

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Trabalho de Conclusão de Curso

**Efeito de diferentes condições de resfriamento na dureza,  
microestrutura e distorção nos aços AISI H13, AISI 5160, AISI O1 e  
AISI 1045.**

Autor

**Felipe dos Santos Andreassa**

Orientador

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lauralice de Campos F. Canale**

São Carlos

2016



Felipe dos Santos Andreassa

Efeito de diferentes condições de resfriamento na dureza, microestrutura e distorção nos aços AISI H13, AISI 5160, AISI O1 e AISI 1045.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e Manufatura.

Orientador: Prof. Dra. Luralice de Campos F. Canale

São Carlos

2016



AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

A557e      Andreassa, Felipe dos Santos  
              Efeito de diferentes condições de resfriamento na  
              dureza, microestrutura e distorção nos aços AISI H13,  
              AISI 5160, AISI O1 e AISI 1045 / Felipe dos Santos  
              Andreassa; orientadora Lauralice de Campos F. Canale.  
              São Carlos, 2016.

              Monografia (Graduação em Engenharia De Materiais e  
              Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da  
              Universidade de São Paulo, 2016.

              1. Aços. 2. Meios de resfriamento. 3. Tratamentos  
              térmicos. 4. Têmpera interrompida. 5. Têmpera  
              convencional . I. Título.



## **DEDICATÓRIA**

*Aos meus pais, irmã, avós e família, por todo o apoio  
incondicional durante esta jornada*





## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Mara e Orlando, e irmã, Leticia, pelo amor, confiança, apoio e incentivo incondicional, não apenas durante estes anos, mas por todas as etapas da minha vida até agora.

Aos meus tios e avós que sempre se mostraram prontos para todos os momentos.

À minha orientadora, Luralice de Campos Franceschini Canale, pelo suporte, correções, ensinamentos, sempre simpática e agradável.

Ao aluno de doutorado, Luigi Leonardo Mazzucco Albano, pelo compartilhamento de conhecimento e pela ajuda na parte experimental deste trabalho.

Aos funcionários da Oficina Mecânica Maresa, pela excepcional vontade de ajudar e pelo empréstimo dos equipamentos.

Aos técnicos e funcionários do Departamento de Engenharia de Materiais e Manufatura, em especial, ao técnico Ricardo Gomes, pela disposição em ajudar os alunos.

Aos meus amigos de curso, pelos anos incríveis e, certamente, memoráveis.



## RESUMO

ANDREASSA, F. S. **Efeito de diferentes condições de resfriamento na dureza, microestrutura e distorção nos aços AISI H13, AISI 5160, AISI O1 e AISI 1045.** 2016. 78f. Monografia – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

A têmpera é um tratamento térmico muito utilizado no meio industrial, devido às importantes propriedades que os materiais obtêm no processo. Porém, existe o risco de distorções, trincas e a necessidade de revenimento. Um processo de têmpera interrompida, denominado têmpera intensiva, tem como objetivo a criação de tensões compressivas na superfície do componente, reduzindo estes fatores, além de aumentar a vida em fadiga. Neste trabalho realizou-se a têmpera convencional e interrompida em 4 tipos de aços distintos, com diferentes níveis de carbono e elementos de liga, sob diferentes severidades do meio de resfriamento, a fim de avaliar a efetividade de cada composição em cada meio. Para isto, foram analisadas as durezas obtidas após cada tratamento, juntamente com as distorções e microestruturas resultantes do processo. Analisando os resultados, os meios com maior severidade se mostraram eficazes em reduzir a camada de vapor, que é a principal causa de não uniformidade do tratamento durante o resfriamento, obtendo menores valores de distorções e reduzindo a possibilidade de variações na dureza. Todos os resultados de dureza das têmperas interrompidas são um pouco menores que os valores das têmperas convencionais, indicando a presença do autorevenimento do processo interrompido. As diferentes microestruturas obtidas em algumas situações indicam a necessidade de adequação do tratamento interrompido para cada composição distinta, levando em conta a temperabilidade. O processo utilizado não pode ser denominado como têmpera intensiva por não possuir dados conclusivos sobre a obtenção de tensões residuais compressivas na superfície dos componentes tratados.

**Palavras chave:** Aços, Meios de resfriamento, Tratamentos térmicos, Têmpera interrompida, Têmpera convencional



## ABSTRACT

ANDREASSA, F. S. **Effect of different conditions of cooling in hardness, microstructure and distortions of steels AISI H13, AISI 5160, AISI O1 and AISI 1045.** 2016. 78p. Monograph – São Carlos School of Engineering – University of São Paulo, São Carlos, 2016.

Quenching is a heat treatment used very often in industry giving important properties to the materials submitted to this process. However there is a risk of distortion, cracks and tempering is also necessary after quenching. There is a process of interrupted quenching named as intensive quenching that has as goal of creating compressive stresses on the surface of the component, reducing cracks potencial, besides of raising the fatigue resistance. In this work quenching was performed in both process: direct and interrupted using 4 different steels with distinct carbon content and alloy elements, under different cooling rates in order to evaluate quenching response of each steel composition. Hardness measurements were made after each treatment, as well as distortions evaluation and microstructures resultants in each process. Results show that, most severity quenchants showed more efficiency in reducing the film boiling stage which is the main cause of non uniformity during the cooling, getting lower distortion values and better hardness control. All the hardness results from interrupted quenching shown values lower than those from the direct quenching, maybe due to the self-tempering of this process. Microstructure obtained in some situations show the need to adapt the interrupted process according to each steel composition, considering the hardenability. The interrupted process utilized can not be termed as intensive quenching once there are not conclusive data about the residual compressive stresses on treated components surface.

**Keywords:** Steels, Cooling rate, Heat Treatment, Interrupted Quenching, Direct Quenching



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Diagrama de Fases Fe-Fe<sub>3</sub>C
- Figura 2 - Classificação dos aços
- Figura 3 - Estruturas da Austenita - Martensita
- Figura 4 - Curva TTT
- Figura 5 - Curva TTT para um aço AISI 1050
- Figura 6 - Curva TTT para um aço AISI 4340
- Figura 7 - Estágios de resfriamento em meio líquido
- Figura 8 - Fases do resfriamento no componente e a mudança no coeficiente de transferência de calor de acordo com o estágio de resfriamento
- Figura 9 - Probabilidade de formação de trincas em função da taxa de resfriamento
- Figura 10 - Modelo de tensões superficiais obtidos através da têmpera intensiva
- Figura 11 - Modelo do corpo de prova utilizado
- Figura 12 - Forno FL-1300
- Figura 13 - Forno EDG 3P-S
- Figura 14 - Corpos de prova prontos para o tratamento
- Figura 15 - Tanque de resfriamento
- Figura 16 - Meio de resfriamento sem agitação
- Figura 17 - Meio de resfriamento com alta agitação
- Figura 18 - Corpos de prova de têmpera interrompida
- Figura 19 - Durômetro Leco RT-240
- Figura 20 - Esquema para o ensaio de distorção do corpo de prova
- Figura 21 - Padrão adotado para as distorções
- Figura 22 - Corpos de prova para micrografia
- Figura 23 - Microestrutura variada do aço AISI O1, juntamente com descarbonetação na superfície, resultante da Têmpera Interrompida em Solução Salina. Ataque: Nital 2%
- Figura 24 - Microestrutura de martensita fina com carbonetos do aço AISI O1, resultante da Têmpera Convencional em Solução Salina. Ataque Nital 2%
- Figura 25 - Estrutura martensítica do aço AISI H13, resultante dos processos de Têmpera. Ataque: Vilella

Figura 26 - Trinca no corpo de prova de aço AISI H13, referente à Têmpera Convencional em Solução Salina. Ataque: Vilella

Figura 27 - Microestrutura não temperada do aço AISI 1045 para das têmperas interrompidas. Regiões escuras de perlita e claras indicam microestrutura ferrítica. Ataque: Nital 2%

Figura 28 - Formação de martensita e aparecimento de uma trinca no aço AISI 1045, durante têmpera convencional em solução salina. Ataque: Nital 2%

Figura 29 - Estrutura mista de perlita + martensita no aço AISI 1045, para a têmpera convencional em água. Ataque: Nital 2%

Figura 30 - Microestrutura de perlita e ferrita resultante de têmpera interrompida em água no aço AISI 5160. Ataque: Vilella

Figura 31 - Microestrutura martensítica na região superficial resultante de têmpera convencional em aço AISI 5160. Ataque: Vilella

Figura 32 - Microestrutura martensítica com perlita no contorno de grão, resultante de têmpera convencional no aço AISI 5160. Ataque: Vilella

Figura 33 - Perfil de Dureza - AISI O1 – Têmpera em Solução Salina

Figura 34 - Perfil de Dureza - AISI O1 - Têmpera em Água

Figura 35 - Perfil de Dureza - AISI H13 – Têmpera em Solução Salina

Figura 36 - Perfil de Dureza - AISI H13 – Têmpera em Água

Figura 37 - Perfil de Dureza - AISI 5160 – Têmpera em Solução Salina

Figura 38 - Perfil de Dureza - AISI 5160 – Têmpera em Água



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Valores do fator de Grossmann para diferentes meios

Tabela 2 - Composição aço AISI 1045

Tabela 3 - Composição aço AISI H13

Tabela 4 - Composição aço AISI O1

Tabela 5 - Composição aço AISI 5160

Tabela 6 - Dureza AISI O1 (HRC)

Tabela 7 - Distorções AISI O1 (mm)

Tabela 8 - Dureza AISI H13 (HRC)

Tabela 9 - Distorções H13 (mm)

Tabela 10 - Dureza AISI 1045 (HRC)

Tabela 11 - Distorções AISI 1045 (mm)

Tabela 12 - Dureza AISI 5160 (HRC)

Tabela 13 - Distorções AISI 5160 (mm)

Tabela 14 - Resultado da medição de tensão residual (MPa)

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – American Iron and Steel Institute

CCC – Cúbico de Corpo Centrado

CFC – Cúbico de Face Centrado

SAE – Society of Automotive Engineers

TC – Têmpera Convencional

TCC – Tetragonal de Corpo Centrado

TI – Têmpera Interrompida



# Sumário

1. Introdução.....	22
2. Revisão Bibliográfica .....	23
2.1 Sistema Ferro-Carbono .....	23
2.1.1 Classificação dos aços.....	24
2.1.2 Efeito dos elementos de liga nos aços.....	25
2.2 Tratamentos térmicos .....	25
2.2.1 Têmpera e martensita .....	26
2.2.2 Meios de resfriamento.....	30
2.2.3 Tipos de Têmpera.....	32
2.2.3.1 Têmpera direta.....	32
2.2.3.2 Têmpera Interrompida.....	33
2.2.3.3 Têmpera Intensiva.....	33
2.3 Tensões na têmpera .....	37
2.3.1 Trincas.....	38
3. Objetivos .....	40
4. Materiais e Métodos .....	41
4.1 Aços selecionados para o trabalho.....	41
4.1.1 AISI 1045.....	41
4.1.2 AISI H13.....	41
4.1.3 AISI O1 .....	42
4.1.4 AISI 5160.....	42
4.2 Elaboração dos corpos de prova .....	43
4.3 Tratamentos térmicos .....	43
4.3.1 Normalização .....	45
4.3.2 Têmpera .....	45
4.4 Ensaio de dureza.....	48
4.5 Ensaio de distorções .....	49
4.6 Microscopia.....	50
5. Resultados e Discussões .....	52
5.1 AISI O1 .....	52
5.2 AISI H13 .....	55
5.3 AISI 1045.....	58
5.4 AISI 5160.....	62
5.5 Perfil de dureza.....	65

5.6	Tensões residuais.....	69
6.	Conclusões.....	70
	Referências.....	72
	Anexo A – Dureza dos aços no estado inicial.....	74
	Anexo B – Dureza dos aços normalizados.....	75
	Anexo C – Dureza dos aços temperados.....	76
	Anexo D – Distorções dos aços normalizados.....	77
	Anexo E – Distorções dos aços temperados.....	78

## 1. Introdução

A evolução da engenharia se deve muito ao desenvolvimento dos materiais metálicos. Principalmente nos últimos tempos, o conhecimento acumulado sobre as relações entre a composição química, estrutura, propriedades e o efeito do processamento nestas características alcançou um patamar em que é possível o desenvolvimento científico e o aprimoramento, tanto de ligas quanto de processos. Da mesma forma em que novas ligas possuem propriedades extremamente diferenciadas, novos processos podem fazer com que ligas convencionais obtenham propriedades igualmente diferenciadas.

Dentre os processos de tratamento térmico, a têmpera é bem consolidada no meio industrial devido as propriedades extremamente importantes que este tratamento fornece aos componentes, proporcionando níveis altos de resistência e dureza pela formação da microestrutura martensítica. Entretanto, neste processo a presença de distorções e o aparecimento de trincas não são incomuns. A têmpera convencional é um processo antigo na história e evolução da metalurgia e mecânica, mas apesar disso ainda existe a oportunidade de melhoria do processo. Com isto em mente, em 1964, Nikolai I. Kobasko publicou diversos artigos, com base teórica e prática, apresentando e formalizando ao mundo um novo processo, conhecido hoje como têmpera intensiva.

A têmpera intensiva tem como objetivo a obtenção de altas tensões residuais de compressão na superfície do componente, como resultado da formação da martensita em um meio de resfriamento com alta severidade. Estas tensões residuais compressivas são extremamente úteis do ponto de vista do controle do processo, pois possibilitam uma distorção mínima na peça e inibem o aparecimento e propagação de trincas. Além disto, a têmpera intensiva também possibilita uma etapa de autorevenimento durante o próprio processo.

Em um panorama futuro, a têmpera intensiva poderia se tornar um processo muito eficaz no tratamento de peças críticas em projetos, visando a melhor resistência de elementos mecânicos, e principalmente, aqueles que são mais suscetíveis ao desgaste e a fadiga. Este trabalho pretende explorar a efetividade deste processo em alguns tipos de aços já bastante utilizados na indústria.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1 Sistema Ferro-Carbono

Os principais produtos da indústria siderúrgica são os aços e os ferros fundidos. Ambos são basicamente ligas de Ferro-Carbono, diferindo na quantidade de carbono, possuindo elementos de liga, que lhes conferem microestrutura e propriedades diferentes. O diagrama de equilíbrio Ferro-Carbono pode ser observado na Figura 1, ilustrando as composições em carbono do aço e ferro fundidos.

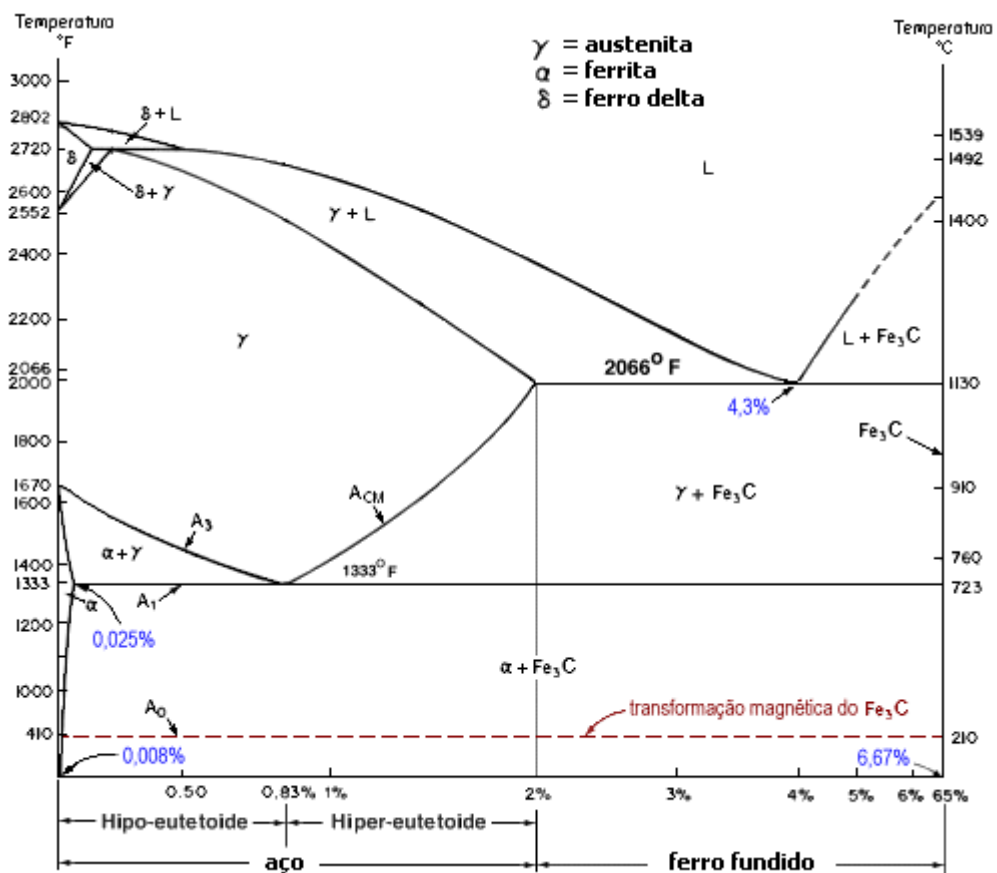


Figura 1- Diagrama de Fases Fe-Fe<sub>3</sub>C.

([http://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico). Acesso em 27/11/2016)

O eixo das composições, neste diagrama, se estende até 6,67% pois é o ponto máximo de solubilização do carbono, no qual é formada a cementita. A cementita é um carboneto de ferro de alta dureza e dá origem a uma outra fase, chamada de perlita, ambas extremamente importante no estudo de aços [1]. Essas transformações são governadas pela difusão do carbono na matriz.

