de estrutura tetragonal cúbica, mas por ser uma fase metaestável, por isso não aparece no diagrama de fases do ferro carbono (Figura 1), mostrado na página 16 e nessa estrutura todo o carbono permanece intersticial, formando uma solução sólida de ferro supersaturado em carbono, que é capaz de transformar-se em outras estruturas, por difusão, quando aquecida (CALLISTER e RETHWISCH, 2008). Como dito anteriormente, o revenimento alivia as tensões provenientes da têmpera e esse tratamento térmico permite por sua vez que ocorra a formação da martensita revenida, que segue a Equação 1 (CALLISTER e RETHWISCH, 2008).



A martensita revenida por apresentar dureza tão elevada quanto a martensita, mas com uma ductilidade e tenacidade melhoradas, isso devido ao fato que a cementita formada no revenimento reforça a matriz de ferrita, o que faz com que atuem como barreira contra o movimento das discordâncias durante a deformação plástica (CALLISTER e RETHWISCH, 2008).

## 2.5 ENSAIO DE DUREZA

Na engenharia, a dureza é definida como a resistência de um material à indentação. A indentação é a deformação de uma esfera ou ponto duro contra a amostra de material com uma força conhecida, de modo que seja feita uma depressão resultante da deformação plástica abaixo do penetrador. Alguma característica específica da indentação, como seu tamanho ou profundidade é então tomada como uma medida de dureza.

### 2.5.1 Correlação entre dureza e Limite de Resistência

As deformações causadas pelo indentador de dureza são de magnitude similar as ocorridas no Limite de Resistência dos materiais, mas como a deformação plástica ocorre localmente sem a possibilidade de escoar livremente causa sobre o penetrador um estado multiaxial de tensões, assim uma correlação pode ser criada empiricamente entre a dureza e o Limite de Resistência. Um exemplo é para aços de baixa e média resistência e aços ligados podem ser correlacionados como mostrado na equação 2, onde o fator de correlação,  $k$  é igual a 3,45 (DOWLING, 2013) (CALLISTER e RETHWISCH, 2008).

$$\sigma_u = 3,45(HB) \text{ MPa} \quad (2)$$

Como os materiais possuem características variadas entre eles esse fator de conversão entre a Dureza e Limite de Resistência, deve ser calculado a partir da construção da linha de tendência em uma curva Limite de resistência vs Dureza Tabela 2, em seu livro DOWLING (2013) demonstra por meio de tabela a relação entre as dureza em Brinell, Rockwell e Vickers e o Limite de Resistência, assim construindo uma curva com valores e usando da regressão linear e possível encontrar o valor para o fator que correlação  $k$ , pois esse é similar ao valor de inclinação da linha de tendência dos valores.

**Tabela 2 - Curva Limite de Resistência vs Dureza Brinell**

(continua)

Brinell	Vickers	Rockwell		Limite de Resistência, $\sigma_u$	
		HRB	HRC	MPa	ksi
627	667	–	58,7	2393	347
578	615	–	56,0	2158	313
534	569	–	53,5	1986	288
495	528	–	51,0	1813	263
461	491	–	48,5	1669	242
429	455	–	45,7	1517	220
401	425	–	43,1	1393	202
375	396	–	40,4	1267	184
341	360	–	36,6	1131	164
311	328	–	33,1	1027	149

Tabela 2 - Curva Limite de Resistência vs Dureza Brinell

(conclusão)

Brinell HRB	Vickers HV	Rockwell		Limite de Resistência, $\sigma_u$	
		HRB	HRC	MPa	ksi
277	292	–	28,8	924	134
241	253	100,0	22,8	800	116
217	228	96,4	–	724	105
197	207	92,8	–	655	95
179	188	89,0	–	600	87
159	167	83,9	–	538	78
143	150	78,6	–	490	71
131	137	74,2	–	448	65
116	122	67,6	–	400	58

Fonte: Dowling (2013).

### 2.5.2 Dureza Rockwell

A Dureza Rockwell, um ponto de diamante ou uma esfera de aço é empregado como o penetrador. O ponto de diamante, chamado de penetrador de Brale, é um cone com um ângulo de 120° e um final ligeiramente arredondado e esferas de tamanhos variados são usadas. Várias combinações de indentador e força são aplicadas no teste Rockwell regular para acomodar uma ampla gama de materiais. A Tabela 3 demonstra as escalas de dureza bem como suas aplicações. (DOWLING, 2013)

