

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE  
PROCESSO DE TRATAMENTO TÉRMICO DE  
TÊMPERA E REVENIMENTO COM AQUECIMENTO  
POR INDUÇÃO ELÉTRICA EM TUBOS SOLDADOS**

**André Luis Rodrigues Caldas**

Monografia apresentada à Faculdade de  
Tecnologia de Pindamonhangaba, para  
graduação no Curso Superior de  
Tecnologia em Metalurgia.

**Pindamonhangaba – SP  
2013**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE  
PROCESSO DE TRATAMENTO TÉRMICO DE  
TÊMPERA E REVENIMENTO COM AQUECIMENTO  
POR INDUÇÃO ELÉTRICA EM TUBOS SOLDADOS**

**André Luis Rodrigues Caldas**

Monografia apresentada à Faculdade de  
Tecnologia de Pindamonhangaba, para  
graduação no Curso Superior de  
Tecnologia em Metalurgia.

Área de concentração: tratamento  
térmico.

Orientador: Emerson Luís Junqueira

**Pindamonhangaba – SP  
2013**

C145e

Caldas, André Luis Rodrigues.

Estudo da influência dos parâmetros de processo de tratamento térmico de têmpera e Revenimento com aquecimento por indução elétrica em tubos soldados / André Luis Rodrigues Caldas / FATEC Pindamonhangaba, 2013. 56f.: il.

Orientador Professor Me. Emerson Luís Junqueira  
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. 2013

1. Tratamento térmico. 2. Revenimento. 3. Têmpera.  
4. Indução. I. Caldas, André Luis. II. Junqueira, Emerson Luís.  
III. Título.

CDD 621.3

# FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA

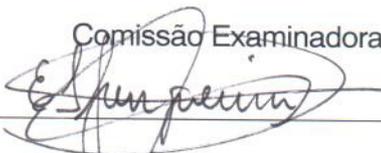
TÍTULO DO TRABALHO

## “Estudo da influência dos parâmetros de processo de tratamento térmico de têmpera e revenimento com aquecimento por indução elétrica em tubos soldados”

**André Luis Rodrigues Caldas**

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, para graduação no Curso Superior de Tecnologia em Metalurgia.

Comissão Examinadora



Orientador – Prof. Especialista Emerson Luis Junqueira



Membro Interno – Prof. Ms. Marcelo Bergamini de Carvalho



Membro Externo – Prof. Dr. Mauro Pedro Peres

**Pindamonhangaba, 15 , de julho , 2013.**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta monografia à memória do meu pai Pedro Pereira Caldas, que entre tantas idas e vindas das nossas vidas, ele esteve sempre presente, à minha mãe por todo tempo investido a mim, dando toda orientação e educação necessária para minha vida, aos meus irmãos que nunca deixaram de dar apoio em minha caminhada, sempre confiando, incentivando e dando forças para continuar em frente, pois graças a eles pude dar mais este passo em minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho acadêmico, às equipes da empresa, que me deram apoio nas execuções de ensaios, ajustes dos parâmetros de equipamentos e acompanhamentos de processo, bem como ao Daniel Rolando e Alysson Camargo por todo suporte técnico dado em todas as atividades realizadas.

Agradeço ainda, de forma especial, à Carla Vivian de Souza Rodrigues de Lima Caldas, minha esposa que me incentivou e me apoiou em todas as decisões tomadas, sendo ela a pessoa mais importante para a realização deste trabalho acadêmico.

## **EPÍGRAFE**

“E nenhuma pessoa grande jamais entenderá que isso possa ter tanta importância!”

Saint-Exupéry, Antoine de. O Pequeno Príncipe.

CALDAS, A. L. R. **Estudo da Influência dos Parâmetros de Processo de Tratamento Térmico de Têmpera e Revenimento com Aquecimento por Indução Elétrica em Tubos Soldados**. 2013. Monografia – Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, 2013.