Na prática, o diagrama Ferro-Carbono é na realidade reduzido ao digrama Ferro-Carboneto de Ferro, pois acima da concentração de 6,67% de carbono, ocorre somente a adição de grafita à liga, não agregando propriedades. [2]

### 2.1.1 Classificação dos aços

Os aços são classificados principalmente devido a sua concentração de carbono e seus elementos de liga, ou ainda, podendo também ser classificados de acordo com suas aplicações.

No Brasil, o sistema mais utilizado para classificação dos aços é seguido pela ABNT, que é baseado na NBR NM 87 [3] e é praticamente o mesmo modelo utilizado pelos internacionais AISI e SAE.

Basicamente, neste modelo, os aços são descritos como um conjunto de algarismos, em geral quatro, sendo os dois primeiros para descrever a família do aço e os dois últimos números apresentam o teor de carbono em centésimos de porcentagem. Este modelo é observado na tabela da Figura 2.

Designação		Tipo de aço
SAE	AISI	
10XX	C10XX	Aços-carbono comuns
11XX	C11XX	Aços de usinagem (ou corte) fácil, com alto S
13XX	13XX	Aço-manganês com 1,75% de Mn
15XX	15XX	Aço-manganês com 1,00% de Mn
23XX	23XX	Aço-níquel com 3,50% de Ni
25XX	25XX	Aço-níquel com 5,00% de Ni
31XX	31XX	Aço-níquel-cromo com 1,25% de Ni e 0,65% de Cr
33XX	E33XX	Aço-níquel-cromo com 3,50% de Ni e 1,55% de Cr
40XX	40XX	Aços-molibdênio com 0,25% de Mo
41XX	41XX	Aços-cromo-molibdênio com 0,50% ou 0,90% de Cr e 0,12% ou 0,20% de Mo
43XX	43XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 1,80% de Ni, 0,50% ou 0,80% de Cr e 0,25% de Mo
46XX	46XX	Aços-níquel-molibdênio com 1,55% ou 1,80% de Ni e 0,20% ou 0,25% de Mo
47XX	47XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 1,05% de Ni, 0,45% de Cr e 0,20% de Mo
48XX	48XX	Aços-níquel-molibdênio com 3,50% de Ni e 0,25% de Mo
50XX	50XX	Aços-cromo com 0,28% ou 0,65% de Cr
50BXX	50BXX	Aços-cromo-boro com baixo teor de Cr e no mínimo 0,0005% de B
51XX	51XX	Aços-cromo com 0,80% a 1,05% de Cr
52XX	52XX	Aços-rolamento
61XX	61XX	Aços-cromo-vanádio com 0,80% ou 0,95% de Cr e 0,10% ou 0,15% de V
86XX	86XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com baixos teores de Ni, Cr, e Mo
87XX	87XX	Idem
92XX	92XX	Aços-silício-manganês com 0,85% Mn e 2,00% de Si
93XX	93XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 3,25% de Ni, 1,20% de Cr e 0,12% de Mo
94BXX	94BXX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com baixos teores de Ni, Cr, Mo e, no mínimo, 0,0005% de B.
98XX	98XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 1,00% de Ni, 0,80% de Cr e 0,25% de Mo

Figura 2- Classificação dos aços. (<http://www.galvaco.com.br/sistema-de-codificacao-aisi-sae.html>. Acesso em 27/11/2016)



### **2.1.2 Efeito dos elementos de liga nos aços**

Para que os aços obtenham propriedades diferenciadas, é necessário que eles possuam elementos de liga na sua composição. Cada elemento adicionado na liga contribui de alguma forma, seja para melhorias de resistência ao desgaste, resistência à corrosão, resistência térmica, entre outras.

Os elementos adicionados na liga influenciam diretamente no equilíbrio do diagrama ferro-carbono, em transformações alotrópicas, na formação de novas fases e também interagem com os outros elementos adicionados. De forma simplificada, os elementos podem ser classificados de duas formas distintas, estabilizadores de austenita e estabilizadores de ferrita. Os elementos estabilizadores de austenita, aumentam a faixa de temperatura em que a austenita fica estável, através da diminuição da temperatura de transformação de austenita em ferrita  $\alpha$  e do aumento de temperatura de austenita em ferrita  $\delta$ . Para os elementos estabilizadores de ferrita, a formação de austenita é restringida, favorecendo o campo ferrítico. [4]

Em relação a interação com o carbono presente no aço, os elementos são divididos em formadores de carbeto e não-formadores de carbeto.

O efeito combinado dos elementos de liga juntamente com tratamento térmico produz uma variedade enorme de microestruturas e propriedades. [4,5]

## **2.2 Tratamentos térmicos**

Os tratamentos térmicos são uma ferramenta importantíssima no processamento dos metais, consistindo no aquecimento e resfriamento controlados da peça. Sua função é a de alterar a microestrutura da liga e conseqüentemente suas propriedades mecânicas. Os tratamentos são fortemente influenciados por três fatores, a temperatura, o tempo e a velocidade de resfriamento. A uniformidade destes fatores é vital para um bom tratamento[5]. A temperatura do tratamento depende do material, das dimensões da peça e da microestrutura desejada. O maior tempo durante o tratamento garante maior segurança de que ocorreu a dissolução completa das fases para a posterior transformação. Tempo a temperaturas altas trazem o aumento do tamanho de grão. A velocidade de resfriamento depende do material, da fase ou microestrutura desejada.

Nos processos de tratamento térmico normalmente eleva-se o componente a ser tratado em temperaturas dentro do campo austenítico, campo  $\gamma$  no diagrama da Figura 1. A partir de diferentes velocidades de resfriamento pode-se obter microestruturas de diferentes níveis de dureza. Em ordem crescente de dureza tem-se: ferrita < perlita < bainita < martensita. Normalmente, quanto maior a velocidade de resfriamento, maior a dureza e resistência é conferida ao componente tratado. [13]

### 2.2.1 Têmpera e martensita

A têmpera é um tratamento térmico que visa o endurecimento do aço, consistindo no aquecimento em temperaturas acima da zona crítica, e seguido por um resfriamento rápido, objetivando atingir a temperatura de transformação martensítica ( $M_s$ ) em um curto espaço de tempo (velocidade crítica de resfriamento). Este tratamento tem como produto a martensita. Durante este processo, o resfriamento é tão rápido que a difusão do carbono da austenita não ocorre. Assim, a transformação ocorre por cisalhamento da estrutura, gerando uma estrutura metaestável. A martensita assume uma configuração tetragonal de corpo centrado (TCC). A Figura 3 ilustra esta mudança. Devido a diferença nas estruturas cristalinas, a austenita é ligeiramente mais densa do que a martensita, então durante a transformação de fase que ocorre na têmpera, há um aumento de volume da liga e conseqüentemente ocorre a formação de tensões internas. [2,4,6]

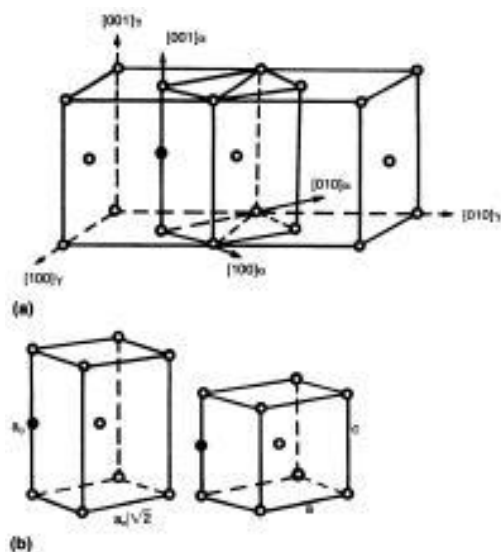


Figura 3- Estruturas da Austenita – Martensita. (Retirado de [4]).

Conforme já comentando, de todas as microestruturas que podem ser obtidas em um aço, a martensita é a mais resistente e mais dura, e conseqüentemente, muito frágil e com pouquíssima ductilidade. No estado como temperado, apesar de ser altamente resistente, a martensita não consegue ser empregada para a maioria das aplicações. Porém, existe um tratamento térmico, denominado de revenimento, no qual o objetivo é de aumentar a ductilidade e a tenacidade do aço temperado. Este tratamento consiste em aquecer o aço martensítico numa temperatura abaixo do eutetóide (250°C até 650°C, dependendo do aço), por um determinado tempo. Durante esse tempo, ocorre o alívio de tensões internas e, principalmente, através de processos de difusão do carbono, a martensita temperada é transformada em martensita revenida. A grande diferença é que a martensita revenida é composta por partículas de cementita extremamente pequenas dispersas numa matriz de ferrita. Neste processo ocorre uma queda nas propriedades mecânicas, em relação à martensita como temperada, porém ainda com propriedades muito boas, quando comparadas à outras microestruturas. [2]

Diferentes aços, em função da presença dos elementos de liga, possuem diferentes propriedades e comportamentos durante o resfriamento do material. Essas diferentes características são expressadas nos diagramas TTT, que descrevem as transformações microestruturais em função do tempo, da temperatura e da taxa de resfriamento. Aços com diferentes composições químicas possuem diferentes curvas TTT e, conseqüentemente, diferentes taxas mínimas de resfriamento necessário, para evitar a transformação da austenita em outras fases. A Figura 4 ilustra muito bem uma curva TTT e seus diferentes produtos para um aço genérico. A região rosa representa a região austenítica que indica a temperatura em que o aço deve estar para que esteja completamente austenitizado. A região amarela representa a região onde a austenita está instável, e irá sofrer mudança de fase quando cruzar a curva da direita, podendo ser perlita (região cinza) ou bainita (região verde), ou ainda, cruzar a linha inferior para se transformar em martensita (região azul).



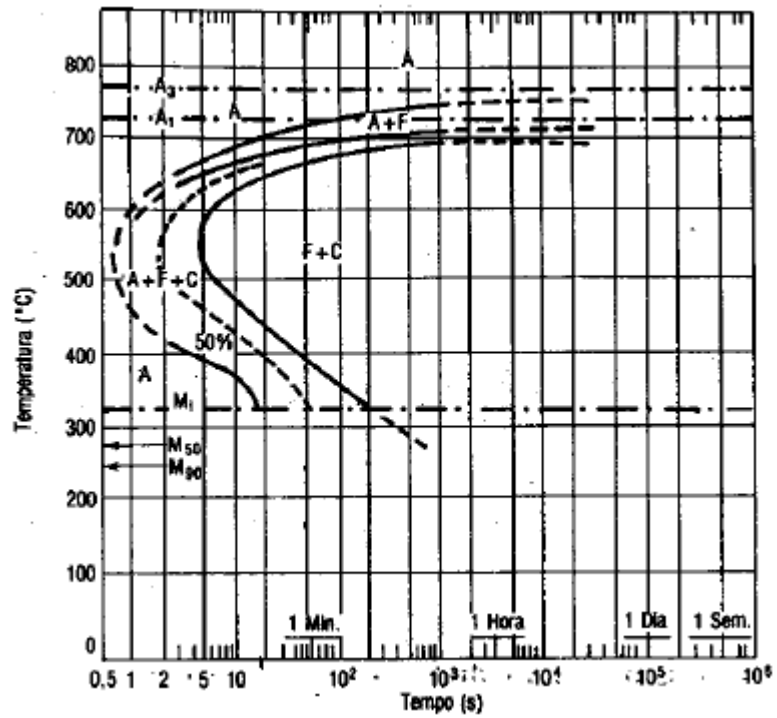


Figura 5- Curva TTT para um aço AISI 1050.

(<http://www.knifenetwork.com/forum/archive/index.php/t-54757.html>. Acesso em 27/11/2016)

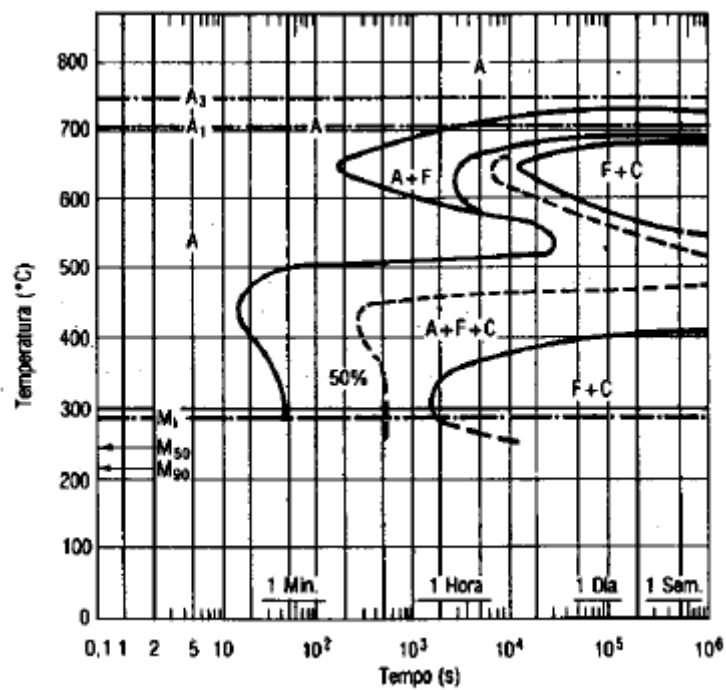


Figura 6- Curva TTT para um aço AISI 4340.

(<http://www.knifenetwork.com/forum/archive/index.php/t-54757.html>. Acesso em 27/11/2016)

### 2.2.2 Meios de resfriamento

Na têmpera, um fator importantíssimo é a taxa de resfriamento do material. Este é um fator que depende da capacidade do meio em realizar a extração de calor da peça. Existem diversos meios, com diferentes severidades. Os mais comuns são água, óleo e, até mesmo, o ar. A têmpera que ocorre em meio líquido é dividida em três etapas, que estão ilustradas na Figura 7.

No primeiro estágio, ocorre a formação de um filme contínuo de vapor que envolve a peça. Isto ocorre devido ao primeiro contato entre a peça com alta temperatura e o meio em temperatura ambiente, que provoca a evaporação instantânea do fluido ao redor do componente. Este estágio deve ser o mais curto possível, pois o filme de vapor é um condutor de calor muito ruim. Este processo pode ser diminuído com a agitação da peça e também através da dissolução de uma pequena quantidade de sais no meio. Na transição entre a primeira e a segunda etapa, que é a imersão total da peça no meio, ocorre o remolhamento, que consiste no início da ruptura da camada de vapor, geralmente iniciando-se na extremidade inferior da peça e percorrendo até o topo. A velocidade com que esta frente se locomove pela superfície é denominada como velocidade de remolhamento. O segundo estágio inicia-se na parte onde está acontecendo o remolhamento. O filme começa a se romper e ocorre a formação de bolhas de vapor ao longo da peça, ocasionando maior transferência de calor da peça ao meio, devido à ebulição do fluido que está ocorrendo na superfície. Neste estágio é importante que exista a agitação da peça para impedir que as bolhas permaneçam nos mesmos pontos, evitando, dessa forma, pontos resfriados mais lentamente. No terceiro estágio de resfriamento a superfície da peça já atingiu uma temperatura incapaz de vaporizar o meio, portanto é um estágio controlado pela capacidade de extração de calor do banho, pela agitação e também por um outro fenômeno que começa a agir nesta etapa, a convecção. A convecção, apesar de causar um aumento na taxa de transferência de calor, possui uma contribuição muito inferior do que a condução. [4,5]

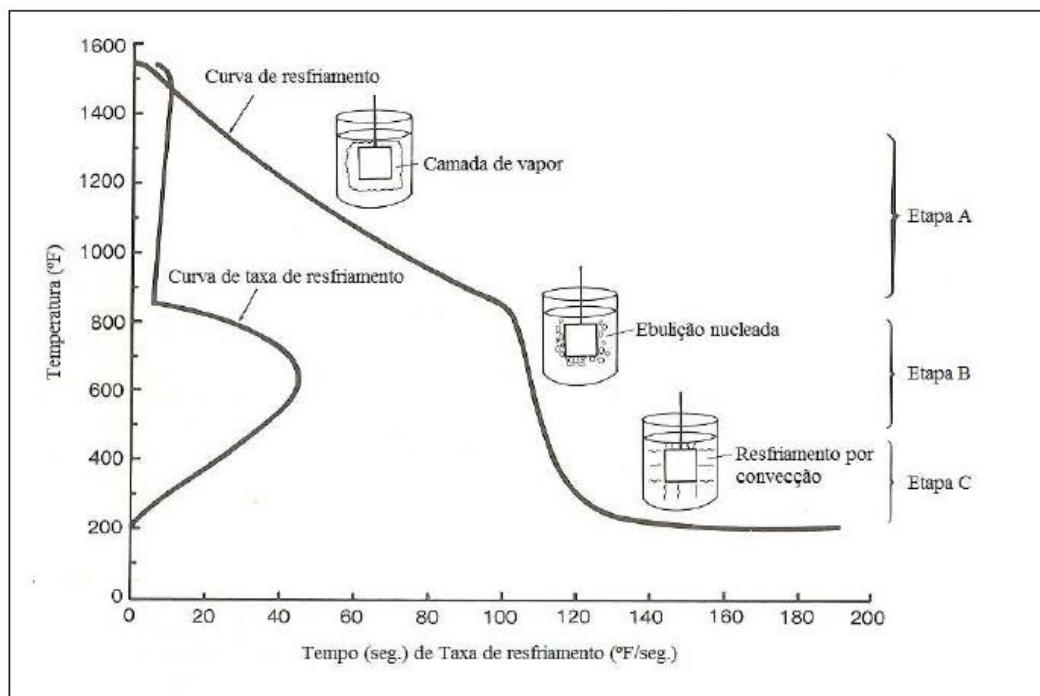


Figura 7- Estágios de resfriamento em meio líquido. (Retirado de [13])

É importante ressaltar que as três etapas podem ocorrer simultaneamente ao longo da superfície do material. Isto depende da velocidade de remolhamento do fluido. Quanto menor for a velocidade de remolhamento, significa que a peça estará sujeita por mais tempo a essa condição de diferentes extrações de calor, composto pela baixa extração da camada de vapor e alta extração da ebulição, ou seja, resfriamento altamente não uniforme. Esta situação é ilustrada na Figura 8. [25]