Tabela 3 – Escalas de dureza Rockwell

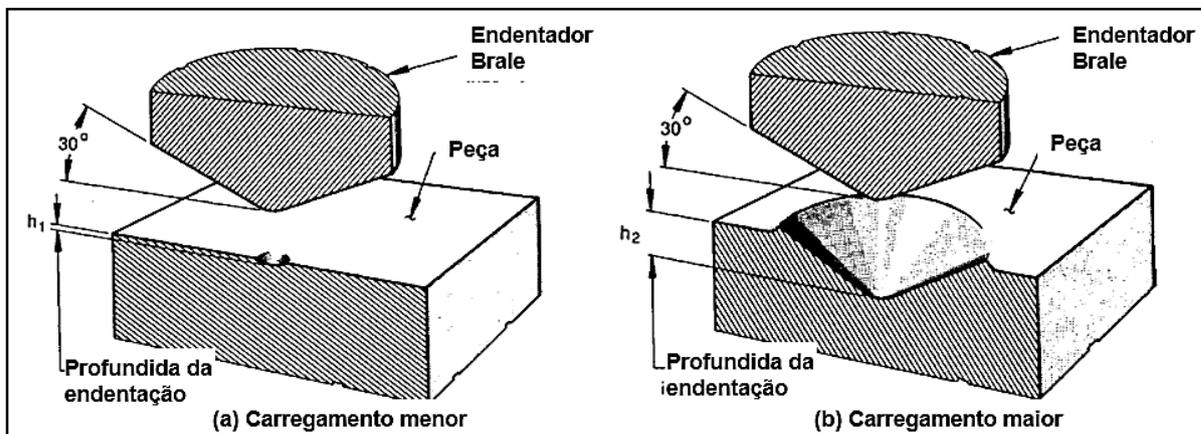
HRX	Tipo de penetrador	Força	Aplicação típica
A	Ponta diamante 120°	60 kg	Material de ferramentas.
D	Ponta diamante 120°	100 kg	Ferro Fundido, chapa de aço.
C	Ponta diamante 120°	150 kg	Aço endurecido, Ferro fundido, liga de Titânio.
B	Esfera de 1,588 mm	100 kg	Aço sem endurecimento, liga de Cobre e Alumínio.
E	Esfera de 3,175 mm	100 kg	Liga de Alumino e Magnésio, Polímeros reforçados.
M	Esfera de 6,35 mm	100 kg	Metais muito macios, Polímeros de alto módulo
R	Esfera de 12,70 mm	60 kg	Metais muito macios, Polímeros de baixo módulo

Fonte: Adaptado de Dowling (2013).

Cada escala de dureza Rockwell tem um valor útil máximo em torno de 100. Um aumento de uma unidade de dureza Rockwell regular representa uma diminuição

na penetração de 0,002 mm. Na Figura 3 e demonstrada as etapas de carregamento da dureza Rockwell. (DOWLING, 2013)

Figura 3 – Processo de dureza Rockwell



Fonte: Adaptado de Dowling (2013).

Assim, o número de dureza pode ser calculado como mostrado na equação 3, onde  $M$  é o limite da escala Rockwell escolhida,  $\Delta h = h_2 - h_1$  é a variação de profundidade das indentações [mm] e Para escalas A, C e D,  $M = 100$ , para escalas B, E, M e R,  $M = 130$  (DOWLING, 2013).

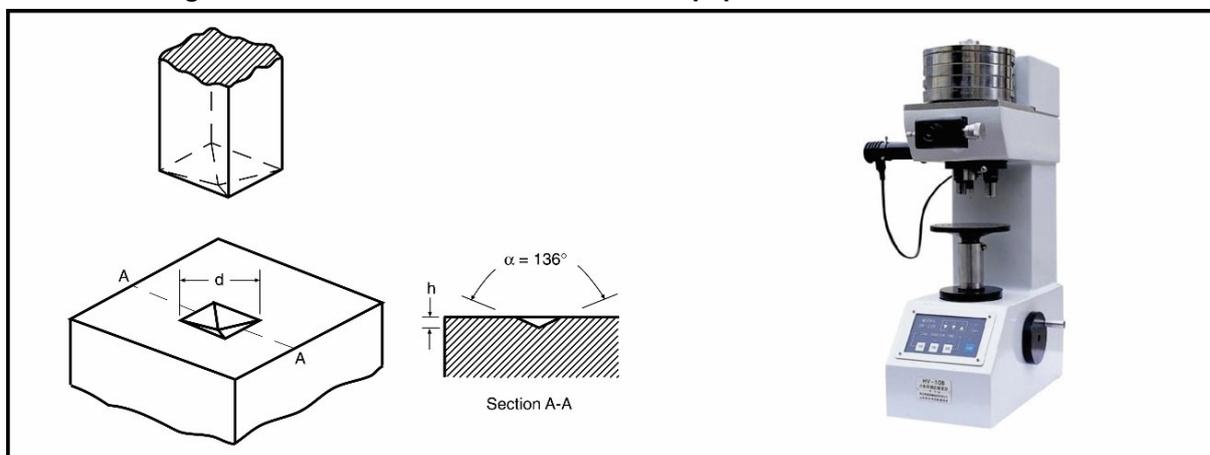
$$HRX = M - \frac{\Delta h}{0,002} \quad (3)$$