## RESUMO

Em decorrência do elevado custo de venda dos aços com altas propriedades mecânicas, necessários à aplicação em setores que requeiram tais propriedades, os processos de tratamento térmico são comumente praticados nas empresas metalúrgicas para redução dos gastos com matéria-prima e aumento do lucro após beneficiamento deste material, pois estes processos propiciam a aquisição de materiais com baixos custos e propriedades mecânicas e transformá-los em materiais de alto valor agregado e com altos valores em suas propriedades mecânicas. Com a necessidade de realizar tratamentos térmicos, foi desenvolvida uma tecnologia de aquecimento de aços pelo processo de indução elétrica, sendo esta uma opção ao processo convencional de aquecimento a gás, onde através de um campo eletromagnético, materiais ferrosos podem ser aquecidos a altas temperaturas. Este estudo aborda o básico da teoria de aquecimento por indução elétrica e também a aplicação desta tecnologia no tratamento térmico de materiais ferrosos, sendo utilizados, neste caso, tubos de aços soldados através do processo de ERW/HFIW, que significa solda por processo de alta frequência elétrica. Este trabalho foca no estudo da influência dos ajustes realizados nos valores de parâmetros operacionais do forno de tratamento térmico, relativos aos processos de têmpera e revenimento, e os resultados obtidos após estes tratamentos, onde se buscou compreender melhor o funcionamento dos equipamentos e também estabelecer uma correlação entre o parâmetro ajustado e o resultado obtido. Estas correlações poderão ser utilizadas como base para elaboração de um controle de processo que foca a redução das perdas metálicas e rejeições no processo gerando menor retrabalho e reduzir os custos produtivos desta linha de produção.

Palavras-chave: Tratamento térmico, indução, têmpera, revenimento.

CALDAS, A. L. R. **Study of the Influence of Process Parameters of Heat Treatment Hardening and Tempering with Electric Induction Heating in Welded Pipes**. 2013. Monograph – Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, 2013.

### **ABSTRACT**

Due to the high cost of steels sales price with high mechanical properties required for the application in industries that require such properties, heat treatment processes are commonly practiced in metallurgical companies to reduce spending on raw materials and increase in profit after processing this material, as these processes provide the acquisition of materials with low cost and mechanical properties and turn them into materials with high added value and high values in their mechanical properties. With the need for heat treatments, was developed a technology process for heating steel by electric induction, which is an option to the conventional process gas heating, where through an electromagnetic field, ferrous materials can be heated to high temperatures. This study deals on the basic theory of induction heating power and also the application of this technology on heat treatment of ferrous materials being used in this case welded steel pipes through the process ERW / HFIW, that means high frequency induction weld. This work focuses on the study of the influence of the adjustments made in the operating parameters of the furnace heat treatment for the hardening and tempering processes, and the results obtained after these treatments, which sought to better understand the functioning of the equipment and to establish a correlation between parameter set and the result obtained. These correlations can be used as a basis for developing a control process that focuses on the reduction of metal losses and rejections in the process generating less rework and reduce the production costs of this production line.

**Key-Words:** Heat treatment, induction, hardening, tempering.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Severidade de têmpera de diferentes meios comparadas com a água (COLPAERT, 2008).....	26
Tabela 2 – Tabela da composição química, em percentual (%), típica para material utilizado nos tubos tratados termicamente.....	43
Tabela 3 – Limites de escoamento e resistência para ensaios de tração de acordo com a norma API5CT:2011.....	46
Tabela 4 – Resultado do ensaio de composição química do aço utilizado nos testes de tratamento térmico.....	47
Tabela 5 – Especificação técnica dos tubos utilizados nos processos de tratamento térmico de têmpera e revenimento.....	48
Tabela 6 – Primeiro Teste: Parâmetros de ajuste do resfriamento e velocidade da linha.....	48
Tabela 7 – Primeiro Teste: Parâmetros de ajuste nos estágios de aquecimento.....	48
Tabela 8 – Primeiro Teste: Resultado de dureza em amostra de têmpera.....	49
Tabela 9 - Primeiro Teste: Resultado de dureza em amostra de revenimento.....	49
Tabela 10 - Primeiro Teste: Resultado de tração em amostra de revenimento.....	49
Tabela 11 – Resumo dos resultados do Primeiro Teste.....	49
Tabela 12 – Segundo Teste: Parâmetros de ajuste do resfriamento e velocidade da linha.....	50
Tabela 13 – Segundo Teste: Parâmetros de ajuste nos estágios de aquecimento.....	50
Tabela 14 – Segundo Teste: Resultado de dureza em amostra de têmpera.....	50
Tabela 15 – Segundo Teste: Resultado de dureza em amostra de revenimento.....	50
Tabela 16 - Segundo Teste: Resultado de tração em amostra de revenimento.....	51
Tabela 17 – Resumo dos resultados do 2º Teste.....	51
Tabela 18 – Terceiro Teste: Parâmetros de ajuste do resfriamento e velocidade da linha.....	51
Tabela 19 – Terceiro Teste: Parâmetros de ajuste nos estágios de aquecimento.....	52
Tabela 20 – Terceiro Teste: Resultado de dureza em amostra de têmpera.....	52
Tabela 21 - Terceiro Teste: Resultado de dureza em amostra de revenimento.....	52
Tabela 22 - Terceiro Teste: Resultado de tração em amostra de revenimento.....	52