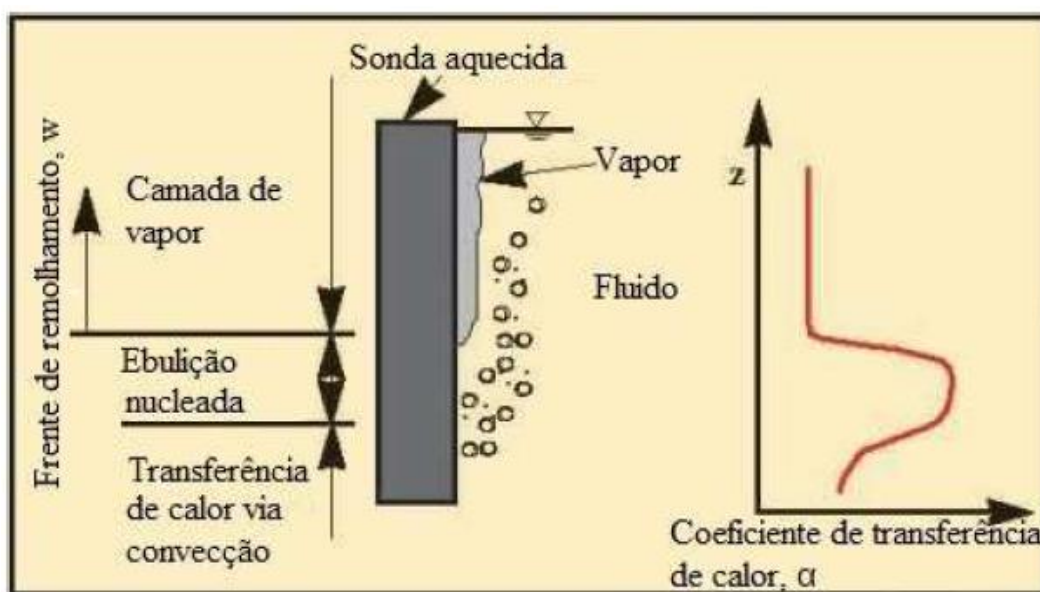


Figura 8- Fases do resfriamento no componente e a mudança no coeficiente de transferência de calor de acordo com o estágio de resfriamento. (Retirado de [26])

Um fator que possui extrema importância na efetividade do processo é a severidade do meio, conhecido como fator de Grossmann, que expressa a capacidade do meio em remover calor do material. O fator de Grossmann é dado pela relação:

$$H = \frac{\alpha}{2\lambda} \quad (1)$$

Onde,  $\alpha$  é o coeficiente de transferência de calor entre o material e o meio e  $\lambda$  é a condutividade térmica do material.

A Tabela 1 mostra valores de diferentes meios com seus respectivos fatores de Grossmann.

**Tabela 1 - Valores do fator de Grossmann para diferentes meios (valores extraídos de [7]).**

<i>Agitação</i>	<b>Óleo</b>	<b>Água</b>	<b>Salmoura</b>
<i>Nenhuma</i>	0,25 – 0,30	0,9-1,1	2,0
<i>Suave</i>	0,3-0,35	1,0-1,1	2,0-2,2
<i>Moderado</i>	0,35-0,40	1,2-1,3	
<i>Bom</i>	0,4-0,5	1,40-1,50	
<i>Forte</i>	0,50-0,80	1,6-2,0	
<i>Violento</i>	0,8-1,1	4,0	5,0

A têmpera convencional pode ocorrer em meios onde o fator de Grossmann varia de 0,25 (sem agitação no óleo) até 5,0 (agitação violenta na salmoura). Para a têmpera intensiva, o meio, juntamente com a agitação, precisa fornecer um fator de Grossmann que deve ser superior a 6,0.

## **2.2.3 Tipos de Têmpera**

### **2.2.3.1 Têmpera direta**

A têmpera direta se refere ao tipo de têmpera realizada diretamente da temperatura de austenitização para a temperatura ambiente, através de imersão em um meio líquido



vaporizável. O material é mantido no meio de resfriamento durante todo o processo, sendo retirado apenas quando a peça já estiver praticamente na mesma temperatura do meio. É o método mais utilizado, dentre as diferentes técnicas de têmpera. [5,8]

### **2.2.3.2 Têmpera Interrompida**

A têmpera interrompida se refere ao processo de resfriamento rápido do metal da temperatura de austenitização direto para um ponto acima da temperatura  $M_s$ , onde é mantido durante um período específico de tempo suficiente para provocar as transformações desejadas e retirado logo após, seguido de resfriamento ao ar. [5,8]

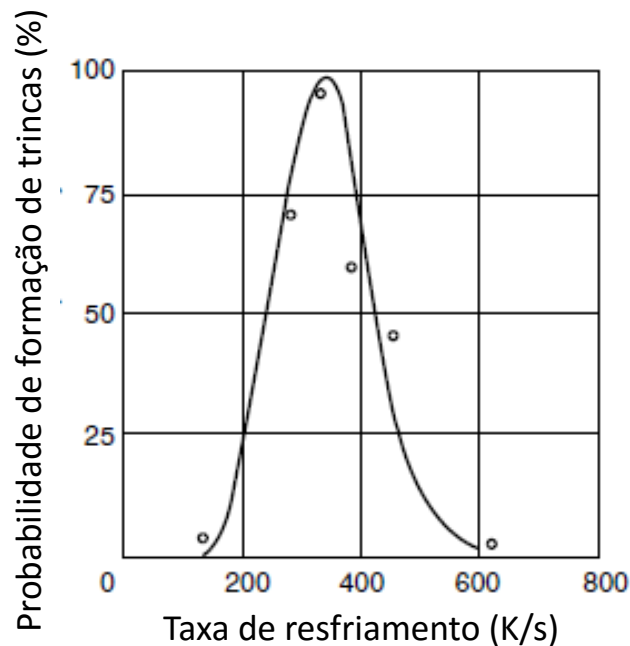
### **2.2.3.3 Têmpera Intensiva**

A têmpera intensiva, do inglês “Intensive Quenching” (IQ), é um processo de têmpera interrompida realizado em condições extremas, visando a obtenção de propriedades diferenciadas no aço. O resultado deste tratamento proporciona à peça uma fina camada dura de martensita com alta tensão superficial compressiva, com um núcleo mais tenaz, de martensita e outra microestrutura, como perlita ou bainita. Para que isto ocorra, o processo está totalmente ligado à capacidade do sistema em retirar altas quantidades de calor em um curtíssimo intervalo de tempo. Por este motivo, o meio deve ser bem agressivo, com agitação severa, usando-se água e em algumas situações usando soluções salinas.

Durante a têmpera convencional, algumas situações que sempre foram muito discutidas são o aparecimento de tensões internas, distorções e trincas durante o processo. Isto acontece devido as transformações de fases que estão ocorrendo ao longo da peça que geram diferenças de volume (CFC, TCC), o que resultam em tensões residuais. Estas tensões geradas pela transformação de fases, em adição com as tensões térmicas do estado de tensão, caso excedam a tensão de escoamento do material, causarão deformação plástica na peça. Se estas mesmas tensões ultrapassarem o limite de resistência a tração do material quente, trincas ocorrem na peça. Estes fatos estão relacionados com a taxa de resfriamento do material. [5,9]

É bem conhecido que quanto maior a taxa de resfriamento do material durante a têmpera, maior é a probabilidade do aparecimento de trincas. Porém, estudos

comprovaram que, isso é verdade até um certo valor de taxa, a partir do qual tem-se uma redução desse efeito, conforme ilustrado na Figura 9. O intervalo da taxa de resfriamento utilizada na têmpera convencional é justamente a região crítica do gráfico, enquanto a têmpera intensiva ocorre em taxas muito altas e de acordo com o gráfico a probabilidade de formação de trincas é mínima. Isto ocorre devido à alta tensão de compressão que surge na superfície da peça, inibindo a nucleação e propagação de trincas. [10]



**Figura 9- Probabilidade de formação de trincas em função da taxa de resfriamento. (Retirado de [9])**

A tensão compressiva que surge na superfície pode ser explicada por um modelo simplificado, conforme a Figura 10, extraído de [11]. O modelo é formado por um núcleo do material, com segmentos deste mesmo material unidos por molas na superfície, considerando-se que o mesmo é elástico. Estando um componente cilíndrico em uma temperatura acima de  $A_{c3}$ , todo o material está austenitizado e as molas estão livres, ou seja, sem tensão (figura 10.a). Quando se inicia o resfriamento deste, como os fragmentos da superfície são os primeiros a entrarem em contato com o meio de resfriamento, estes sofrem contração, o que é esperado por ser um sólido, e as molas apresentam expansão, ficando com tensão trativa, enquanto o núcleo continua no estado austenitizado (figura 10.b). Após os fragmentos da superfície se transformarem em martensita ocorre um aumento do volume, devido a transformação da estrutura cristalina. Desta forma, as molas

começam a se comprimir, passando a ter tensões compressivas (figura 10.c). O processo de resfriamento durante a têmpera intensiva é tão severo que mesmo com a formação de martensita na superfície do componente, o núcleo ainda está se resfriando e, conseqüentemente, se retraindo (figura 10.d). Este é o ponto no qual as molas possuem a maior tensão compressiva e, também, deve ser o momento no qual o tratamento deve ser interrompido, pois desta forma a transformação do núcleo em martensita é interrompida. Caso o material continue no processo, todo seu corpo será transformado em martensita (figura 10.e). Essa martensita do núcleo irá se expandir e a tensão formada no momento anterior será reduzida. Portanto, se o tratamento for interrompido no momento correto, a austenita do núcleo irá se transformar em outras fases, como perlita ou bainita, além da martensita, que possuem um volume menor do que a estrutura completamente martensítica e, desta forma, contribuir para uma tensão de compressão máxima na superfície (figura 10.f).

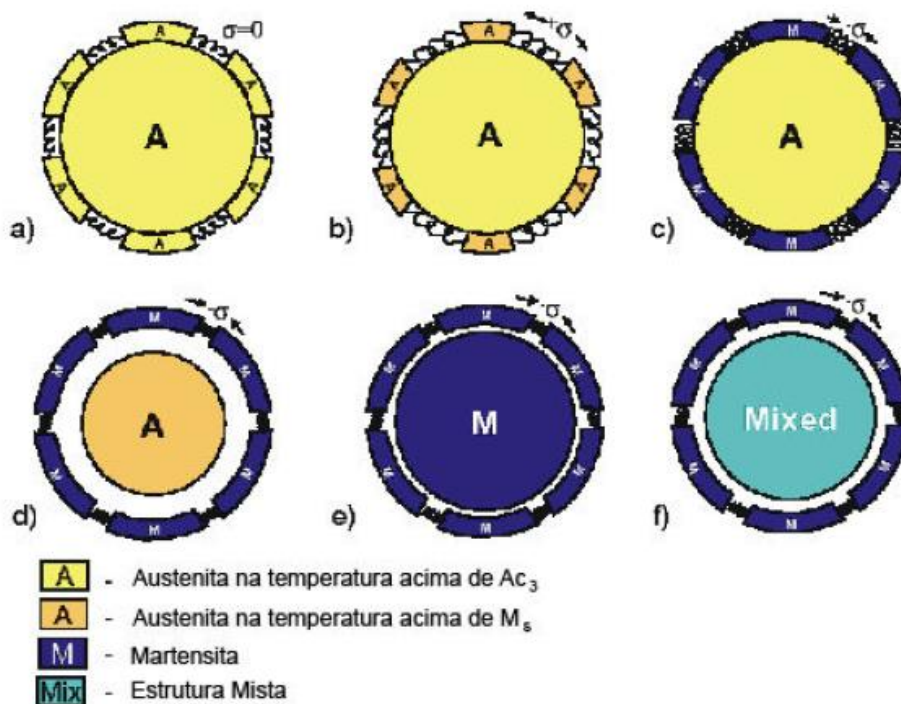


Figura 10- Modelo de tensões superficiais obtidos através da têmpera intensiva. (Retirado de [11])

Segundo a literatura, existem 5 diferentes métodos para realizar a têmpera intensiva, denominados de IQ-1, IQ-2, IQ-3, IQ-4 e IQ-5. Os três primeiros são os mais comuns e, por este motivo, serão descritos abaixo. [12]

O método IQ-1 é um processo de duas fases de resfriamento, usado para peças de aços de média e alta liga. A primeira etapa consiste em um resfriamento lento da temperatura de austenitização até uma temperatura abaixo de  $M_s$ , geralmente usando óleo quente ou soluções aquosas com altas concentrações de polímeros. Nesta fase, o gradiente de temperatura ao longo da peça é considerado desprezível, por isso, considera-se que todo o interior da peça está com a temperatura  $M_s$ . Na segunda etapa, o resfriamento é muito intenso e ocorre dentro da faixa de transformação martensítica. O resfriamento é realizado através de jatos intensos de água ou solução aquosa direcionados diretamente à superfície da peça, gerando altíssimas taxas de resfriamento e, conseqüentemente, as tensões compressivas. Uma desvantagem deste método é que do primeiro para o segundo estágio, existe uma troca do meio, ou seja, é necessário movimentar a peça e isto prejudica a efetividade do processo. [9,12]

O método IQ-2 é um processo realizado em três etapas. Primeiro ocorre o resfriamento rápido com o aparecimento de bolhas e filme de vapor ao longo da peça. Nesta etapa, prioriza-se a quebra deste filme de vapor para evitar a distorção e o aparecimento de trincas e, por este motivo, utiliza-se solução salina como meio de resfriamento. Na segunda etapa a peça é transferida para um resfriamento lento, ao ar. Nesta fase, o núcleo ainda quente, fornece calor à casca de martensita formada. Desta forma, ocorre um autorevenimento na peça e, como resultado, elimina a chance de formação de trincas na superfície. E na última etapa, ocorre uma etapa de resfriamento por convecção, realizada no próprio tanque de têmpera, visando o restante das transformações no interior da peça. [9,12]

O método IQ-3 é o mais intenso, com melhor endurecimento e maior eficiência na obtenção de tensões compressivas superficiais. É um método que envolve apenas uma etapa de resfriamento intenso, o que é uma vantagem, quando comparado aos outros métodos. Nesta etapa única, o resfriamento é tão intenso que o meio, juntamente com a alta agitação, evita a formação de bolhas e camadas de vapor e a transferência de calor do núcleo é dada somente por convecção. O resfriamento intenso é mantido contínuo e uniforme até que a superfície da peça esteja com as tensões compressivas e profundidades desejadas. Existem três grandes problemas na implementação deste método. O primeiro

é que nem sempre é possível que haja um fluxo do meio tão intenso e tão uniforme ao redor de toda a peça. O segundo problema é para peças com espessuras muito pequenas, a que é muito difícil ter um controle sobre o tempo do processo, pois pode ocorrer a formação de martensita em toda a peça muito rapidamente. E por último, seria muito difícil aplicar este método para uma grande quantidade de peças durante o mesmo tempo, pois é praticamente impossível fornecer o mesmo fluxo, a intensidade e a uniformidade para o lote de peças. [9,12]

### **2.3 Tensões na têmpera e distorções**

Sabe-se que que praticamente todos os passos durante o processo de manufatura podem afetar a forma final do componente. Isto pode ser precisamente previsto no projeto, incluindo as transformações existentes durante os tratamentos térmicos. Entretanto, existem tantas variáveis agindo de diferentes formas, que podem gerar distorções na peça, ainda mais, visto que distorções não podem ser tão facilmente previstas. Este fato leva a uma definição: Distorções são mudanças inesperadas ou inconsistentes no tamanho e no formato causadas por variações nas condições dos processos de manufatura. [5]

Estas mudanças de tamanho e formato durante o tratamento térmico podem ser atribuídas a três causas fundamentais. A primeira delas, são as tensões residuais do processo, que quando ultrapassam o limite de escoamento do material provocam alterações no formato do material. A segunda causa são as tensões causadas pelas diferentes expansões na microestrutura, referentes as diferenças do gradiente de temperatura ao longo do componente. E a terceira causa está relacionada a mudanças de volume devido as transformações de fase. [24]

Como já discutido anteriormente, quando um componente de aço é aquecido, sua microestrutura é transformada em austenita, acompanhado de uma redução de volume. Se o aço for resfriado lentamente, sua estrutura cristalina sofrerá uma alteração de tamanho e se transformará de CFC para CCC, que é a estrutura da ferrita e é ligeiramente mais denso. Caso o aço seja resfriado rapidamente, a ferrita é inibida e a estrutura CFC irá se transformar em TCC, que é menos denso. Caso essas alterações de volume gerem tensões inferiores à resistência do material, tensões residuais serão criadas e caso as tensões geradas forem superiores à resistência, irá ocorrer a movimentação do material e

em casos extremos, o aparecimento de trincas. Estas expansões estão relacionadas com a composição do aço e mais intimamente ligadas com a quantidade de carbono, pois o carbono altera o tamanho do parâmetro de rede da célula cristalina da austenita. Foi reportado que o resultado da expansão devido a transformação em martensita de um aço com 0,25%C é de aproximadamente 0.002 polegadas/polegadas, enquanto a expansão de um aço 1,2%C é de aproximadamente 0.007 polegadas/polegadas. [5]

A falta de uniformidade durante a têmpera é, provavelmente, o maior contribuinte para as distorções e trincas, principalmente no resfriamento da peça. A não uniformidade no resfriamento pode surgir devido à falta de uniformidade do fluxo em torno da superfície ou a não uniformidade de molhamento na superfície. Estes fatores criam um grande gradiente térmico entre o núcleo e a superfície. Outra grande fonte de não uniformidade é a formação de espuma e contaminação no meio de resfriamento, como por exemplo, resíduos, carbono e outros materiais insolúveis, estes fatores geram um ponto fraco e, conseqüentemente, aumentam a chance de distorções. [5]

Outro ponto de atenção é o carbono equivalente do aço. A propensão de trincas aumenta conforme o carbono equivalente da liga também aumenta. Estima-se que as trincas de têmpera são mais comuns em aços com carbono equivalente superior a 0,525%. Para determinar o carbono equivalente da liga pode-se utilizar a seguinte expressão [13]:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{14} + \frac{Mo}{10} + \frac{Cr}{10} + \frac{Ni}{30} + \frac{V}{6} + 3N + 20B \quad (2)$$

### 2.3.1 Trincas

A presença de trincas em componentes de uma máquina, veículos e estruturas pode enfraquecer de tal modo que venha a ocorrer falha mecânica, fraturando a peça em dois ou mais pedaços. Isso pode ocorrer em tensões bem abaixo da tensão de escoamento do material, que é uma região onde falhas não deveriam ocorrer. As trincas são as principais causas de falhas de componentes mecânicos, geralmente atreladas ao processo de fadiga, porém podem ser causadas por inúmeros fatores. As trincas são nucleadas em pontos mais fracos do material, como por exemplo, algum ponto com inclusões na microestrutura de um aço, que funciona como um concentrador de tensão e acaba dando origem à trinca. [14]

Sabe-se que a fadiga é controlada por tensões cíclicas, com tensões nominais inferiores ao limite de escoamento do material. Sua falha ocorre em três etapas distintas, sendo elas a nucleação de uma trinca, propagação da trinca até o comprimento crítico e a fratura final do componente. [14] A propagação da trinca só ocorre em tensões trativas. Por este motivo, sabe-se que tratamentos superficiais, como por exemplo a nitretação, que geram tensões residuais superficiais de compressão, melhoram a resistência à fadiga do material. [15]

### **3. Objetivos**

O objetivo deste trabalho é comparar a influência dos meios de resfriamento, no processo de têmpera tradicional e de têmpera interrompida, em quatro diferentes tipos de aços, e avaliar a formação de martensita nos mesmos. Também, como analisar a dureza, a distorção e as tensões residuais resultantes do processo, como forma de classificar sua efetividade.