## 2.6 DUREZA VICKERS

O teste de dureza Vickers é baseado na dureza Brinell. Difere principalmente porque o penetrador é um ponto de diamante na forma de uma pirâmide com uma base quadrada. O ângulo entre as faces da pirâmide é  $\alpha = 136^\circ$ . Esta forma resulta na profundidade de penetração,  $h$ , sendo um sétimo do tamanho da indentação,  $d$ , medido na diagonal. O número de dureza Vickers HV é obtido pela Equação 4 onde é dividindo a força aplicada  $P$  pela área superficial da depressão piramidal. Onde  $P$  tem seu valor dado em quilogramas e o valor de  $d$  é dado pela média das diagonais da indentação. Na Figura 4 é apresentado as particularidades da indentação Vickers e o equipamento para o ensaio (DOWLING, 2013).

$$HV = \frac{2P}{d^2} \sin \frac{\alpha}{2} \quad (4)$$

Figura 4 – Particularidades do Ensaio e equipamento de dureza Vickers



Fonte: Dowling (2013).

É possível notar que a forma piramidal padrão faz com que o ensaio tenha indentações semelhantes geometricamente independente de seu tamanho, assim espera-se que essa similaridade resulte em um valor de dureza que seja independente da magnitude da força usada, o que permite que o ensaio possa ser empregado com uma variada gama de forças que pode variar de 0,1 a 120kg (DOWLING, 2013).

Como o ensaio prevê o uso de cargas pequenas as diagonais resultantes do ensaio só podem ser medidas por meio de microscopia, que amplia a diagonal para um tamanho que possa ser visível pelo olho humano, assim a equação sofre uma pequena alteração, onde a diagonal tem seu valor dividido pela ampliação,  $A$ , no momento da medição (equação 5). Com a aplicação da microscopia é possível obter tamanhos de indentação em fases específicas de um material, onde apenas é preciso uma preparação química para realçar a cor das fases do material (DOWLING, 2013).

$$HV = \frac{2P}{\left(\frac{d}{A}\right)^2} \sin \frac{\alpha}{2} \quad (5)$$

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo serão abordados os materiais e métodos dos procedimentos que foram utilizados para a execução do presente trabalho. Durante os capítulos serão abordados os seguintes subtítulos Aço AISI H13, martêmpera do Aço AISI H13 e ensaios de dureza.

#### 3.1 AÇO AISI H13

Para a execução deste trabalho foi utilizado o aço AISI H13 fornecido pela empresa Sulferação, que é uma revendedora de metais da empresa Villares Metals. O material fornecido possui um certificado de qualidade, que foi transcrito na Tabela 4, onde consta a composição química, dureza, tratamento térmico e acabamento.

**Tabela 4 – Tabela de qualidade da Villares Metal para o aço AISI H13**

Composição Química							
<b>C</b>	0,39	<b>Co</b>	0,02	<b>W</b>	0,04	<b>B</b>	0,0005
<b>Si</b>	0,97	<b>Cr</b>	5,16	<b>Cu</b>	0,05	<b>Fe</b>	90,588
<b>Mn</b>	0,38	<b>Mo</b>	1,27	<b>Ti</b>	0,005	<b>H</b>	0,00011
<b>P</b>	0,017	<b>Ni</b>	0,13	<b>Nb</b>	0,01	<b>N</b>	0,0195
<b>S</b>	0,001	<b>V</b>	0,92	<b>Al</b>	0,027	<b>O</b>	0,0020
Outras características							
<b>Dureza</b>				194 HRB			
<b>Tratamento Térmico</b>				Recozido			
<b>Acabamento</b>				Descascado			

Fonte: Sulferação (2018).

O material utilizado foi cortado em 3 peças com medidas de  $\varnothing$  1" x 110 mm, foi especialmente produzido pela empresa Sulferação, pois não é padrão normal da empresa fornecer barras de formato retangular ou quadrado com dimensões inferiores a 300 mm de aresta e de que os corpos de prova irão passar por processo de têmpera com durezas diferentes por isso a necessidade de serem 3 peças.

Para produção do corpo de prova foi necessária a usinagem para a padronização das medidas, para esse fim o processo escolhido foi o fresamento, que foi realizado no Laboratório de Processos de Usinagem da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, câmpus Cornélio Procópio.