Tabela 23 – Resumo dos resultados do 3º Teste.....	53
Tabela 24 – Resumo dos parâmetros de temperatura nos três testes realizados. ....	54
Tabela 25 – Resumo dos parâmetros de pressão de água no resfriamento nos três testes realizados .....	54

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de equilíbrio de fases Fe-C. (COLPAERT, 2008). .....	19
Figura 2 - Curva TTT para um aço de teor de carbono extra baixo. (COLPAERT, 2008).....	20
Figura 3 – Representação esquemática de uma curva TTT de um aço eutetóide. (COSTA e SILVA & MEI, 2010).....	21
Figura 4 – Aspectos termodinâmicos de formação de martensita / $M_i$ : temperatura de formação martensítica, $M_F$ : temperatura de fim da formação martensítica. (COSTA e SILVA & MEI, 2010).....	22
Figura 5 – Efeito do teor de carbono nas temperaturas de início ( $M_i$ ) e fim ( $M_F$ ) da transformação da austenita em martensita. (COSTA e SILVA & MEI, 2010) .....	23
Figura 6 – Aço 0,2 C – 1 Mn – 0,03 Nb, temperado em água. (COSTA e SILVA & MEI, 2010) .....	23
Figura 7 - Curva TTT – variação de temperatura na superfície e centro da peça. (COLPAERT, 2008) .....	27
Figura 8 - Esquema do estado da tensão existente em um bloco de aço durante os estágios de tempera em água. (COSTA e SILVA & MEI, 2010).....	29
Figura 9 - Medidas dilatométricas da variação de comprimento (expansão linear) de aço resfriado lenta ou rapidamente. (COLPAERT, 2008) .....	29
Figura 10 - Trinca originada por tensões de tempera em barra cilíndrica de aço AISI 4340. (COLPAERT, 2008) .....	30
Figura 11 - Ciclo de tempera + revenimento. (COSTA e SILVA & MEI, 2010) .....	32
Figura 12 - (a) efeito do revenimento sobre as propriedades mecânicas de um aço. (b) efeito do revenimento sobre as propriedades mecânicas do aço AISI4340. (COLPAERT, 2008)..	33
Figura 13 - Dois tipos de fragilização no revenimento (a) a forma mais comum observada num aço da construção mecânica. (b) fragilização observada em alguns aços como o empregado neste caso C: 0,35%, Ni: 3,44% e Cr: 1,05%. (COLPAERT, 2008).....	34
Figura 14 – Aplicações industriais para tratamento térmico por indução. (RUDNEV, 2002). 36	
Figura 15–Distribuição da corrente entre a bobina e peça. (TOTTEN, 2007).....	37

Figura 16 - Esquema de uma bobina indutora circular para aquecimento de tubos e barras. (RUDNEV, 2002) .....	37
Figura 17 - Distribuição da corrente em função da frequência. (TOTTEN, 2007) .....	38
Figura 18– Efeito anel em condutores retangulares. (TOTTEN, 2007).....	39
Figura 19 – Eficiência da bobina indutora em relação à frequência aplicada. (RUDNEV, 2002) .....	40
Figura 20 – Tratamento térmico de têmpera de um tubo de aço carbono de diâmetro externo: 127mm, espessura: 12,7mm, diâmetro interno: 101,6mm, produzindo a 3t/h, frequência: 3kHz, comprimento de bobina indutora: 0,4m e uma distancia entre bobinas de 0,2m. (Rudnev,2002) .....	40
Figura 21 – Perda de calor por radiação e convecção ao longo do tubo durante aquecimento com uma bobina indutora de duas espiras. (TOTTEN, 2007) .....	41
Figura 22 - Processo de tratamento térmico. ....	42
Figura 23 – Desenho esquemático do corpo de prova para ensaios de tração. (NORMA API5CT:2011).....	43
Figura 24 - Dimensões do corpo de prova para ensaiados de tração referentes. (NORMA API5CT:2011).....	44
Figura 25 – Desenho esquemático de amostra para ensaio de dureza e localização dos pontos a serem ensaios ao longo da espessura do tubo. (NORMA API5CT:2011).....	44
Figura 26 – Limite de dureza e tensão para tubos tratados termicamente no Grau N80. (NORMA API5CT:2011).....	45