## 4. Materiais e Métodos

Abaixo serão apresentados os materiais, equipamentos, ensaios e os procedimentos utilizados na elaboração deste trabalho.

### 4.1 Aços selecionados para o trabalho

Para este trabalho foram selecionados 4 aços com composições e aplicações bem distintas, visando maior diversidade dos resultados. Os aços escolhidos foram os AISI 1045, AISI H13, AISI O1 e AISI 5160. Dentre estes aços, existe uma grande diferença de temperabilidade.

#### 4.1.1 AISI 1045

É um aço considerado padrão, com médio carbono e propriedades mecânicas relativamente boas. Utilizado na construção civil e em fabricação de componentes de uso geral, onde seja necessária resistência mecânica superior aos aços de baixo carbono. Possui baixa temperabilidade. [16]

Na tabela abaixo está a sua composição química.

**Tabela 2 - Composição aço AISI 1045**

Composição em % peso	C	Mn	P	S
AISI 1045	0,42-0,50	0,60-0,90	0,00-0,04	0,00-0,05

#### 4.1.2 AISI H13

É um aço ferramenta para trabalho a quente, com excelentes propriedades mecânicas, principalmente dureza e resistência ao desgaste. Utilizado na fabricação de moldes para injeção de plásticos, matrizes para forjamento a quente e matrizes para extrusão de alumínio. [17]

Na tabela abaixo está sua composição química.

**Tabela 3 - Composição aço AISI H13**

Composição em % peso	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
AISI H13	0,40	0,40	1,0	5,0	1,3	1,0

#### 4.1.3 AISI O1

É um aço ferramenta para trabalho a frio, com alta resistência ao desgaste, juntamente com uma boa tenacidade. Utilizado principalmente para fabricação de ferramentas de corte, machos, punções, rolos laminadores de roscas, estampos e matrizes em geral. [18]

Na tabela abaixo está sua composição química.

**Tabela 4 - Composição aço AISI O1**

Composição em % peso	C	Mn	Cr	W	V
AISI O1	0,95	1,25	0,50	0,50	0,12

#### 4.1.4 AISI 5160

É um aço classificado como “mola”, possui boa ductilidade e, ainda, alta resistência à tração e fadiga, quando temperado. Utilizado na fabricação de barras de torção, barras estabilizadoras e, principalmente, molas semielípticas e helicoidais para veículos. [19]

Na tabela abaixo está sua composição química.

**Tabela 5 - Composição aço AISI 5160**

Composição em % peso	C	Mn	Si	Cr
AISI 5160	0,56-0,64	0,75	0,15-0,35	0,70-0,90

## 4.2 Elaboração dos corpos de prova

Os corpos de prova foram elaborados nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais e Manufatura (SMM) no Campus 2 de São Carlos da Universidade de São Paulo e finalizados na Oficina Mecânica Maresa<sup>1</sup>.

O procedimento detalhado da elaboração dos corpos de prova é o seguinte: as barras de aço de 3 metros foram cortadas no Laboratório de Engenharia de Superfícies, em pequenos cilindros de 200mm de comprimento, por aproximadamente 20mm de diâmetro. Posteriormente, foi feito um rasgo de chaveta, de 5mm x 5mm nas amostras utilizando a fresadora da Oficina Mecânica do SMM e também utilizando uma fresadora na oficina Maresa. Foram realizados 15 corpos de prova para cada tipo de aço, totalizando 60. Os corpos de prova são ilustrados com a figura 11.

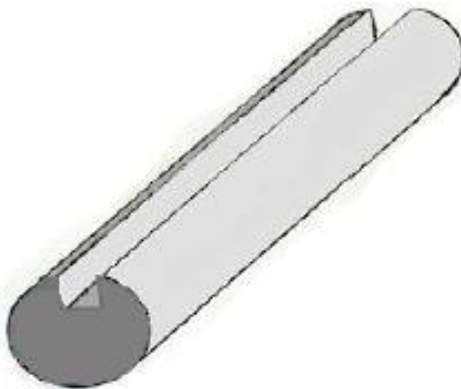


Figura 11- Modelo do corpo de prova utilizado.

## 4.3 Tratamentos térmicos

Os tratamentos térmicos foram realizados no Laboratório de Tratamentos Térmicos do SMM. Os fornos utilizados foram os das figuras 12 e 13.

---

<sup>1</sup> - Oficina Mecânica Maresa – R. Segundo Lopes – Ibaté – SP, 14815-000



**Figura 12- Forno FL-1300.**



**Figura 13- Forno EDG 3P-S.**

Os corpos de provas foram dispostos dentro de uma caixa metálica, envolvidos por uma limalha de ferro fundido cinzento e carvão em pó, de modo a evitar a descarbonetação do material, conforme ilustrado na figura 14.



**Figura 14- Corpos de prova prontos para o tratamento.**

#### **4.3.1 Normalização**

Neste processo, os dois fornos foram utilizados a uma taxa de aquecimento contínuo de  $25^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Para cada aço foi realizado um procedimento diferente, evitando assim a mistura dos materiais. Para o aço AISI H13 o forno foi programado para atingir a temperatura máxima de  $1020^{\circ}\text{C}$ , que é a temperatura recomendada segundo a especificação técnica [17]. Para os outros aços, os fornos foram programados para atingir a temperatura máxima de  $860^{\circ}\text{C}$ , também segundo as suas especificações [16, 18, 19]. A caixa contendo os corpos de prova foi colocada no forno com a temperatura ainda baixa, para evitar um alto gradiente de temperatura. Cada caixa foi mantida na temperatura por aproximadamente 2 horas. Após passado este tempo, cada caixa foi retirada do forno e os corpos de prova removidos de dentro da caixa e colocados para serem resfriados ao ar.

#### **4.3.2 Têmpera**

O procedimento inicial da têmpera é muito semelhante ao descrito na seção anterior. Os dois fornos foram usados, na mesma taxa de aquecimento e os corpos de prova foram também foram dispostos na caixa com ferro fundido cinzento e pó de carvão

e permaneceram no forno na mesma temperatura e pelo mesmo tempo. O resfriamento dos corpos de prova foi feito em um tanque, projetado internamente pelo grupo de pesquisas de tratamentos térmicos. O tanque, figura 15, possui um sistema de agitação do fluido a partir de uma bomba DAB modelo KPF 30/16M, com potência de 0,5 HP e com capacidade de 60 litros. [7]



**Figura 15- Tanque de resfriamento.**

As têmperas foram divididas em quatro etapas, sendas elas:

- Têmpera convencional em água (Água TC)
- Têmpera convencional em solução salina ( $\text{NaNO}_2$ ) (SS TC)
- Têmpera interrompida em água (Água TI)
- Têmpera interrompida em solução salina ( $\text{NaNO}_2$ ) (SS TI)

As têmperas foram organizadas de acordo com o meio de resfriamento, para evitar a troca de fluido do tanque. Primeiramente foram realizadas as têmperas convencionais em água. Os corpos de prova foram retirados um a um do forno, para evitar a queda de

temperatura, e eram mergulhados diretamente na água parada, figura 16, e lá foram mantidos até que estivessem com a temperatura do banho. Posteriormente, foram realizadas as têmperas interrompidas na água. Os corpos de prova foram retirados do forno e logo em seguida já eram mergulhados na água com agitação severa, figura 17, e eram mantidos por aproximadamente 1 segundo e então eram colocados para resfriamento ao ar. Os corpos de prova após este rápido resfriamento, por um curto período, possuem a cor ainda bem avermelhada, conforme a figura 18.



**Figura 16- Meio de resfriamento sem agitação.**



**Figura 17- Meio de resfriamento com alta agitação.**





**Figura 18- Corpos de prova de têmpera interrompida.**

Após este procedimento realizado com água, o tanque foi lavado e seco, para então receber a solução salina com concentração de 9% de  $\text{NaNO}_2$ . O procedimento para a solução salina é exatamente a mesma descrita para a água.

#### **4.4 Ensaio de dureza**

Os ensaios de dureza foram realizados nos laboratórios do NEMAF (Núcleo de Ensaio de Materiais e Análise de Falhas) do departamento de Engenharia de Materiais e Manufatura. O equipamento para medição das durezas foi o durômetro da marca Leco RT-240. As escalas de dureza utilizadas foram a Rockwell C, para os aços nos estados mais duros e a Rockwell B, para os aços em estado mais mole. As medidas foram realizadas com os corpos de prova antes de qualquer tratamento, após a normalização e novamente após as têmperas.



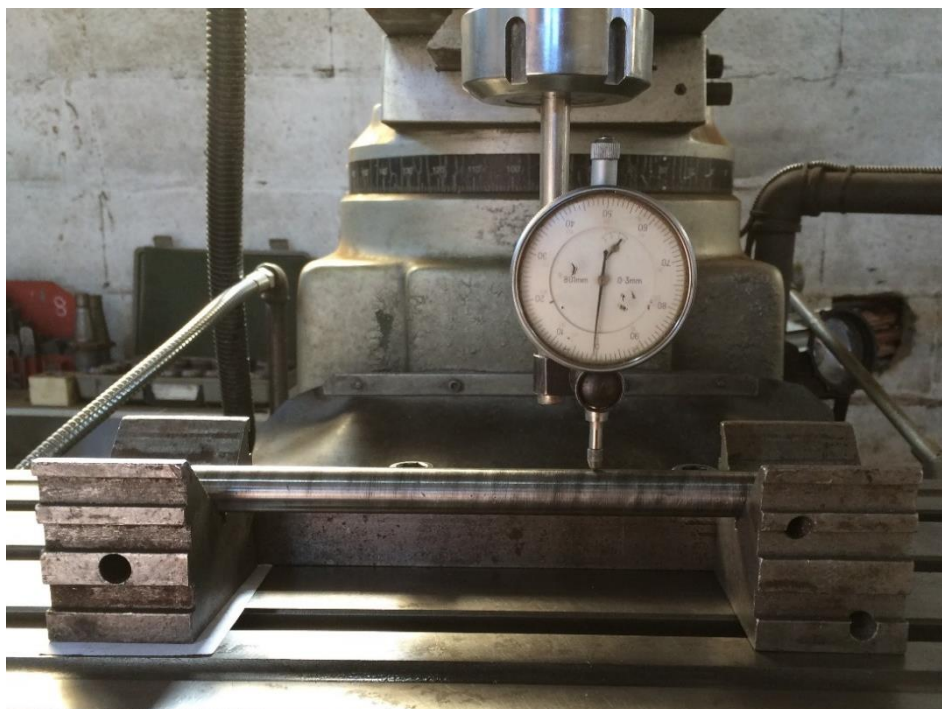


**Figura 19- Durômetro Leco RT-240**

As durezas dos aços foram medidas logo no início do processo para comprovar se o material estava de acordo com o esperado e, também, se seria necessário um tratamento de recozimento, visando a redução de dureza, para usinagem dos corpos de prova. As durezas foram novamente medidas após a normalização e têmperas para verificar a sua eficácia.

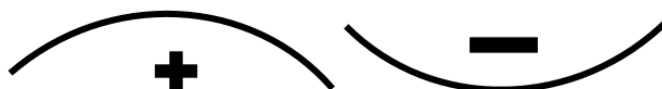
#### **4.5 Ensaio de distorções**

O ensaio de distorções foi realizado na Oficina Mecânica Maresa com o auxílio da fresadora. A fresa foi substituída por um relógio comparador e os corpos de prova foram posicionados em cima de dois prismas, um em cada lado, visando a perpendicularidade da superfície com a ponta do relógio, conforme a figura 20. Foram realizadas três medições, com o ponteiro passando por toda a superfície da peça e com o rasgo de chaveta a 90°, 180° e 270° em relação a ponta do relógio, no sentido horário.



**Figura 20 - Esquema para o ensaio de distorção do corpo de prova.**

Foi adotado, como padrão, que valores positivos do relógio indicam que o corpo está distorcido para cima e valores negativos indicam que a distorção é para baixo, em relação aos cantos da peça, como indicado na Figura 21.



**Figura 21- Padrão adotado para as distorções.**

#### **4.6 Microscopia**

Para a microscopia, um corpo de prova de cada situação (16 no total) foi cortado em pequenas seções através do processo “cut off” e então embutidos em resina. Cada novo corpo de prova foi submetido ao processo total de lixamento, passando desde a lixadeira mecânica até as lixas com granulometria 220, 320, 400, 600 e 800. Para finalizar o processo, foi realizado o polimento com alumina, conforme Figura 22.



**Figura 22- Corpos de prova para micrografia.**

O ataque foi realizado com Nital 2% para os aços AISI 1045 e AISI O1 e Vilella para AISI H13 e AISI 5160, que é recomendado para aços inox ou aços ferramenta[20]. Posteriormente, as amostras foram observadas no microscópio e partes relevantes foram fotografadas.

As amostras para este ensaio foram escolhidas de forma aleatória e seus respectivos números são: 1, 4, 8, 12, 17, 20, 24, 26, 31, 35, 37, 38, 47, 48, 58 e 60.

## 5. Resultados e Discussões

Os corpos de prova primeiramente foram submetidos ao processo de normalização, para garantir que as microestruturas dos aços estivessem homogêneas e, conseqüentemente, aumentasse a efetividade da têmpera. A normalização foi comprovada através dos dados do ensaio de dureza. Posteriormente, os corpos de prova foram tratados termicamente segundo os processos já definidos de têmpera. A eficiência do processo interrompido será discutida e comparada com o convencional.

Abaixo serão apresentados os resultados separados pelos tipos de aços. Desta forma, é possível comparar os tratamentos para o mesmo aço, com relação à dureza, distorções e microestrutura. Todos os valores de dureza medidos estão dispostos nos anexos A (estado inicial), B (aços normalizados) e C (aços temperados). Os valores de distorções estão apresentados nos anexos D (aços normalizados) e E (aços temperados).

### 5.1 AISI O1

O aço AISI O1 apresentou ganho de dureza entre o estado inicial fornecido e o estado normalizado, como pode ser visto na Tabela 6. Isto ocorre, pois, este material é normalmente fornecido no estado coalescido, para facilitar a usinabilidade. Nas têmperas, este aço obteve valores bem distintos entre os processos convencionais e os interrompidos. Os processos convencionais apresentaram dureza bem maior, apesar de não atingir o esperado, segundo a literatura [21]. Apesar do autorevenimento do processo interrompido acarretar na diminuição da dureza, a diferença não deveria ser tão grande, mostrando que houve alguma falha no processo. Em relação ao meio, a solução salina se mostrou mais eficaz na obtenção de maiores valores e com menores desvios. As durezas foram medidas na superfície do material.

**Tabela 6 - Dureza AISI O1 (HRC)**

AISI O1	Valores (HRC)	Desvios
Inicial	19,57	2,94
Normalizado	32,30	3,27
Temperado Água TC	51,91	4,27
Temperado Água TI	32,38	3,19
Temperado SS TC	56,67	2,22
Temperado SS TI	37,37	1,14

Este aço apresentou maior distorção na têmpera convencional em água, como pode ser observado na Tabela 7. Os outros tratamentos não proporcionaram grandes diferenças de valores, porém a têmpera convencional em solução salina apresentou a menor distorção. Soluções salinas desestabilizam a camada de vapor, melhorando a uniformidade e contribuindo para menor distorção.