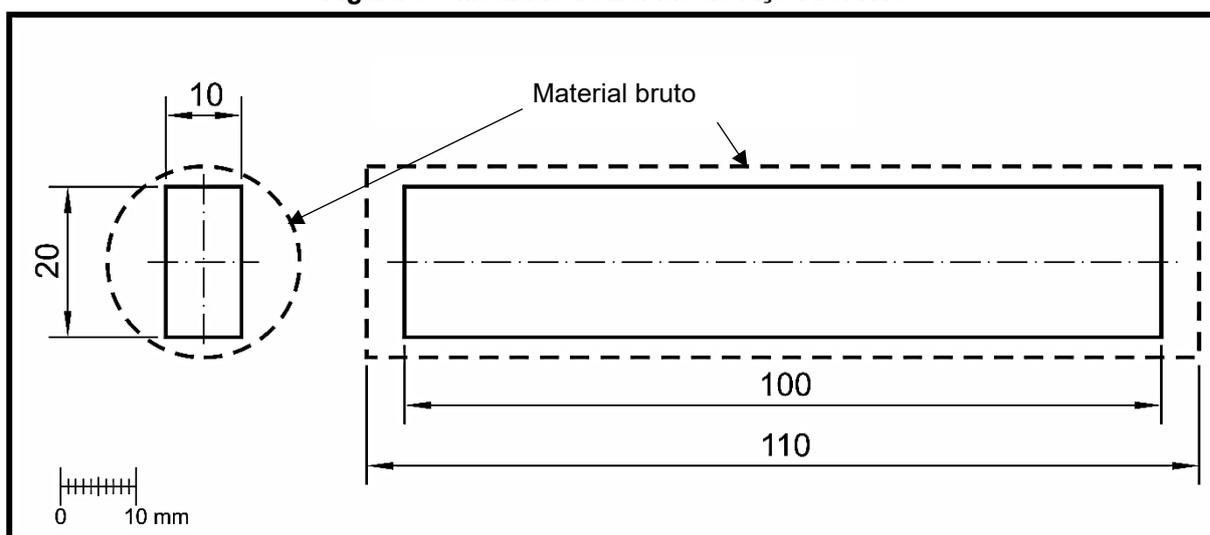
A seleção das medidas das amostras foi baseada nas medidas mínimas necessárias para que o ensaio de dureza não se torne um ensaio de dureza em um

corpo delgado, para ensaio de dureza, que será abordada no próximo subitem desse capítulo, para um ensaio conclusivo de dureza é necessária uma espessura mínima, pois a dureza Rockwell abaixo de 2 mm de espessura é considerado um corpo delgado.

Como a variação escolhida é de 30 a 60 HRC, para um ensaio conclusivo necessita-se de espessuras entre 0,6 a 0,8 mm, ou seja, a espessura escolhida para as amostras está pelo menos 10 vezes maior que espessura mínima para esse ensaio.

A Figura 5 mostra de as medidas finais dos materiais, mas após o processo de fresamento foi deixado um sobremetal de 0,4 mm para posterior processo de retificação, pois, o material passará por um processos de têmpera e revenimento e se faz necessário a usinagem posterior.

**Figura 5 – Medidas acabadas do Aço AISI H13**



**Fonte: Autoria própria**

### 3.2 TEMPERA, MARTÊMPERA E REVENIMENTO

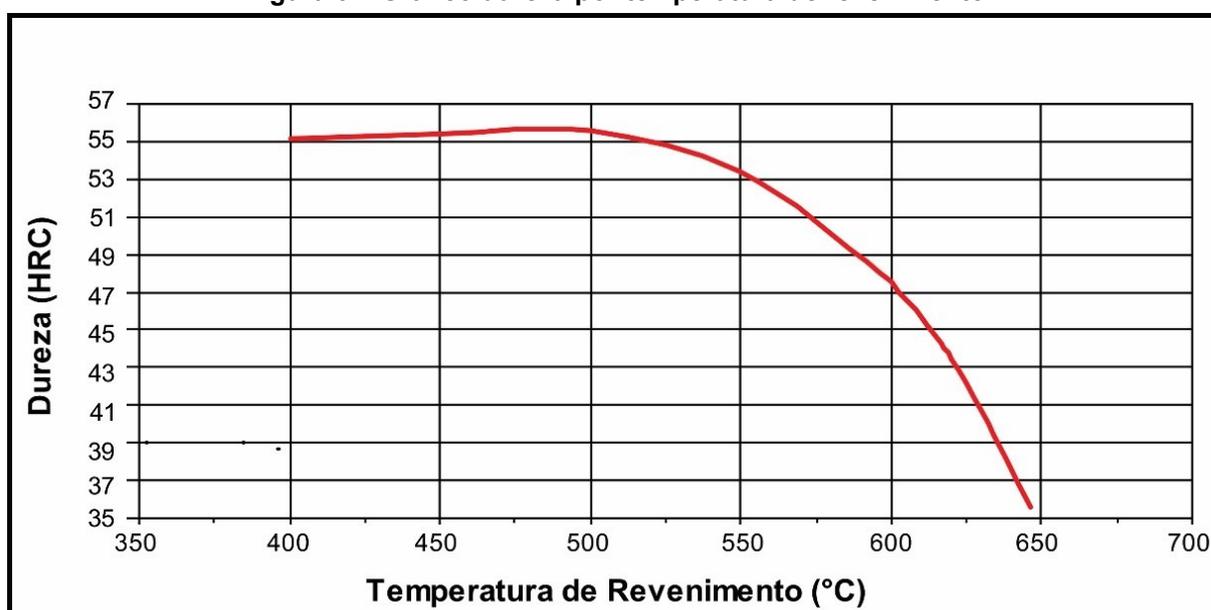
O material após o processo de fresamento foi enviado para empresa Normatic ser tratado termicamente, e nesse trabalho foi descartado utilizar uma amostra sem têmpera, pois, o material é comumente utilizado em moldes e se faz necessário um aumento de sua dureza.