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS .....	16
2.1	Objetivo Geral .....	16
2.2	Objetivos Específicos .....	16
3	PROCESSO DE TRATAMENTO TÉRMICO.....	17
3.1	Conceitos gerais .....	17
3.2	Tratamentos térmicos.....	18
3.3	Curvas TTT .....	19
3.4	Têmpera.....	23
3.4.1	Temperabilidade .....	24
3.4.2	Meios de têmpera e severidade.....	25
3.4.3	Água como meio de têmpera .....	26
3.4.4	Trincas de têmpera.....	28
3.5	Revenimento .....	31
3.5.1	Transformações no revenimento .....	32
3.5.2	Fragilização no revenimento.....	34
4	TRATAMENTO TÉRMICO POR INDUÇÃO .....	35
4.1	Teoria básica do aquecimento por indução .....	36
4.1.1	Efeitos gerados no aquecimento por indução .....	37
4.1.1.1	Efeito de camada .....	37
4.1.1.2	Efeito das espiras.....	38

4.2	Tratamento térmico por indução de tubos .....	39
5	MATERIAIS E MÉTODOS .....	42
5.1	Confecção de corpos de prova.....	43
5.2	Caracterizações mecânicas .....	44
5.2.1	Ensaio de dureza.....	45
5.2.2	Ensaio de tração.....	46
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
6.1	Composição química.....	47
6.2	Tratamento térmico .....	47
6.2.1	1º teste .....	48
6.2.1.1	Parâmetros .....	48
6.2.1.2	Resultados.....	49
6.2.1.3	Discussão dos resultados .....	49
6.2.2	2º teste .....	50
6.2.2.1	Parâmetros .....	50
6.2.2.2	Resultados.....	50
6.2.2.3	Discussão dos resultados .....	51
6.2.3	3º teste .....	51
6.2.3.1	Parâmetros .....	51
6.2.3.2	Resultados.....	52
6.2.3.3	Discussão dos resultados .....	52
7	CONCLUSÃO.....	54
8	REFERÊNCIAS .....	56

## 1 INTRODUÇÃO

O tratamento térmico tem como objetivo alterar as propriedades mecânicas do aço através do aquecimento e de resfriamento, dentro de condições controladas de temperatura, e tempo submetido à temperatura, ambiente do componente metálico e velocidade de resfriamento, a fim de utilizá-lo em aplicações diferenciadas, utilizando para esta alteração as modificações de sua microestrutura. Segundo Colpaert (2008) a microestrutura que melhor combina as propriedades de resistência e tenacidade em aços é a martensita revenida, e esta microestrutura não pode ser garantida em aços no estado bruto de fornecimento. Como o foco deste tratamento térmico é o aumento das propriedades mecânicas do aço, e esta se dá através de modificações microestruturais, há também as ocorrências de distorções dimensionais no material.

Os materiais mais comumente aplicados aos tratamentos térmicos são as ligas Fe-C, sobretudo os aços, porém diversas ligas de materiais não ferrosos também podem ser tratados termicamente.

Os tratamentos térmicos são aplicáveis, então, para remoções de tensões residuais, alteração de dureza do material, aumento da resistência mecânica e melhora da ductilidade, usinabilidade, resistência ao desgaste, entre outras características conforme a aplicação do aço a ser tratado.

Dentre as diversas técnicas de processo para alteração destas propriedades, neste trabalho, ressaltaremos os tratamentos de têmpera e revenimento.

O domínio das técnicas de execução e controle de processos de tratamentos térmicos envolve metalurgia aplicada à microestrutura do material a ser utilizado, visto que estes processos afetam as ligações e comportamento dos grãos do aço. De acordo com Souza (1982), a determinação das propriedades mecânicas de um material metálico é realizada por meio de vários ensaios, e em sua grande maioria são considerados como ensaios destrutivos por gerarem a ruptura e a inutilização do material.