**Tabela 7 - Distorções AISI 01 (mm)**

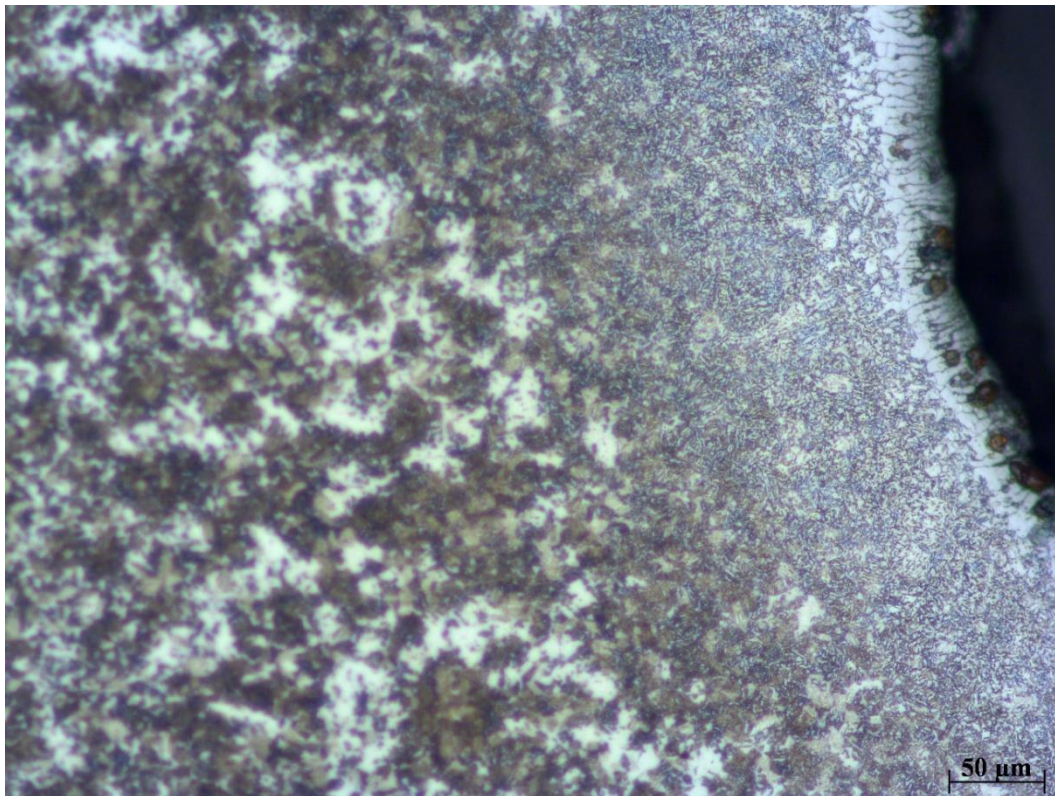
AISI 01	Valores (+)	Desvios	Valores (-)	Desvios
Normalizado	0,081	0,03	0,076	0,02
Temperado Água TC	0,4	0,2	0,523	0,16
Temperado Água TI	0,138	0,04	0,098	0,06
Temperado SS TC	0,125	0,03	0,067	0,02
Temperado SS TI	0,199	0,08	0,125	0,05

Utilizando a expressão (2), tem-se que:

$$Ceq = 0,95 + \frac{1,25}{14} + \frac{0,5}{10} + \frac{0,12}{6} = 1,109 \quad (3)$$

O aço AISI 01, possui um valor de carbono equivalente alto, o que pode ter contribuído para a distorção, porém os corpos de prova tratados não apresentaram trincas. Este número será comparado com os outros aços.

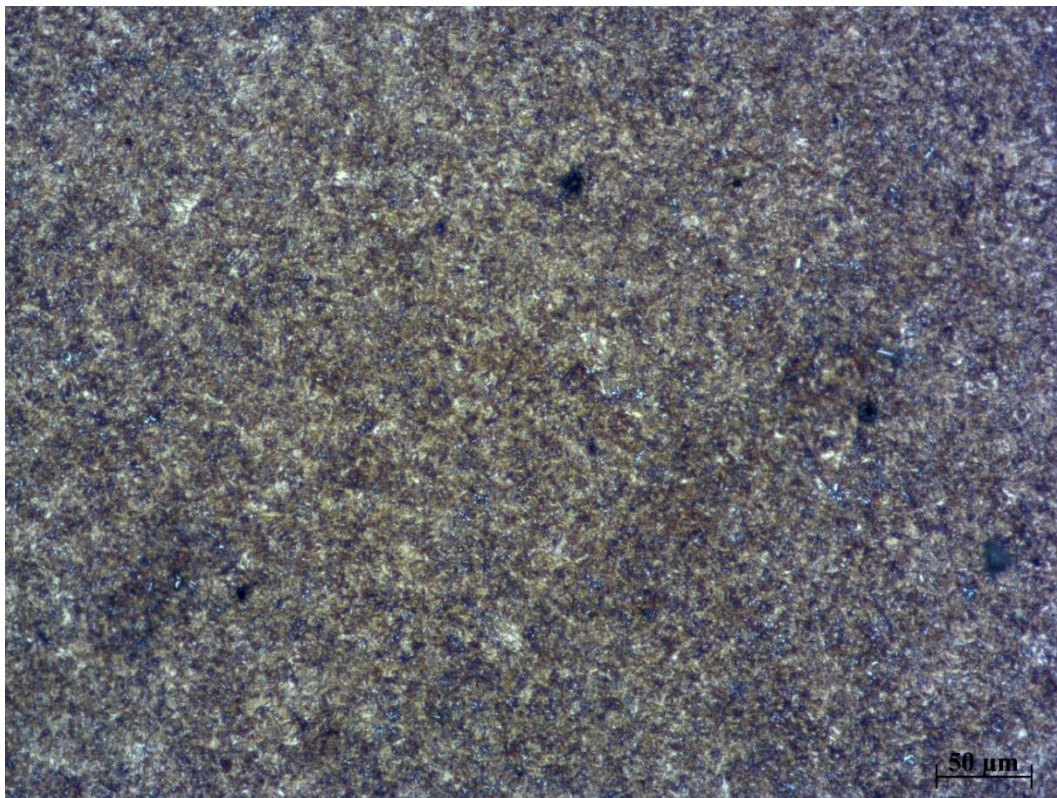
Nas micrografias, todas as amostras deste aço apresentaram descarbonetação na superfície. Isto ocorre devido ao alto carbono deste aço, que gera maior gradiente com o meio. Nas amostras com têmpera interrompida, existe a nítida mudança de microestrutura logo na superfície da peça. Isto pode ser observado, juntamente com a descarbonetação, na Figura 23, existe a transição de uma pequena camada de martensita fina para uma estrutura mista formada de martensita, bainita e perlita. Essa descarbonetação trouxe os baixos valores de dureza observados na têmpera interrompida.



**Figura 23- Microestrutura variada do aço AISI O1, juntamente com descarbonetação na superfície, resultante da Têmpera Interrompida em Solução Salina. Ataque: Nital 2%.**

As amostras de têmpera convencional apresentaram martensita ao longo de toda sua extensão. Em especial, a amostra tratada na solução salina apresenta martensita fina com a presença de muitos carbonetos dispersos. Isto pode ser visto na Figura 24.





**Figura 24-** Microestrutura de martensita fina com carbonetos do aço AISI O1, resultante da Têmpera Convencional em Solução Salina. Ataque: Nital 2%.

## 5.2 AISI H13

O aço AISI H13 obteve um ganho de dureza bem considerável durante a normalização, pelo mesmo motivo que o aço AISI O1. Por ser um aço ferramenta, é fornecido com baixas durezas para facilitar os processos de manufatura. Este aço obteve excelente desempenho na têmpera, atingindo durezas ligeiramente maiores do que as esperadas [22]. Com exceção da têmpera interrompida em água, os desvios foram baixos. Os valores das têmperas convencionais são um pouco maiores que as interrompidas, isto pode ser devido ao autorevenimento do processo. Os dados estão na Tabela 8.

**Tabela 8 - Dureza AISI H13 (HRC)**

AISI H13	Valores (HRC)	Desvios
Inicial	12,09	1,77
Normalizado	44,02	5,09
Temperado Água TC	60,70	1,37
Temperado Água TI	56,71	5,52
Temperado SS TC	60,46	2,41
Temperado SS TI	57,133	1,82

Em relação as distorções da têmpera, o aço AISI H13 apresentou, de modo geral, valores menores para ambos os tratamentos interrompidos. As têmperas convencionais apresentaram valores bem semelhantes, com exceção do sentido – (explicado na Figura 21) em água, que representou uma distorção muito alta.

**Tabela 9 - Distorções H13 (mm)**

AISI H13	Valores (+)	Desvios	Valores (-)	Desvios
Normalizado	0,175	0,07	0,154	0,03
Temperado Água TC	0,383	0,02	1,271	0,6
Temperado Água TI	0,205	0,03	0,283	0,12
Temperado SS TC	0,363	0,11	0,337	0,16
Temperado SS TI	0,183	0,08	0,317	0,11

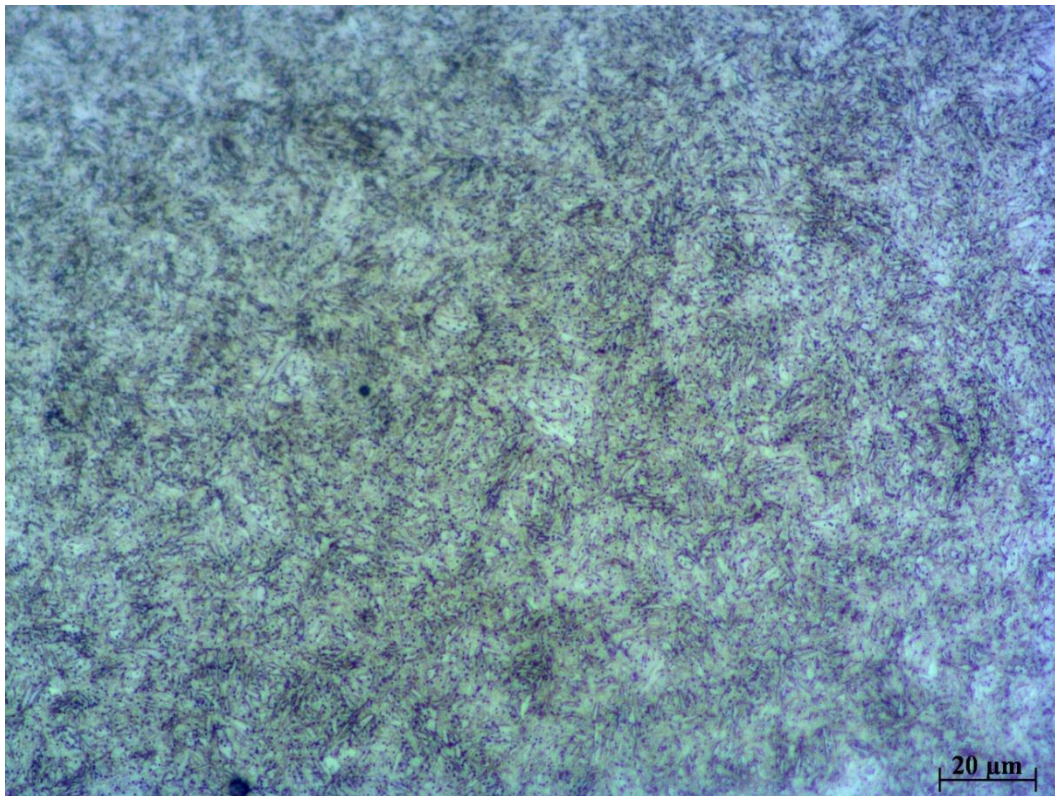
O carbono equivalente desta liga é determinado pela expressão (2):

$$C_{eq} = 0,4 + \frac{0,4}{14} + \frac{1,3}{10} + \frac{5}{10} + \frac{1}{6} = 1,218 \quad (4)$$

O resultado indica que é a liga com maior teor de carbono equivalente e, portanto, as distorções podem ter sido agravadas devido a este fator.

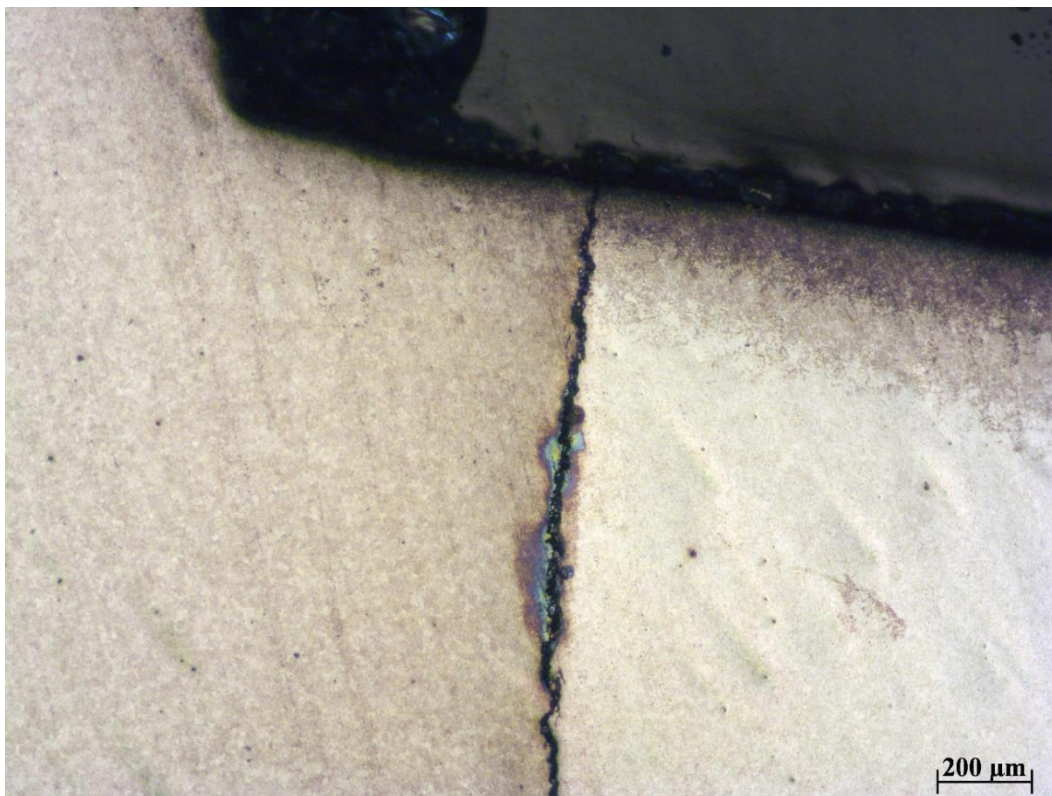
A micrografia deste aço revelou uma estrutura uniforme de martensita fina, conforme a Figura 25. Esta figura é representativa para todos os tratamentos, pois todos foram completamente temperados.





**Figura 25- Estrutura martensítica do aço AISI H13, resultante dos processos de Têmpera. Ataque: Vilella.**

A amostra de têmpera convencional na solução salina apresentou uma trinca, conforme a Figura 26. Porém acredita-se que a trinca se originou devido à baixa qualidade da usinagem dos corpos de prova e não pelo tratamento. Uma evidência disto é que a trinca não se nucleou no canto do rasgo, onde seria o local mais esperado por se tratar de um concentrador de tensões.



**Figura 26-** Trinca no corpo de prova de aço AISI H13, referente à Têmpera Convencional em Solução Salina. Ataque: Vilella.

### 5.3 AISI 1045

O aço AISI 1045 apresentou valores insatisfatórios referentes à eficácia dos processos e com alto desvio, conforme a Tabela 10. Este aço apresentou queda da dureza em relação do estado fornecido para o normalizado. Isto ocorreu, pois, o aço foi fornecido como trefilado. Em relação às têmperas, em ambos processos interrompidos as durezas foram muito baixas, indicando que houve alguma falha no processo, provavelmente a têmpera não aconteceu de fato. Para os processos convencionais, o temperado em água atingiu o esperado [23], já o temperado em solução salina apresentou uma queda de dureza.

**Tabela 10 - Dureza AISI 1045 (HRC)**

AISI 1045	Valores (HRC)	Desvios
Inicial	17,94	3,88
Normalizado	82,85 (HRB)	4,99
Temperado Água TC	52,13	4,17
Temperado Água TI	8,02	6,02
Temperado SS TC	45,13	3,57
Temperado SS TI	15,42	4,44

Os valores da Tabela 11, indicam que os tratamentos interrompidos geraram menores distorções nos corpos de prova, pois praticamente não foram temperados. A têmpera interrompida na água apresentou o menor valor de distorção, enquanto que a têmpera convencional em água apresentou o maior valor.