As amostras foram submetidas ao processo de martêmpera e revenimento para aumentar suas durezas, a empresa encarregada desse processo realizou o processo de tempera em forno fechado e posteriormente revenimento para garantir alívio de tensões e dureza desejada, a Figura 6 demonstra a recomendação da

empresa Villares Metals para o processo de revenimento, assim seguindo a seguinte ordem de execução o processo foi realizado:

- Tempera realizada à 980 °C durante 1 hora;
- Resfriamento em martêmpera em banho de sal de 20 min;
- Revenimento para faixas de dureza;
- Amostra 1 – revenimentos à 626 °C e 675° durante duas 2 horas cada;
- Amostra 2 – revenimentos à 575 °C e 625° durante duas 2 horas cada;
- Amostra 3 – revenimentos à 450 °C e 500° durante duas 2 horas cada.

**Figura 6 – Gráfico dureza por temperatura de revenimento**



Fonte: Villares Metals (2006).

### 3.3 ENSAIO DE DUREZAS

Para o trabalho serão necessários que as amostras tenham durezas variadas e para essa realidade todas as amostras passaram por tratamento térmico. Dentro da escala C de dureza Rockwell, os valores podem variar de 0 a 100 HRC, entretanto valores inferiores a 25 HRC são considerados materiais sem tratamento térmico de endurecimento e valores superiores a 70 é recomendada a troca de escala para evitar danificação do penetrador Brale, então para uma análise da influência desse parâmetro foram escolhidas as durezas mostradas na Tabela 5, que apresentam uma faixa ótima de operação do material.

A para o ensaio o equipamento utilizado foi o Durômetro Pantec modelo RBS-M, N° de série 1195, em escala C de dureza Rockwell, o penetrador Brale selecionado

tem como material de sua ponta um diamante com ângulo de cone de 120°, o durômetro foi regulado com uma carga de 10 kgf para inferior e de 150 kgf para superior e o tempo de aplicação de carga e padrão do equipamento sendo esse valor de 10s.

**Tabela 5 – Durezas das amostras**

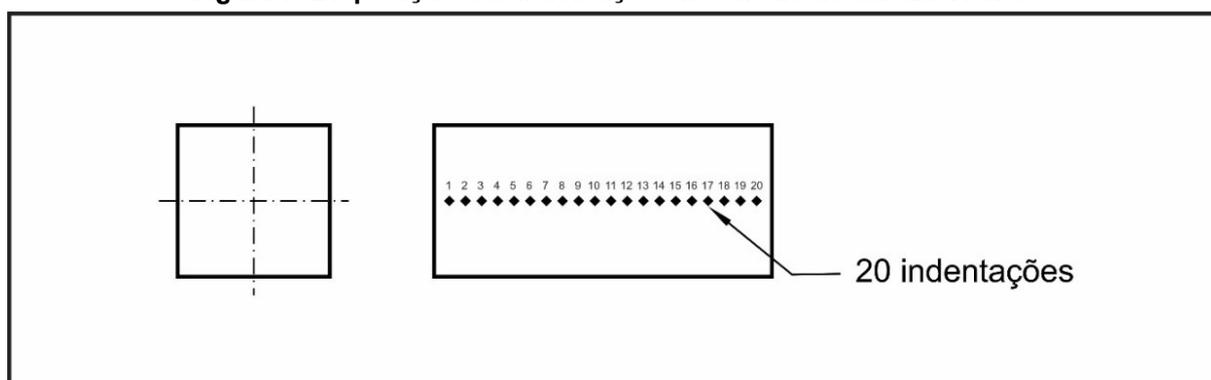
<b>Amostra</b>	<b>Durezas (HRC)</b>	<b>Temperatura de revenimento (°C)</b>
Amostra 1	30 ± 2	675
Amostra 2	45 ± 2	625
Amostra 3	60 ± 2	500

Fonte: Autoria própria.