A execução de um tratamento térmico também exige conhecimentos dos diagramas

de equilíbrio das ligas metálicas (diagrama Fe-C), os diagramas de temperatura, transformação e tempo (diagrama TTT).

Ainda como conceito aplicado aos processos de tratamento térmicos, referência deste trabalho, torna-se relevante o entendimento de critérios de controle de processo a fim de reduzir custos de retrabalho no material e também tempo de processo.

Além dos aspectos previamente avaliados, durante a execução deste trabalho, observou-se ainda a importância da capacitação dos indivíduos envolvidos na operacionalização dos equipamentos.

O processo adotado para este estudo é baseado no aquecimento por indução, obtido através de campos eletromagnéticos criados pela alta potência envolvida nos equipamentos resumidamente descritos ao longo deste.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Estudar o processo de tratamento térmico de têmpera e revenimento pelo processo de indução térmica gerada por campo eletromagnético e resfriamento forçado com uso de água.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Avaliar as condições dos parâmetros de aquecimento e resfriamento, tais como pressão e vazão de água utilizada no sistema e também parâmetros de aquecimento tais como curva de aquecimento, efeitos da frequência e penetração da indução ao longo da espessura do tubo.

Associar os resultados obtidos em ensaios de propriedades mecânicas com os parâmetros utilizados em linha de produção utilizando comparações diretas entre estes.

### 3 PROCESSO DE TRATAMENTO TÉRMICO

#### 3.1 Conceitos gerais

Os aços utilizados para têmpera e revenimento também são conhecidos como aços para construção mecânica, pois segundo a definição de Chiaverini (1986) a construção mecânica exige peças metálicas de determinados requisitos, de modo a torná-las aptas a suportar satisfatoriamente as condições de serviço a que estarão sujeitas.

As isenções de requisitos que possam tornar o aço não aplicável à construção mecânica podem ser associadas às tensões internas nos materiais e baixas propriedades mecânicas.

Segundo Colpaert (2008) enquanto aços estruturais são normalmente fornecidos para atender a requisitos mecânicos com alguns limites de composição química especificada com vistas à soldabilidade, por exemplo, aços para construção mecânica são usualmente fornecidos para atender faixas de composição química, uma vez que, normalmente, são tratados termicamente para obter as propriedades finais após o processamento pelo comprador. A principal característica visada, ao se definir a composição química, é a temperabilidade.

Chiaverini (1986) afirma que os processos de produção nem sempre fornecem os materiais de construção nas condições desejadas: as tensões que se originam nos processos de fundição, conformação mecânica e mesmo na usinagem criam sérios problemas de distorções e empenamentos e as estruturas resultantes não são, frequentemente, as mais adequadas, afetando, em consequência, no sentido negativo, as propriedades mecânicas dos materiais.

“Por esses motivos, há necessidade de submeter as peças metálicas, antes de serem definitivamente colocadas em serviço, a determinados tratamentos que objetivem minimizar ou eliminar aqueles inconvenientes (CHIAVERINI, 1986).”

Para o sucesso do tratamento térmico de materiais metálicos, é imprescindível o

estudo prévio e a adequada seleção do material a ser utilizado. Considerando ainda o processo de têmpera e revenimento, a característica do aço voltada a temperabilidade deste se torna indispensável, pois esta define a variação de dureza do material ao longo de sua espessura.

“Na seleção de aços para têmpera e revenimento, a propriedade mais importante é a temperabilidade. Não se deve confundir temperabilidade com dureza máxima na têmpera, que é função do teor de carbono e da quantidade de martensita na microestrutura (COLPAERT, 2008).”

Segundo Vaskevicius (2007), as principais propriedades alteradas por meio de um tratamento térmico, em um determinado material, são:

- a. Limite de resistência: é o máximo valor da força que um material pode suportar por unidade de área resistente;
- b. Dureza: é a resistência que um material oferece ao corte por usinagem e também em sofrer uma deformação permanente;
- c. Ductilidade: é a capacidade que um material apresenta de, ao ser aplicado uma força sobre este, deformar-se permanentemente antes de romper;
- d. Escoamento: é a capacidade que alguns materiais apresentam de, sob esforço, deformar-se continuamente;
- e. Organização estrutural interna: é a forma como se arranjam os principais constituintes e os eventuais defeitos que compõem a estrutura do material.