**Tabela 11 - Distorções AISI 1045 (mm)**

AISI 1045	Valores (+)	Desvios	Valores (-)	Desvios
Normalizado	0,134	0,04	0,096	0,02
Temperado Água TC	0,325	0,02	0,667	0,58
Temperado Água TI	0,167	0,06	0,133	0,04
Temperado SS TC	0,289	0,14	0,339	0,22
Temperado SS TI	0,238	0,06	0,451	0,25

Utilizando a expressão do carbono equivalente, tem-se:

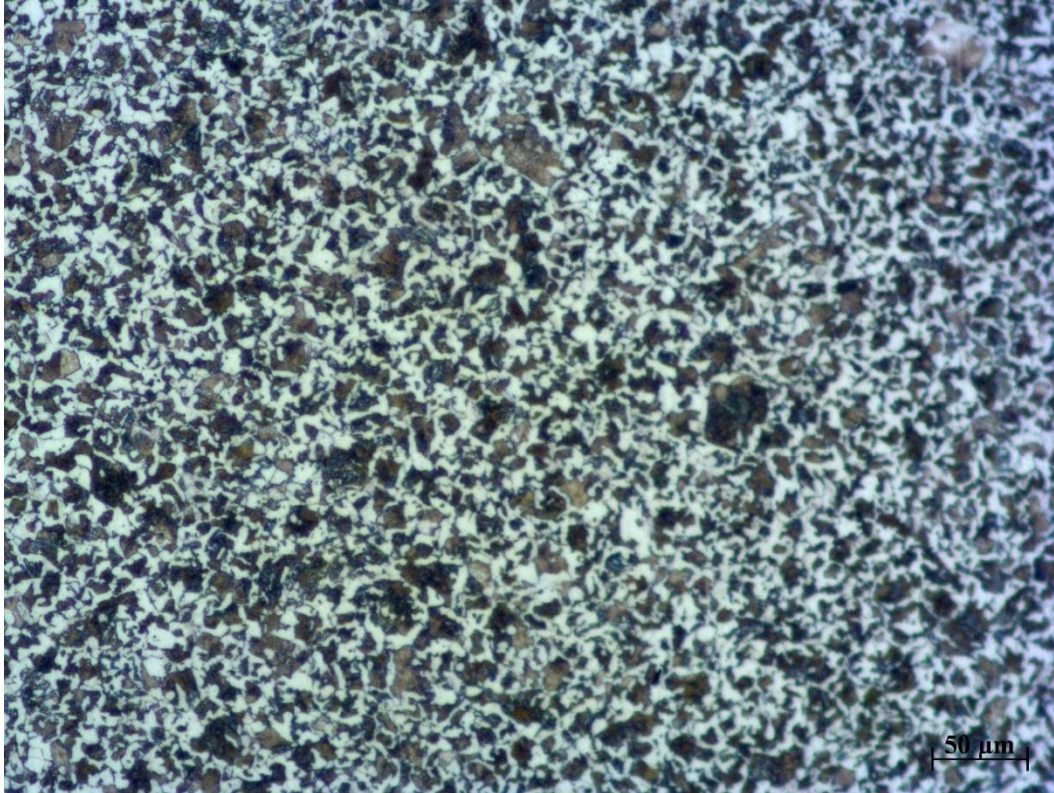
$$C_{eq} = 0,5 + \frac{0,9}{10} = 0,509 \quad (5)$$

Este valor é abaixo do crítico de 0,525%, indicando baixo potencial de distorção.

Nas micrografias, pode-se evidenciar que nos processos interrompidos em que a dureza foi bem abaixo do esperado, realmente não ocorreu a têmpera. Observando a Figura 27, nota-se que a microestrutura é inteiramente formada por perlita com ferrita. Para a têmpera convencional em solução salina, ocorreu a transformação da microestrutura em martensita, mas houve a formação de uma trinca, conforme a Figura 28. A trinca pode ter se nucleado durante a usinagem, porém por ser em um concentrador

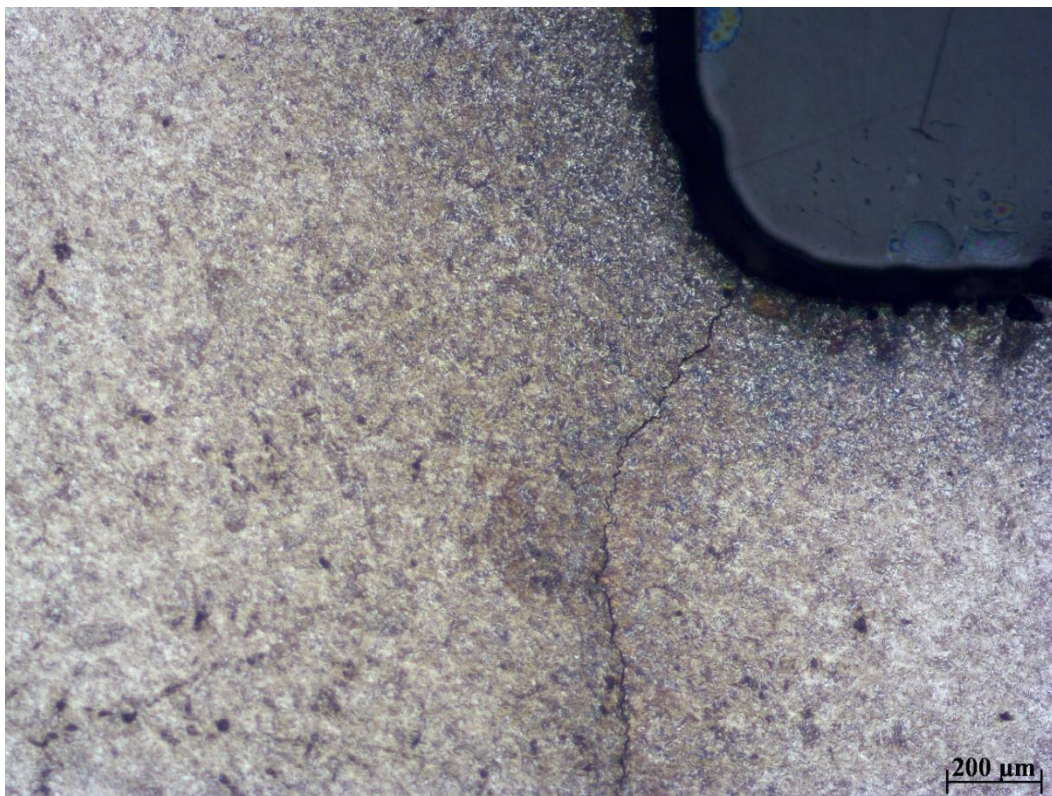


de tensões era esperado que isso pudesse acontecer. Para a têmpera convencional em água, sua microestrutura está indicada na Figura 29 e consiste em uma estrutura mista martensita e perlita, evidenciando que não houve transformação total.

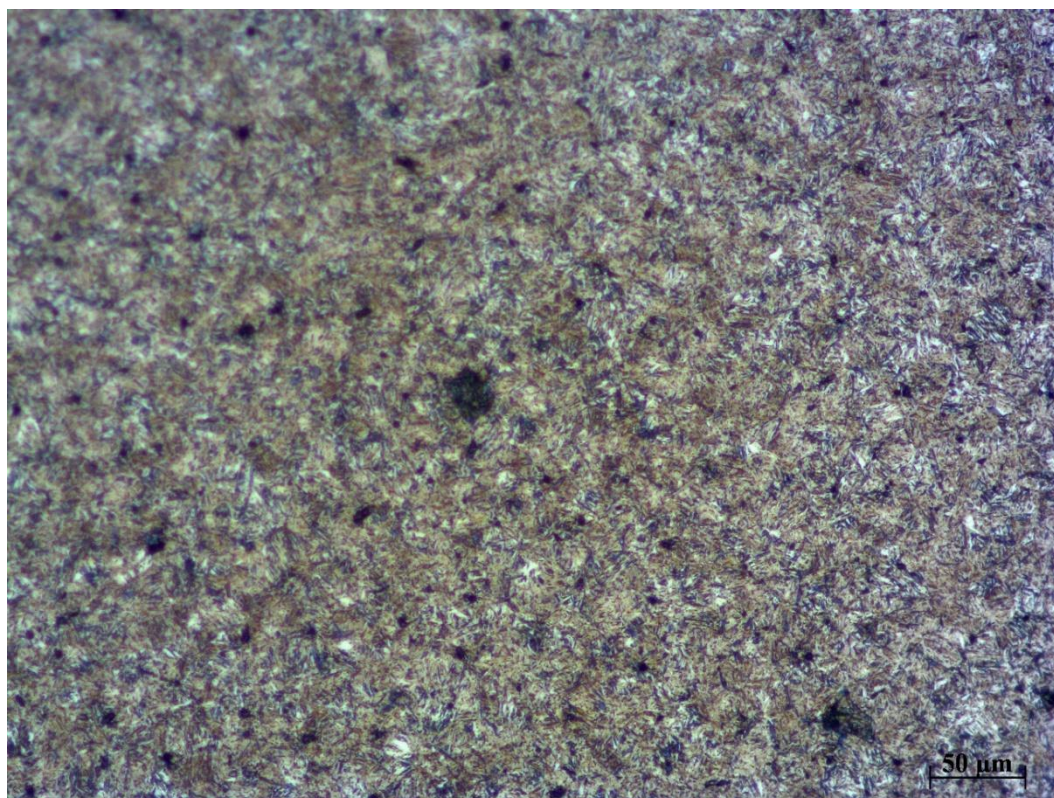


**Figura 27-** Microestrutura não temperada do aço AISI 1045 para das têmperas interrompidas. Regiões escuras de perlita e claras indicando microestrutura ferrítica. Ataque: Nital 2%.





**Figura 28 - Formação de martensita e aparecimento de uma trinca no aço AISI 1045, durante têmpera convencional em solução salina. Ataque: Nital 2%.**



**Figura 29- Estrutura mista de perlita + martensita no aço AISI 1045, para a têmpera convencional em água. Ataque: Nital 2%.**

#### 5.4 AISI 5160

Os valores de dureza obtidos para o aço AISI 5160 foram bem abaixo do esperado, para todos os tipos de tratamento e com altos desvios. Na normalização, a dureza sofreu uma queda, caso semelhante ao aço AISI 1045. Os estados temperados possuem desvio alto. O processo de têmpera convencional resultou em uma dureza abaixo do esperado [23] e as têmperas interrompidas, valores bem abaixo, mesmo considerando a queda de dureza proveniente do autorevenimento, significando que não houve a têmpera, provavelmente pelo tempo de resfriamento insuficiente.

**Tabela 12 - Dureza AISI 5160 (HRC)**

AISI 5160	Valores (HRC)	Desvios
Inicial	14,23	3,60
Normalizado	80,85 (HRB)	7,28
Temperado Água TC	43,8	4,71
Temperado Água TI	11,45	4,72
Temperado SS TC	43,944	5,35
Temperado SS TI	23,667	6,21

Os valores de distorção para este aço estão na Tabela 13, e eles indicam que os tratamentos interrompidos são mais eficientes para obtenção de menores valores de distorções. Ambas as têmperas convencionais apresentaram valores muito altos, enquanto que as têmperas interrompidas obtiveram valores bem semelhantes.

**Tabela 13 - Distorções AISI 5160 (mm)**

AISI 5160	Valores (+)	Desvios	Valores (-)	Desvios
Normalizado	0,093	0,03	0,064	0,01
Temperado Água TC	0,252	0,05	0,806	0,61
Temperado Água TI	0,224	0,08	0,075	0,03
Temperado SS TC	0,756	0,06	0,650	0,23
Temperado SS TI	0,200	0,10	0,142	0,03

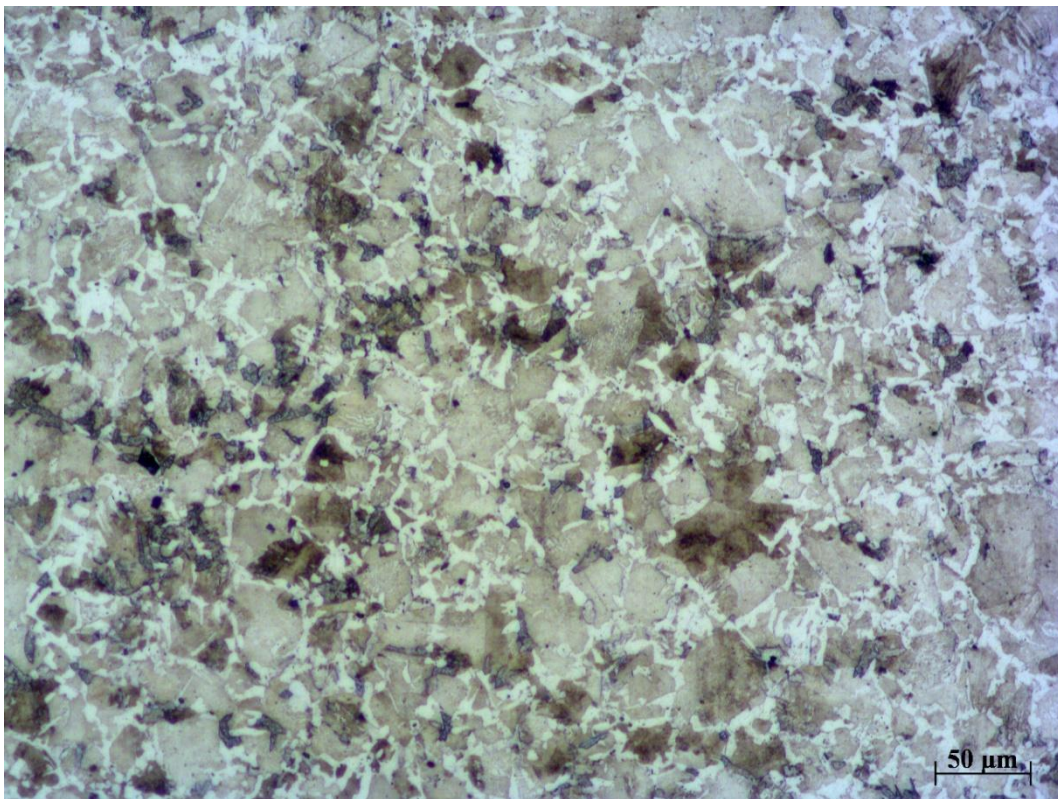
Utilizando a expressão do carbono equivalente (2):



$$C_{eq} = 0,64 + \frac{0,75}{14} + \frac{0,9}{10} = 0,7835 \quad (6)$$

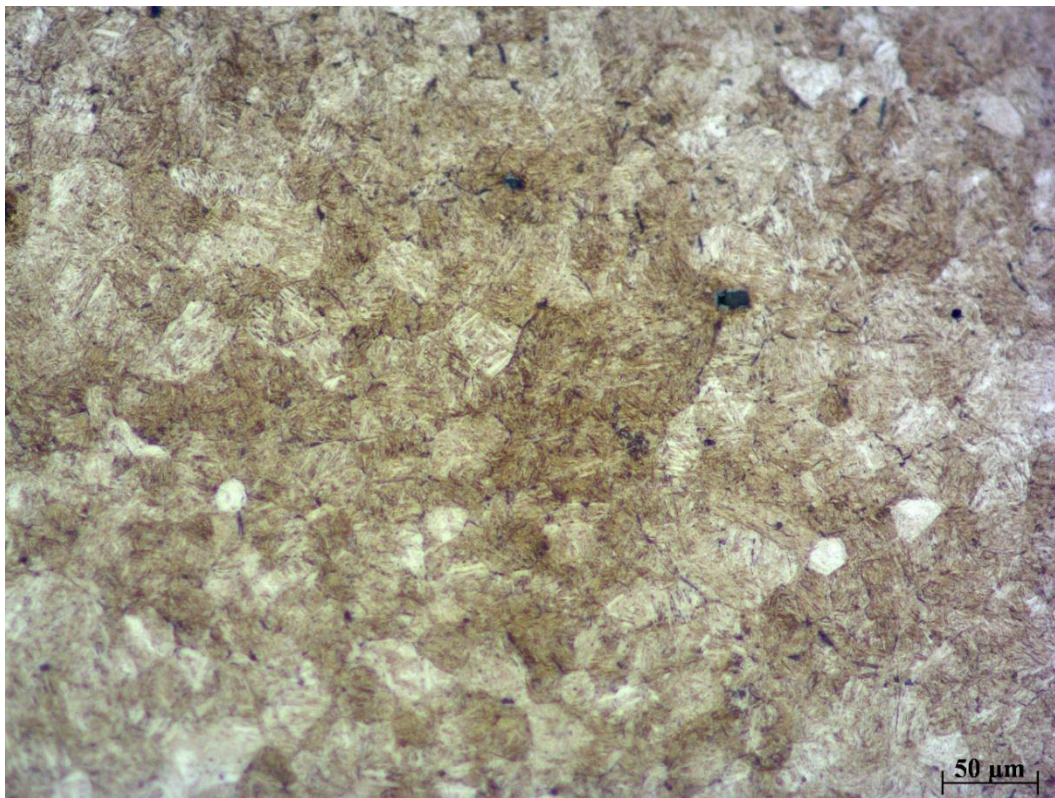
Este aço apresenta valor acima do crítico, portanto parte das distorções pode ser influenciada por este motivo.

Nas micrografias, ficou evidenciado que as têmperas interrompidas não foram eficazes e a microestrutura não se transformou significativamente em martensita, principalmente no tratamento realizado na água, que apresentou microestrutura de perlita com ferrita, conforme Figura 30. Para os tratamentos convencionais, a microestrutura está coerente com os resultados de dureza, apesar de estarem mais baixos da literatura. Para a têmpera convencional, que apresentou maior dureza, a microestrutura é martensítica na região próxima à superfície, representado na Figura 31, e a medida que se avança em direção ao núcleo ocorre o surgimento de perlita nos contornos de grão, conforme Figura 32.