### 3.4 ENSAIO DE DUREZA VICKERS

Para avaliar a homogeneidade da dureza no material foi escolhido realizar um ensaio de dureza Vickers ao logo do comprimento das amostras, após o processamento explicado no próximo subitem desse capítulo. Ao longo dessa seção transversal serão colhidos ao todo 20 amostras de dureza, ao longo do eixo de simétrica da amostra, serão realizados os ensaios para 3 amostras de cada tratamento térmico assim totalizando 180 pontos de dureza realizados. A Figura 7 demonstra essa disposição par uma amostra de H13 temperado.

**Figura 7- Disposição das indentações no ensaio de dureza Vickers**



Fonte: Autoria Própria.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a aplicação dos processos descritos no capítulo anterior, serão discutidos nesse capítulo os resultados obtidos bem como uma discussão detalhada de sua influência no trabalho.

### 4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DUREZA

Após o tratamento térmico ter sido concluído, foram realizados os ensaios de dureza onde foi verificada a distribuição de dureza ao longo do comprimento nas amostras. Os resultados colhidos do ensaio são apresentados na Tabela 6, que seguindo a norma é necessário mais que 5 amostragens para o cálculo da dureza média e desvio padrão. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009)

**Tabela 6 - Durezas medidas das amostras de H13**

Temperatura de revenimento (°C)	675	625	500
Ensaio Nº	Amostra 1 (HRC)	Amostra 2 (HRC)	Amostra 3(HRC)
Amostragem 1	30	44	57
Amostragem 2	31	46	58
Amostragem 3	30	45	58
Amostragem 4	30	46	59
Amostragem 5	30	46	58
Amostragem 6	32	45	59
Amostragem 7	31	45	60
Amostragem 8	29	44	59
Amostragem 9	29	45	58
Amostragem 10	30	45	58
<b>Média</b>	30,2	45,1	58,4
<b>Desvio Padrão</b>	0,68	0,54	0,68

Fonte: Autoria própria.

Para o cálculo da média e desvio padrão, foi utilizado o *software* Microsoft Excel® que segue como base a equação 6 e 7 para o cálculo da média e desvio padrão.

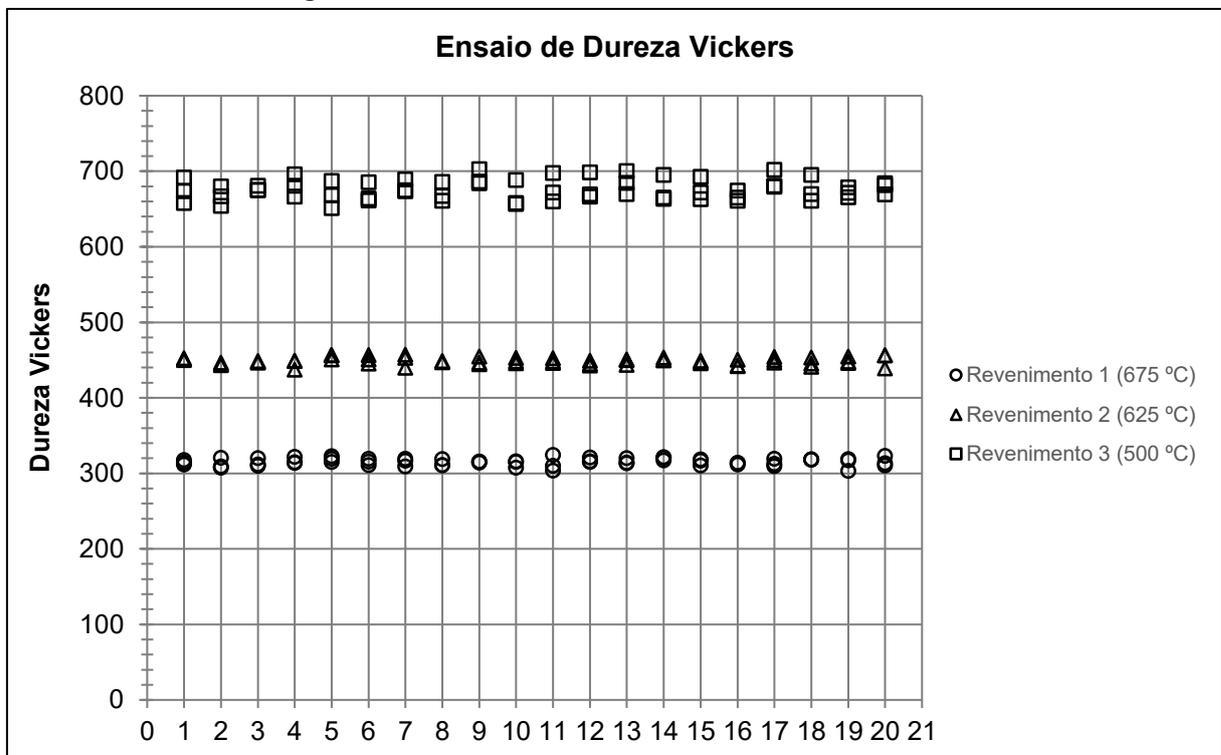
$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta x_i)^2}{n-1}} \quad (7)$$