## **3.2 Tratamentos térmicos**

Como já estudado previamente, o modo mais comum de alterar as propriedades mecânicas, físicas e até mesmo químicas dos aços é através da utilização de processos de tratamentos térmicos.

Para se definir corretamente o melhor processo de tratamento térmico é importante considerar alguns fatores, sendo estes, as características da peça, a sequência de produção, cuidados durante o tratamento térmico (posição, fixação, variações de dilatação,

dentre outros), estabelecer previamente os testes aplicáveis para validação do processo e análise técnico-comercial, visando definir qual a opção apresenta melhor relação custo-benefício. (VASKEVICIUS, 2007)

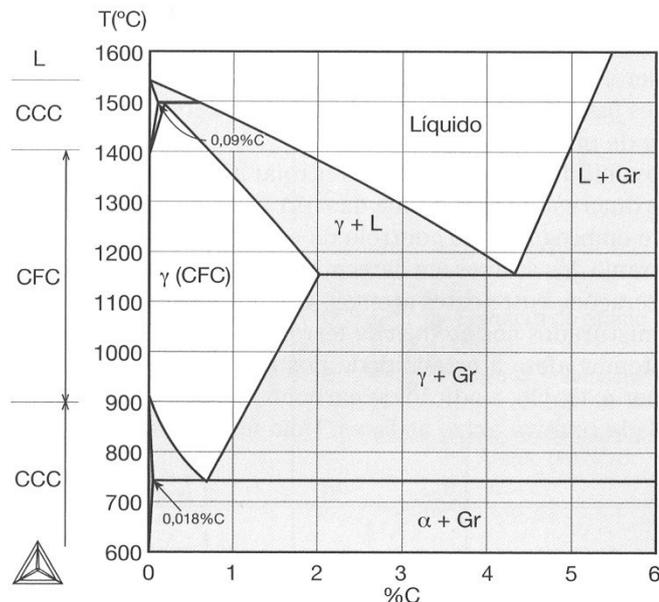


Figura 1 - Diagrama de equilíbrio de fases Fe-C. (COLPAERT, 2008).

Para maior entendimento destas alterações é necessário à abordagem de conceitos aplicados às transformações microestruturais que ocorrem nos aços ao longo das etapas destes tratamentos, sendo abordado com maior foco neste trabalho os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento.

Colpaert (2008) afirma que as temperaturas de transformação de fases entre ferrita, austenita e cementita, conforme o gráfico de fases da formação do aço apresentado na figura 1, são consideradas como temperaturas críticas no processo, e a maioria dos tratamentos convencionais envolve, em uma primeira etapa, a passagem do aço da temperatura ambiente para a fase austenítica.

### 3.3 Curvas TTT

As curvas TTT mostram as transformações no aço em relação à temperatura e tempo

a uma dada temperatura específica, conforme o resultado a ser obtido. Esta curva é traduzida através da combinação da taxa de nucleação e a velocidade de crescimento do grão, onde a composição química do material é de extrema importância.

“Se definirmos uma determinada porcentagem transformada como o ponto de início da transformação (por exemplo, 1%) e a fração de 99% transformada como o ‘fim’ da transformação, podemos transferir estas informações para uma curva que represente um mapa de tempo-temperatura e transformação, chamado curva TTT (COLPAERT 2008).”

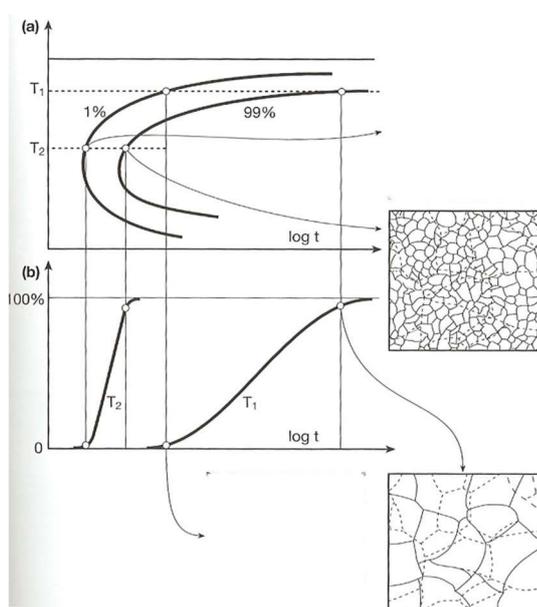


Figura 2 - Curva TTT para um aço de teor de carbono extra baixo. (COLPAERT, 2008)