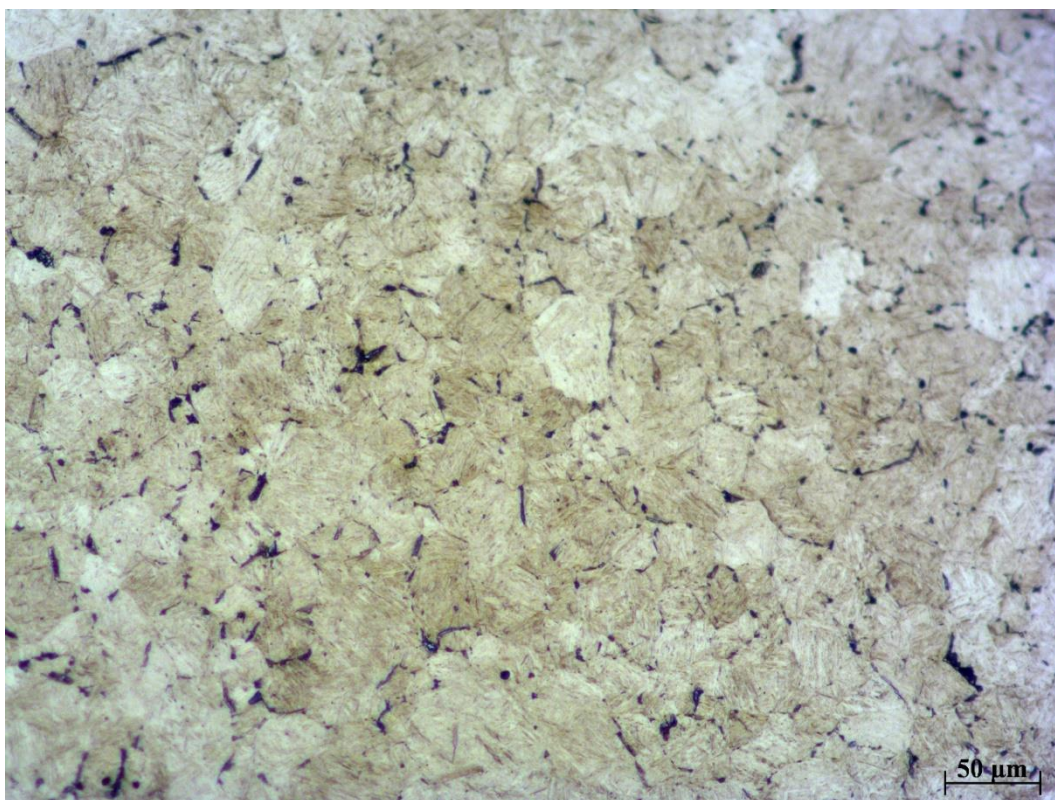


**Figura 30 - Microestrutura de perlita e ferrita resultante de têmpera interrompida em água no aço AISI 5160. Ataque: Vilella.**





**Figura 31-** Microestrutura martensítica na região superficial resultante de têmpera convencional em aço AISI 5160. Ataque: Vilella.



**Figura 32-** Microestrutura martensítica com perlita no contorno de grão, resultante de têmpera convencional no aço AISI 5160. Ataque: Vilella.



## 5.5 Perfil de dureza

A partir dos dados obtidos das micrografias, decidiu-se realizar o perfil de dureza das amostras tratadas pelo método interrompido, para verificar a profundidade atingida pela têmpera. Foram realizadas 7 medidas em cada amostra, da superfície para o centro. As distâncias entre as indentações não são tão precisas, porém ficam em torno de 50 micrômetros. Como ficou evidenciado que o AISI 1045 não sofreu transformação martensítica, este aço não participou deste ensaio.

O aço AISI O1 apresentou baixa dureza na região próxima à superfície. Isto ocorreu devido à descarbonetação comprovada na Figura 23. Para a solução salina, após a região que sofreu descarbonetação ocorre aumento de dureza conforme se afasta da superfície, conforme gráfico da Figura 33. E para a têmpera em água, após a dureza máxima ocorre queda de dureza, que é o comportamento esperado, conforme Figura 34. Porém como houve descarbonetação, os valores de ambos os casos não são precisos.

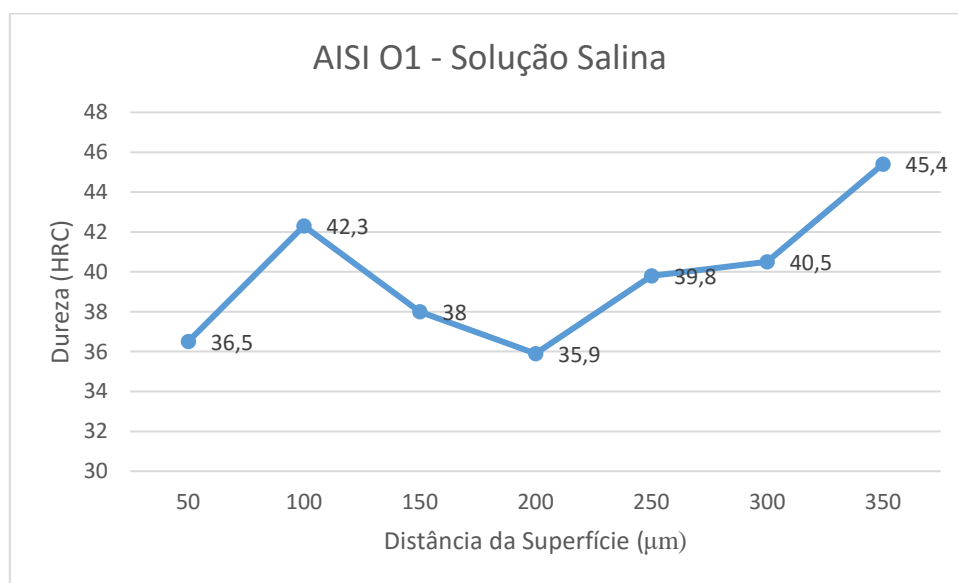
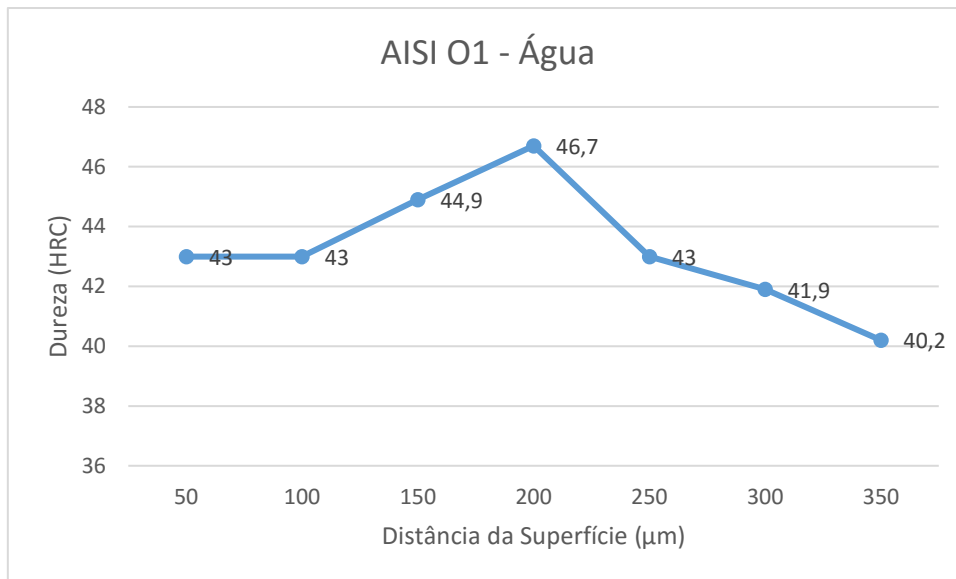
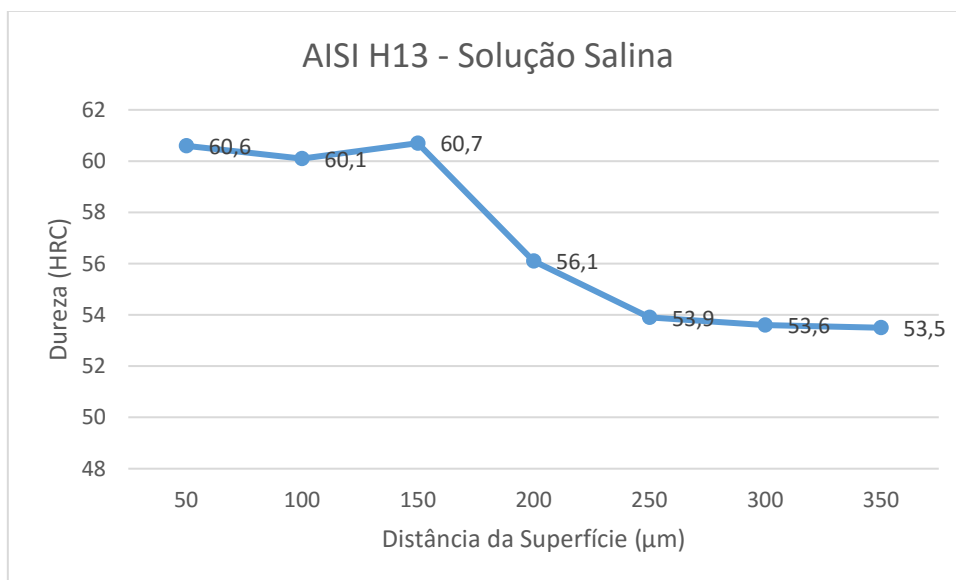


Figura 33- Perfil de Dureza - AISI O1 – Têmpera em Solução Salina

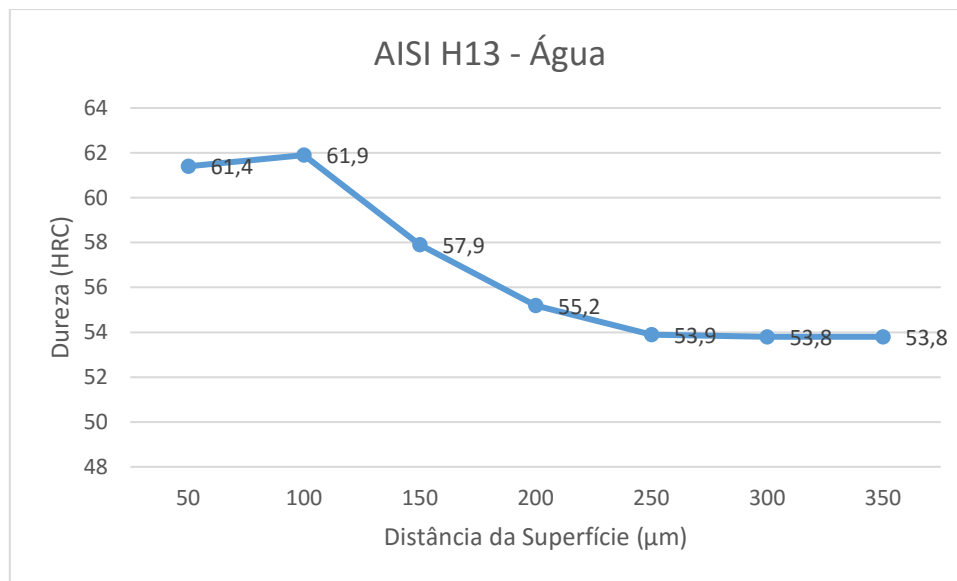


**Figura 34- Perfil de Dureza - AISI O1 - Têmpera em Água.**

Para o aço AISI H13, o perfil de dureza foi conforme esperado com valores também esperados pela literatura. Ambos os meios de resfriamento apresentaram altos valores de dureza na superfície com uma queda em direção ao centro, com uma rápida estabilização dos valores, conforme as Figuras 35 e 36.

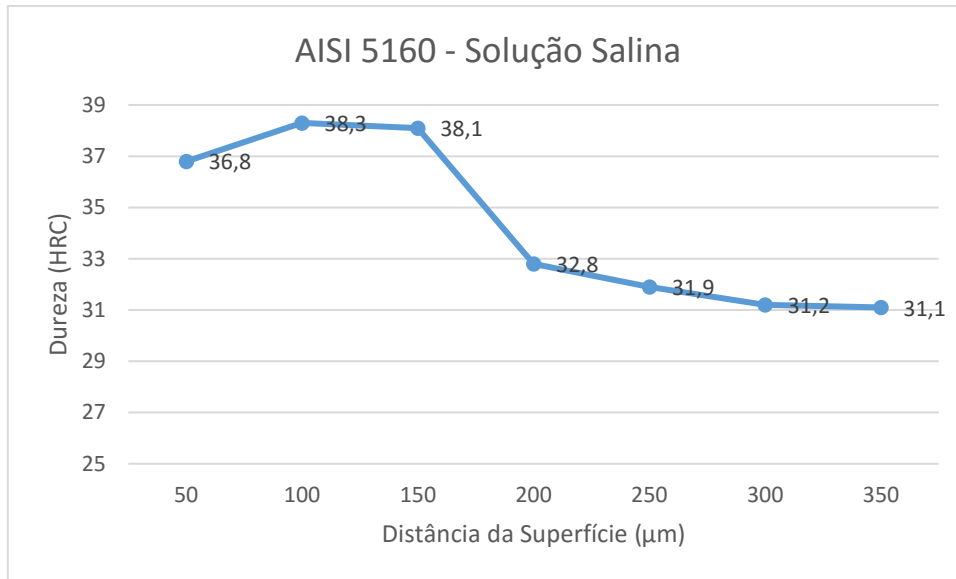


**Figura 35- Perfil de Dureza - AISI H13 - Têmpera em Solução Salina.**

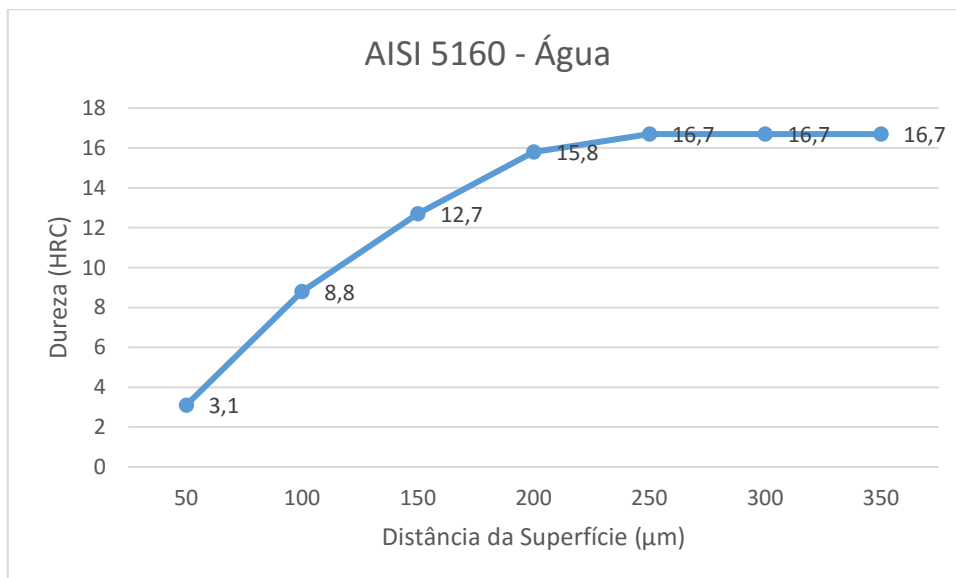


**Figura 36- Perfil de Dureza - AISI H13 - Têmpera em Água.**

As amostras de AISI 5160 apresentaram perfis de dureza bem diferentes. Para o tratamento em solução salina, o comportamento foi conforme esperado, porém os valores estão bem abaixo do informado pela literatura, indicado na Figura 37. No caso do tratamento em água, a amostra apresentou perfil de dureza invertida, segundo a Figura 38. A dureza invertida ocorre em algumas ligas, devido a falhas durante o resfriamento do material, em especial, durante a formação da camada de vapor, que é possivelmente a principal fonte de não uniformidade no resfriamento.



**Figura 37- Perfil de Dureza - AISI 5160 - Têmpera em Solução Salina.**



**Figura 38 - Perfil de Dureza - AISI 5160 - Têmpera em Água.**

## 5.6 Tensões residuais

Os ensaios de tensões residuais foram gentilmente cedidos pela empresa Rassini-NHK. Para este ensaio, foram utilizados apenas um corpo de prova por situação, envolvendo aço e meio de resfriamento. Os valores obtidos estão apresentados na tabela 14. Os valores com (+) representam tensão trativa e (-) representam tensão compressiva.

**Tabela 14 - Resultado da medição de tensão residual (MPa).**

Identificação	SSTC	SSTI	Água TC	Água TI
AISI 1045	(Amostra 49) - 113,13 ± 121,04	(Amostra 48) + 258,94 ± 21,02	(Amostra 59) + 71,38 ± 79,39	(Amostra 60) - 222,38 ± 45,04
AISI O1	(Amostra 04) + 153,10 ± 23,51	(Amostra 01) - 11,97 ± 38,84	(Amostra 12) - 97,07 ± 26,22	(Amostra 08) - 106,74 ± 37,18
AISI H13	(Amostra 17) - 767,41 ± 37,18	(Amostra 20) + 238,50 ± 57,08	(Amostra 24) + 197,68 ± 142,50	(Amostra 23) + 83,08 ± 44,78
AISI 5160	(Amostra 32) - 43,40 ± 86,54	(Amostra 34) - 38,28 ± 36,10	(Amostra 39) + 303,05 ± 44,73	(Amostra 41) - 22,42 ± 17,02

Os valores obtidos apresentam grande variação. Para alguns casos, o desvio padrão é maior que o próprio valor encontrado. Por este motivo, estes dados não podem ser validados.

## 6. Conclusões

As têmperas convencionais se mostraram efetivas para a obtenção da estrutura martensítica em todos os aços, já o processo de têmpera interrompida não foi totalmente eficaz com todos, indicando falha no processo.

A têmpera interrompida utilizada no trabalho não pode ser classificada como têmpera intensiva por não ser possível afirmar que foram obtidas as tensões compressivas superficiais desejadas.

De modo geral, todas as têmperas interrompidas, que foram efetivas, apresentaram valores de dureza um pouco abaixo do que as têmperas convencionais. Este fato pode indicar o autorevenimento do processo. Para se evidenciar isto, seriam necessários mais ensaios de dureza comparativos e testes de tenacidade do material.

Para o aço AISI O1, a descarbonetação afetou a precisão dos resultados, porém nas têmperas interrompidas foram detectadas uma faixa de martensita na região superficial e uma estrutura mista no centro, juntamente com alta concentração de carbonetos, que indica uma parcial efetividade do processo.

O aço AISI H13 apresentou bons resultados em praticamente todos os tratamentos, com uma microestrutura martensítica resultante bem similar. A trinca do corpo de prova, provavelmente é proveniente de uma deficiência de usinagem, por se tratar de uma região não usual.

O aço AISI 1045, por ter baixa temperabilidade, não obteve transformação martensítica nas têmperas interrompidas, logo, pode-se concluir que o processo não pode ser o mesmo para todos os tipos de aço. Neste caso, acredita-se que o tempo de mergulho foi insuficiente para a formação da camada de martensita.