#### 4.2 RESULTADO DO ENSAIO DE DUREZA VICKERS

Após a preparação das amostras nas medidas de 10 x 10 x 20 mm, cada amostra foi submetida a um ensaio de microdureza Vickers, para que se fosse averiguado a homogeneidade da dureza nas amostras, uma vez que o resfriamento acontece de forma gradual nos materiais, isso pode gerar uma diferença de dureza no núcleo se comparado com a superfície do material, os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM E92, onde uma carga de 300 g foi aplicada por 15 segundos e os resultados desse ensaio são apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Resultados dos ensaios de Dureza Vickers



Fonte: Autoria Própria.

Após reunir os dados como mostrado na Figura 8, foi necessário calcular a média dos valores e seu desvio padrão, pois assim é possível realizar um comparativo

com o ensaio de dureza Rockwell, os valores das medias e desvios padrões são apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7 - Médias e desvio padrão**

<b>Amostra N°</b>	<b>Média (HV<sup>0,3</sup>)</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Temperatura de revenimento (°C)</b>
Revenimento 1A	315,9		
Revenimento 1B	312,4	3,50	500
Revenimento 1C	316,7		
Revenimento 2A	445,6		
Revenimento 2B	454,2	3,25	625
Revenimento 2C	449,9		
Revenimento 3A	668,2		
Revenimento 3B	690,2	6,92	675
Revenimento 3C	669,1		

**Fonte: Autoria Própria.**

Com os dados foi possível realizar um comparativo entre os valores reais coletados e os fornecidos pela norma ASTM E140, assim por meio de interpolação linear dos valores de microdureza Vickers definir os respectivos valores de dureza Rockwell, esse comparativo está apresentado na Tabela 8.

**Tabela 8 - Comparativo dados Reais e norma ASTM E140**

<b>Valor Real</b>		<b>Valor Norma ASTM E140</b>	
<b>HV</b>	<b>HRC</b>	<b>HRC</b>	<b>Erro</b>
315,0	30,2	31,6	4,43%
449,9	45,1	45,3	0,44%
675,8	58,4	59,1	1,18%

**Fonte: Autoria Própria**

Nos dados apresentados os valores reais, são os coletados a partir de ensaio e os valores da norma foram interpolados linearmente a partir da Tabela 1 que se encontra na página 3 na norma ASTM E140), assim pode ser calculado o quão próximo os valores dos ensaios se aproximam dos tabelados pela norma.

#### 4.3 ESTIMATIVA DE LIMITE DE RESISTÊNCIA

A partir dos resultados dos ensaios de dureza é possível se estimar valores para os Limites de resistência do aço AISI H13 temperado, em seu Trabalho PAVLINA E TYNE (2008) chegaram a uma expressão que pode correlacionar a dureza com o

Limite de Resistência e Escoamento dos aços, como demonstrado nas Equações 8 e 9.

$$\sigma_u = -99,8 + 3,734HV, R^2 = 0,9347 \quad (8)$$

$$\sigma_0 = -90,7 + 2,876HV, R^2 = 0,9212 \quad (9)$$

Assim com sua dedução e possível encontrar um valor aproximado do Limite de Resistência e escoamento para as amostras ensaiadas nessa pesquisa, valores os quais são demonstrados na Tabela 9.

**Tabela 9 - Tensões estimadas para o aço AISI H13**

	Limite de Resistência [MPa]	Limite de Escoamento [MPa]	Força Máxima [N]
Revenimento 1A	1079,9	817,9	107.991,2
Revenimento 1B	1066,5	807,6	106.654,8
Revenimento 1C	1082,7	820,1	108.269,4
Revenimento 2A	1563,9	1190,8	156.394,8
Revenimento 2B	1596,1	1215,5	159.612,2
Revenimento 2C	1580,2	1203,2	158.015,2
Revenimento 3A	2395,2	1831,0	239.515,6
Revenimento 3B	2477,5	1894,4	247.754,5
Revenimento 3C	2398,5	1833,5	239.846,9

Fonte: Autoria Própria.