A formação da ferrita e da perlita são processos difusionais, nos quais ocorrem nucleação e crescimento. Se uma amostra for resfriada bruscamente, a partir de 1000°C até uma temperatura abaixo de 727°C, haverá a formação da perlita. (COSTA e SILVA & MEI, 2010)

Segundo Costa e Silva & Mei (2010), ao se unir os tempos de início de transformação para as várias temperaturas, teremos uma curva em ‘C’, de início de formação da perlita. O mesmo ocorrendo quando se unem os tempos de fim de transformação. A curva obtida é chamada de TTT, ou seja, transformação isotérmica. (COSTA e SILVA & MEI, 2010)

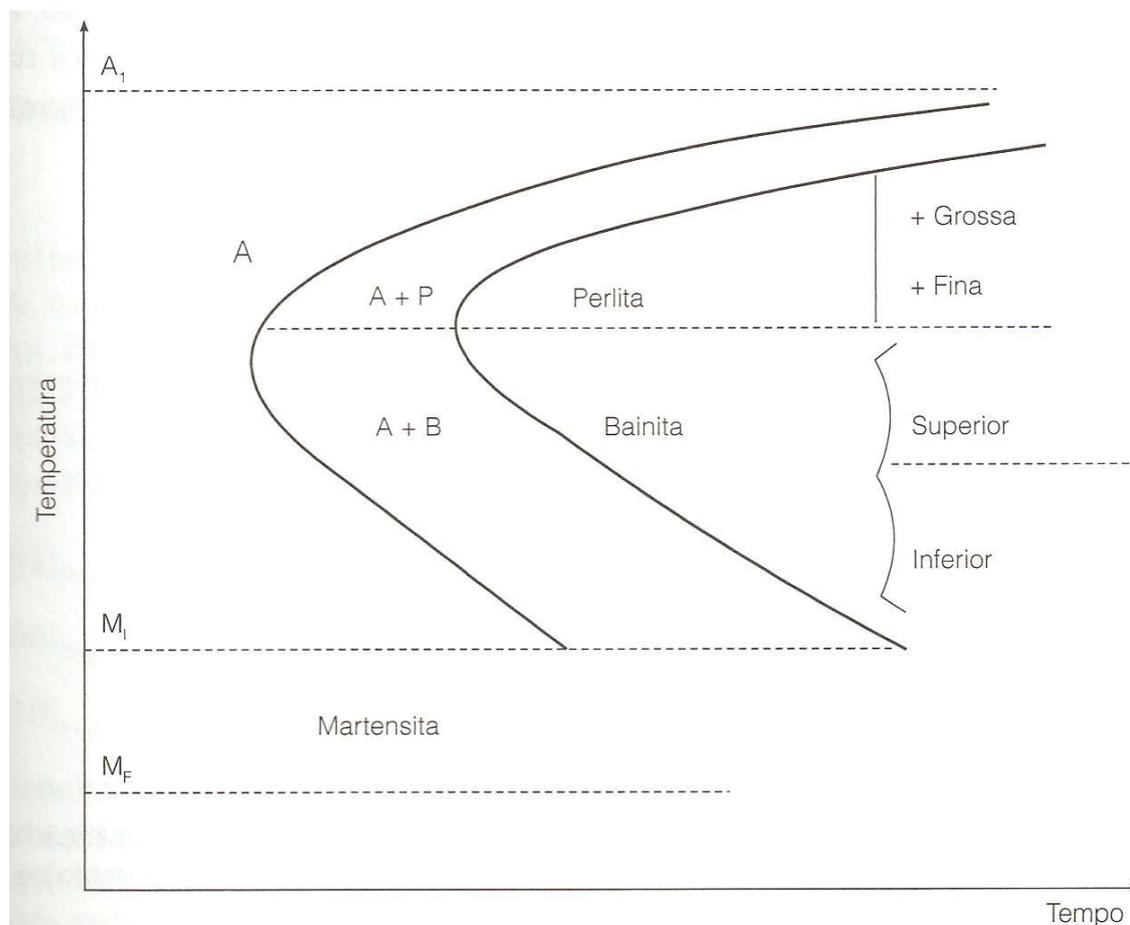


Figura 3 – Representação esquemática de uma curva TTT de um aço eutetóide. (COSTA e SILVA & MEI, 2010)

Costa e Silva & Mei (2010) afirmam que a martensita é uma fase metaestável que aparece após aplicação de um o resfriamento brusco da austenita com água, gerando uma transformação por cisalhamento da estrutura, sem ocorrer difusão.