No caso do aço AISI 5160, o processo na têmpera interrompida em água se mostrou deficiente, pois resultou em uma microestrutura de perlita e ferrita. Possivelmente o meio estava contaminado por carepas de outros corpos de provas anteriores ou a temperatura de banho estava acima do desejado e o tratamento foi afetado.

A camada de vapor formada durante o resfriamento é uma das causas de não uniformidade do processo e potencializa as distorções, probabilidades de trinca e diferenças de dureza, podendo até agravar casos de dureza invertida, como foi noticiado.

Os meios de resfriamento mais severos, como a solução salina e alta agitação do meio, se mostraram eficazes em reduzir o tempo da camada de vapor e conseqüentemente, menores distorções e menores variações de dureza.

## Referências

- [1] – COSTA E SILVA, A. L. V.; MEI, P. R. (2010). **Aços e Ligas Especiais**, Villares Metals. 3ª edição, Edgard Blucher.
- [2] – CALLISTER, W. D. (2012). **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8ª edição, LTC S.A., Rio de Janeiro, Brasil.
- [3] – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2000) NBR NM 87 – **Aço carbono e ligados para construção mecânica – Designação e composição química**. 19p.
- [4] – COSTA E SILVA, A. L. V.; MEI, P. R. (1988). **Aços e Ligas Especiais**, Eletrometal Metais Especiais. 2ª edição, Edgard Blucher.
- [5] – TOTTEN, G.E. (2007). **Steel Heat Treatment Handbook: Metallurgy and Technologies**. 2ª edição, CRC, Florida, USA.
- [6] – CHIAVERINI, V. (1996). **Aços e Ferros Fundidos**, 7ª edição.
- [7] – Albano, Luigi Leonardo Mazzucco (2012) **Estudo comparativo das propriedades mecânicas de aço AISI 5160 submetidos à Têmpera Convencional e Têmpera Intensiva**. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo.
- [8] – ASM HANDBOOK, **Vol. 04 Heat Treating**, ASM International The Materials Information Company, 1991.
- [9] – KOBASKO, N.I. (2010) **Intensive Quenching Systems: Engineering and Design**. 1ª edição. Ed. Massachusetts, ASTM International.
- [10] – **How IntensiQuench Works** – Apresentação. Disponível em: <http://www.akronsteeltreating.com/docs/default-source/default-document-library/how-intensiquench-works.pdf?sfvrsn=2>. Acesso em: 31/10/2016
- [11] – ARONOV, M.A.; KOBASKO, N.I.; POWELL, J.A. (2002). **Basic Principals, Properties and Metallurgy of Intensive Quenching**. SAE Internation Off-Highway Congress, co-located with CONEXPO-COM/AGG, Las Vegas, Nevada, March 19-21
- [12] – N.I. Kobasko; M.A. Aronov; J.A. Powell; L. C. F. Canale; G. E. Totten; (2005) **Improved Production of automotive parts by intensive quench processing**. 2ª international conference “Heat Treatment and Surface Engineering in Automotive Applications”, Riva del Garda, Italy.
- [13] – **Notas de aula de Tratamentos Térmicos** – Prof. Dra. Lauralice de Campos F. Canale. Disponível em: <https://disciplinas.stoa.usp.br/course/view.php?id=2368>. Acesso em 30/11/2016.
- [14] – DOWNLING, N.E. (2007). **Mechanical Behavior of Materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue**. 3ª edição. Ed. Pearson Prentice Hall, USA
- [15] – VENDRAMIN, J.C.; VATAVUK, J.; **Uma discussão a respeito da nucleação de trincas de fadiga em arame de aço para molas nitretadas e não nitretadas**. Disponível em: <http://www.isoflama.com.br/>. Acesso em: 15/08/2016



- [16] – **SAE 1045 Datasheet**. Disponível em: <http://www.ggdmetals.com.br/produto/sae-1045>. Acesso em 08/07/2016
- [17] – **AISI H13 Datasheet**. Disponível em: <http://www.ggdmetals.com.br/produto/aisi-h13/>. Acesso em 08/07/2016
- [18] – **AISI O1 Datasheet**. Disponível em: <http://www.ggdmetals.com.br/produto/aisi-o1/>. Acesso em 08/07/2016
- [19] – **AISI 5160 Datasheet**. Disponível em: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6743>. Acesso em 08/07/2016
- [20] – COLPAERT, H. (1974). **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3ª edição. São Paulo: Edgard Blucher;
- [21] – **Datasheet O1 Bohler K460**. Disponível em: <http://www.bohler-edelstahl.com/en/K460.php>. Acesso em 30/11/2016.
- [22] – **Datasheet H13 Bohler**. Disponível em: [http://www.bucorp.com/bu\\_h13\\_h.htm](http://www.bucorp.com/bu_h13_h.htm). Acesso em 30/11/2016.
- [23] – **AISI 1045 e AISI 5160 Datasheet**. Disponível em: [http://www.favorit.com.br/sites/default/files/tabelas/acos\\_para\\_construcao\\_mecanica.html](http://www.favorit.com.br/sites/default/files/tabelas/acos_para_construcao_mecanica.html). Acesso em 10/10/2016
- [24] – CANALE, L.C.F. and TOTTEN, G.E. (2005). **Overview of Distortion and Residual Stress, due to Quench Processing – Part: I: Factors Affecting Quench Processing**. Int. J. Materials and Product Technology, vol. 24
- [25] – TOTTEN, G.E.; TENSI, H.M. (2002). **Using Conductance Data to Characterize Quenchants**. Heat Treating Progress, USA, p. 39-4.
- [26] – CASTRO, Bruno Adarme (2013). **Estudo de nanofluidos de alumina para aplicação em têmpera**. Relatório científico Fapesp.

### Anexo A – Dureza dos aços no estado inicial

AISI O1 (HRC)			
CP	1	2	3
1	16,2	17,3	17,7
2	26	25,8	24,4
3	15,9	19	19,5
4	19,1	18,8	18
5	10,6	19,1	19,6
6	17,3	25,7	25
7	19,5	20,5	21,2
8	17,2	19,8	17,7
9	16,8	17,9	19
10	25,4	25,8	25,3
11	15,4	27,8	25,9
12	19,8	19,9	21
13	9,5	17,7	18,3
14	11,4	18	17,5
15	18,4	19,7	19,3

AISI H13 (HRC)			
CP	1	2	3
16	13,4	13,5	12,1
17	7,3	7,7	9
18	14	13	13,5
19	13,4	12,5	13,5
20	13,9	13,7	13,6
21	7,8	10	8,2
22	15	14,3	13,1
23	12,5	14	10,9
24	12,7	13,7	14
25	13,7	11,7	10
26	15,2	9,8	11,8
27	12,9	14,4	13,1
28	9,1	9	12,4
29	13,7	13,7	11
30	11,8	10,1	10,4

AISI 5160 (HRC)			
CP	1	2	3
31	9,9	19,8	16,9
32	6,3	17,7	19,4
33	15,7	16,5	19,4
34	14,7	15,7	18,4
35	6,8	19,8	15,6
36	9,4	18,8	19,4
37	10,9	16,3	19,4
38	15,8	19,3	18,6
39	9	17,7	15,9
40	6,6	17,7	18
41	29,4	26	19
42	21,3	25,2	21,7
43	26,5	20,8	23,3
44	17,6	24,1	16,7
45	22,8	23,3	24,3

AISI 1045 (HRC)			
CP	1	2	3
46	11,1	16,8	20,3
47	14,1	17,5	15,7
48	11,6	14,7	16,9
49	8	14,2	9,4
50	11,8	7,4	10,1
51	10	22,5	14,5
52	13,5	12	8,1
53	8,3	17	12,7
54	11,8	12,7	8,1
55	12,8	11,6	23,5
56	17,7	25,1	13,4
57	14,2	26,7	8
58	11	15,8	19,3
59	14,3	17	15,7
60	10,5	20,5	12,5

## Anexo B – Dureza dos aços normalizados

AISI O1 (HRC)			
CP	1	2	3
1	31,3	34,5	35,2
2	31,5	30,4	33,4
3	34,7	36,6	36,1
4	34,4	35,7	34,9
5	29,8	32,4	32,8
6	31,2	34,6	32
7	22	25,1	28,2
8	34,6	35,6	37,1
9	30,5	34,9	36,3
10	27,8	32,8	22,8
11	26,6	30,6	28,6
12	22,8	26,3	34,8
13	37,4	36,1	36
14	30,9	34,6	36,1
15	31,7	35,5	36,3

AISI H13 (HRC)			
CP	1	2	3
16	37,5	50	50,7
17	46	48,9	46,9
18	43,7	38,1	49,5
19	39,6	46,9	49,3
20	43,8	49,8	46,6
21	30,8	41,9	47,4
22	39,7	48,2	45,8
23	30,2	48	35,8
24	34,5	49,9	48,8
25	31,9	49,8	48,8
26	40,3	50,4	38,4
27	43	42,5	46,2
28	39,1	45,9	49,9
29	38,7	49,1	48,9
30	32,1	48,7	48,7

AISI 5160 (HRB)			
CP	1	2	3
31	76,4	83,1	77,4
32	75	80,9	78,1
33	78,2	82,2	79
34	75,8	79	78,8
35	79,5	85,8	83,8
36	78,9	81,4	80,3
37	77,4	78,3	79,8
38	85,6	72,4	81,5
39	80,8	79,4	79
40	78	73,7	81,6
41	81,7	86	92,1
42	90,3	93,1	91,1
43	91,5	89,9	90,9
44	90,8	87,9	90,1
45	89,4	86,7	95,6

AISI 1045 (HRB)			
CP	1	2	3
46	88,7	81,8	78,3
47	76,8	69,8	81,8
48	85,4	89,3	89
49	85,3	88,7	86,3
50	90,3	80	87,1
51	86	83,4	82,9
52	84,5	84	86,4
53	66,7	89,1	83
54	85,1	82,8	84,6
55	91,1	73,5	92,7
56	90	89,5	89,6
57	81,3	78,1	88,9
58	64,4	69,9	75,2
59	61,1	67,3	71,3
60	61,8	72,5	62,9

### Anexo C – Dureza dos aços temperados

AISI O1 (HRC)			
CP	1	2	3
	ÁGUA TC		
11	43,6	58,3	55,6
12	55	54,4	49,8
13	46,5	55,5	48,5
	ÁGUA TI		
8	35	36,7	37,4
9	32,8	34,4	29
10	30	27,5	28,7
	SS TC		
4	48,3	56,7	55,4
6	56,3	59,1	61,6
3	57,8	57,3	57,6
	SS TI		
1	35,4	37,1	37,6
2	39,5	39	37,8
5	38	37,5	34,5

AISI H13 (HRC)			
CP	1	2	3
	ÁGUA TC		
24	61,6	59	62,1
25	59,1	59,1	59,4
22	62,2	62,8	61
	ÁGUA TI		
26	63,9	63,3	61,9
27	61,5	55,5	45,1
23	56,8	59,1	45,6
	SS TC		
16	54,5	59,8	62,9
17	62,6	60,7	64,1
18	56,9	59,8	62,9
	SS TI		
19	58,1	58,9	56,9
20	49,4	58	59
21	58,1	58,9	56,9

AISI 5160 (HRC)			
CP	1	2	3
	ÁGUA TC		
38	51,9	45	45,2
39	49,8	51,5	50,6
42	58,3	59,2	57,7
	ÁGUA TI		
37	2	5	7
40	1	2	4
41	21	16,2	14
	SS TC		
31	40	53,1	44,2
32	47,8	50,6	44
33	37,6	43,9	45
	SS TI		
34	11	12	11,2
35	7,5	18,5	23,8
36	19,3	19	16,5

AISI 1045 (HRC)			
CP	1	2	3
	ÁGUA TC		
57	47,6	52,6	49
58	37	41,9	42,8
59	37,5	47,2	38,6
	ÁGUA TI		
60	10	5	4
53	10	14,5	7
54	17,6	20	15
	SS TC		
46	50,3	48,6	45,7
47	38,7	48,3	37
49	35,5	40,5	50,9
	SS TI		
48	19	22,2	27,7
50	12	28,4	34,6
51	13,5	25,9	29,7

### Anexo D – Distorções dos aços normalizados

AISI O1						
CP	0°		90°		180°	
	+	-	+	-	+	-
1	0,05		0,13	0,04	0,03	0,02
2			0,08			0,03
3	0,03		0,08		0,05	
4	0,04		0,02	0,05	0,02	0,04
5	0,04		0,14		0,04	
6	0,05	0,1	0,05		0,11	
7	0,03			0,2	0,3	
8	0,05		0,05	0,03	0,05	0,03
9	0,02		0,14		0,02	
10	0,07		0,05			0,1
11		0,15	0,2		0,5	
12	0,05		0,08			0,05
13	0,03		0,03			0,07
14		0,05	0,12		0,014	
15	0,02		0,07			0,05
Média	0,040	0,100	0,089	0,080	0,113	0,049

AISI H13						
CP	0°		90°		180°	
	+	-	+	-	+	-
16		0,06	0,12			0,05
17	0,02	0,02	0,06		0,02	
18	0,16		0,18			0,15
19	0,05		0,55	0,15		0,11
20	0,03		0,15			0,04
21	0,23		0,72			0,4
22	0,46		0,39			0,35
23		0,46	0,54		0,4	
24		0,2		0,12	0,18	
25		0,03	0,1		0,02	0,03
26		0,07	0,16		0,07	
27	0,03		0,08		0,03	
28	0,31		0,45	0,15		0,5
29	0,07		0,07		0,04	
30		0,12		0,07	0,04	
Média	0,151	0,137	0,275	0,123	0,100	0,204

AISI 5160						
CP	0°		90°		180°	
	+	-	+	-	+	-
31		0,1	0,15	0,05	0,15	
32		0,08	0,15			0,06
33	0,05		0,2			0,06
34		0,35		0,15	0,36	
35		0,03	0,27	0,1	0,04	
36	0,08		0,28			0,12
37	0,03		0,27			0,02
38	0,04	0,02		0,04		0,04
39	0,08		0,07		0,04	0,07
40	0,08		0,08	0,06		0,08
41	0,07		0,28	0,11	0,1	
42		0,06	0,21	0,03	0,3	0,06
43	0,1	0,2	0,1		0,05	0,1
44	0,17		0,1	0,1	0,07	0,02
45	0,03	0,1	0,25	0,1		0,18
Média	0,073	0,127	0,192	0,086	0,137	0,075

AISI 1045						
CP	0°		90°		180°	
	+	-	+	-	+	-
46	0,02		0,28			0,03
47		0,07		0,04	0,03	0,05
48	0,04		0,18		0,1	0,04
49	0,03		0,07			0,05
50	0,5	0,12	0,25			0,2
51	0,1	0,1	0,13			0,25
52	0,12		0,12			0,07
53	0,03		0,14	0,06	0,05	
54	0,05		0,14	0,06	0,05	
55		0,06	0,17		0,03	
56	0,08		0,04		0,04	
57	0,06		0,16			0,01
58		0,02	0,14			0,05
59	0,02	0,03	0,13		0,03	
60	0,03	0,03	0,04		0,04	0,03
Média	0,090	0,061	0,142	0,053	0,046	0,078

### Anexo E – Distorções dos aços temperados

AISI O1						
CP	0		90		180	
	+	-	+	-	+	-
	ÁGUA TC					
11		0,52		0,78	0,25	
12		0,85	0,45	0,55		0,3
13	0,7		0,05	0,45		0,28
	ÁGUA TI					
8		0,15	0,25			0,1
9	0,1		0,28	0,05	0,1	
10		0,23	0,08	0,03	0,12	0,03
	SS TC					
4	0,12	0,05	0,1		0,18	
6	0,05	0,05	0,17		0,15	
3		0,1	0,15		0,12	
	SS TI					
1	0,1		0,3	0,3	0,06	0,05
2	0,15		0,35			0,1
5	0,3			0,05	0,12	

AISI H13						
CP	0		90		180	
	+	-	+	-	+	-
	ÁGUA TC					
24	0,45			2,1	0,6	0,15
25	0,15			1,7	0,2	1,2
22	0,5			1,8	0,4	
	ÁGUA TI					
26	0,15		0,05			0,1
27	0,2		0,1			0,3
23	0,35		0,38			0,45
	SS TC					
16	0,28	0,22		0,75		0,3
17		0,1	0,4	0,65		0,2
18	0,7			0,35	0,2	0,3
	SS TI					
19		0,2	0,05	0,1	0,15	
20	0,1		0,3	0,25		0,1
21		0,75	0,55			0,5

AISI 5160						
CP	0		90		180	
	+	-	+	-	+	-
	ÁGUA TC					
38		0,3		1,85		0,25
39	0,18	0,4	0,3	1,2	0,4	0,1
42		0,8		2,1	0,15	0,25
	ÁGUA TI					
37		0,1	0,35		0,07	
40	0,35		0,25		0,1	0,05
41	0,15		0,35		0,15	
	SS TC					
31	1,4		0,9		1,3	
32	0,2	0,3		0,9	0,3	
33	0,4		0,7			0,75
	SS TI					
34		0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
35		0,15	0,15		0,1	0,05
36	0,35		0,15		0,05	0,3

AISI 1045						
CP	0		90		180	
	+	-	+	-	+	-
	ÁGUA TC					
57	0,4	0,15		1,4	0,3	
58		0,6		1,9	0,6	0,15
59	0,2	0,2		1,3	0,15	0,15
	ÁGUA TI					
60	0,4		0,2			0,25
53		0,1	0,1			0,15
54	0,1	0,1		0,1	0,1	
	SS TC					
46	0,1	0,1	0,8			0,1
47	0,2	0,03	0,2	0,25	0,2	0,2
49	0,2	0,2		1,1		0,4
	SS TI					
48	0,4	0,05		1,3	0,05	0,4
50		0,4		0,55	0,3	
51	0,2			0,63		0,2