Os valores apresentados na Tabela 9 podem ser comparados com os valores teóricos apresentados na Tabela 1 encontrada na Página 15, onde e possível constar que para 55 HRC o Limite de Resistência e Limite de Escoamento se encontram entre as faixas de dureza dos revenimento 2 e 3

**Tabela 10 - - Propriedades do aço AISI H13 e - Tensões estimadas para o aço AISI H13**

	Limite de Resistência [MPa]	Limite de Escoamento [MPa]
Revenimento 2 (45,1 HRC)	1580,07	1203,17
Dados Tabela 1 (55,0 HRC)	1990,00	1650,00
Revenimento 3 (58,4 HRC)	2423,73	1852,97

Fonte: Autoria Própria.

## 5 CONCLUSÃO

Tendo em vista os objetivos delineados neste trabalho, realiza diferentes tratamento térmicos de revenimento no aço AISI H13 e avaliar seu comportamento mecânico, conclui-se que:

- Ao se realizar o tratamento térmico de martêmpera e revenimento a faixa de dureza que permeia a dureza de 45 HRC mantem os melhores resultados de endurecimento, uma vez que após os tratamentos térmicos os seus resultados de ensaios de dureza apresentaram menor desvio padrão o que indica uma uniformidade maior para o processo, especialmente para níveis de dureza de 45 HRC obtida a temperatura de revenimento é de 625 °C de temperatura essa.
- Pelo ensaio de microdureza Vickers foi possível avaliar a homogeneidade da dureza na seção transversal das amostras, assim o revenimento 2 apresentou uma melhor distribuição das durezas no material, distribuição essa comprovada por seu baixo desvio padrão, do que pelos os revenimento 1 e 3.
- A faixa de dureza de 45 HRC ainda apresentou uma maior linearidade com os resultados tabelados pela norma ASTM E140 apresentado um erro de apenas 0,44 %, portanto, garante o uso das equações para estimar os valores de Limite de Resistência e Limite de Escoamento, para fins de projetos de engenharia. Por outro lado, o coeficiente de segurança para tensões englobaria certos erros, o que faz o método de ensaio de dureza Rockwell o mais adequado, rápido e barato para aplicação industrial e em engenharia.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios de compressão e tração em amostras do aço para melhor definição das equações de correlação de dureza e Limite de resistência e Limite de Escoamento.
- Realizar análise de Difração de Raios-X e Microscopia Eletrônica por Varredura para analisar melhor a distribuição de fases no aço temperado e suas composições químicas.
- Realizar ensaio de fadiga para avaliar quantidades de ciclos suportados pelo material e confrontar com valores teóricos tabelados.

## REFERÊNCIAS

ASM INTERNATIONAL. **ASM handbook**: Heat Treating. Ohio: ASM International, v. 4, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM ISO 6508 - 1: Materiais metálicos Ensaio de dureza Rockwell**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 39. 2009.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E92**: Standard test methods for Vickers hardness of metallic materials. West Conshohocken: ASTM International, 1997.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E9**: Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature. West Conshohocken: ASTM International, 2000.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E140**: EStandard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness. West Conshohocken: ASTM International, 2013.

BUTTON, S. T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados**. Relatório - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, p. 88. 2016.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciências e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008. 705 p. ISBN 8521612885.

DOWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials**: Engineering methods for deformation, fracture and fatigue. Virginia: Pearson Educational Limited, v. 4, 2013.

MATWEB. MATWEB. **AISI Type H13 Hot Work Tool Steel**, 2018. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=e30d1d1038164808a85cf7ba6aa87ef7&ckck=1>>. Acesso em: 01 Out 2018.

PAVLINA, E. J.; TYNE, C. J. V. **Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels**. ASM International. [S.I.], p. 7. 2008.

RIBEIRO, J. L. S. **Fresamento do aço VHSUPER nos estados recozido e temperado com metal duro e cermet**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 244. 2007.

SANTOR, L. C. D.; CANALE, L. D. C. F. **Estudo dos parâmetros de têmpera e sua influência na micro estrutura e nas propriedades mecânicas em aços-ferramenta**. Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 19. 2005.

SENAI. **Tratamento térmico**. 1. ed. Itatiba: Divisão de Recursos Didáticos da Diretoria de Educação do Departamento Regional do SENAI-SP , v. I, 2000.

VALE, A. R. M. D. **Tratamento Térmico**. 1<sup>a</sup>. ed. Belém: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, v. I, 2011. 130 p.

VILLARES METALS. **Aços para trabalho a quente: VH13**. [S.l.], p. 2. 2006.