O nome “transformação martensítica” é aplicado às reações no estado sólido que ocorrem por cisalhamento sem mudança na composição química (difusão) e que aparecem em vários sistemas, sendo o mais conhecido o ferro-carbono (COSTA e SILVA & MEI, 2010).

O processo da martensita consiste então, na redução brusca da temperatura do material, onde a formação desta fase metaestável ocorre apenas se a temperatura for inferior a  $M_i$  (temperatura de início de formação da martensita), isto porque, a formação da martensita, ocorre com deformações e esta deformação externa fornece energia para

facilitar tal transformação. Devido ao alto super-resfriamento requerido para iniciar a reação, e por ser uma transformação sem difusão, depois que esta se inicia, sua velocidade é extremamente alta, mesmo para baixas temperaturas. Daí conclui-se que o processo é atômico, não necessitando de ativação térmica dos átomos para ocorrer. (COSTA e SILVA & MEI, 2010)

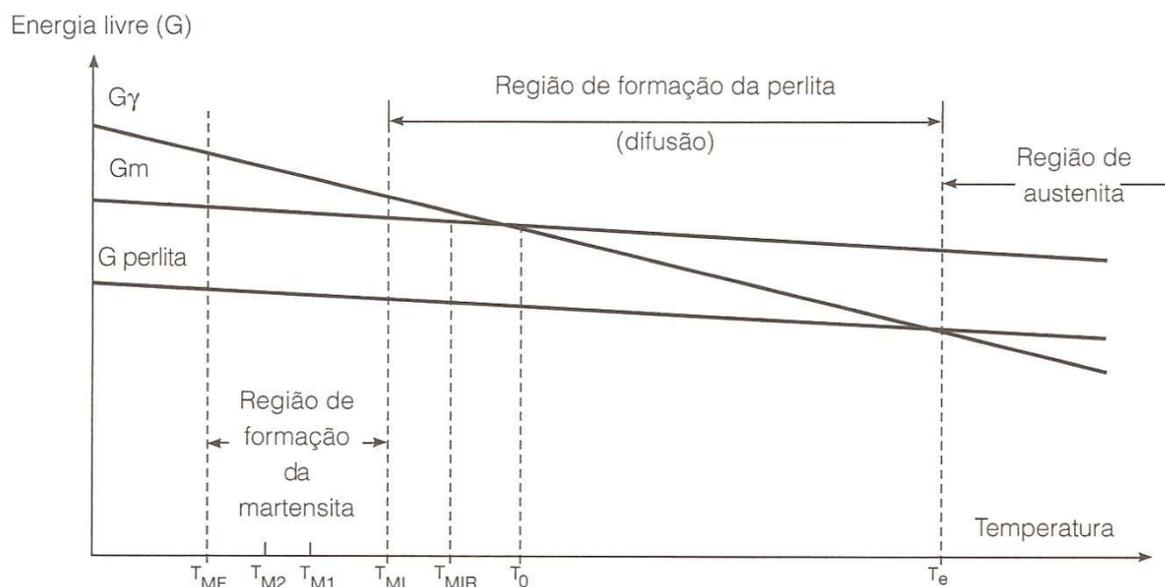


Figura 4 – Aspectos termodinâmicos de formação de martensita /  $M_i$ : temperatura de formação martensítica,  $M_F$ : temperatura de fim da formação martensítica. (COSTA e SILVA & MEI, 2010)

Segundo Costa e Silva & Mei (2010), o aumento do teor de carbono no aço diminuem as temperaturas de início ( $M_i$ ) e fim ( $M_F$ ) de formação de martensita. Assim, um aço resfriado bruscamente até temperatura ambiente apresentará, um teor de martensita formada e um saldo de austenita não transformada, chamada de austenita retida.

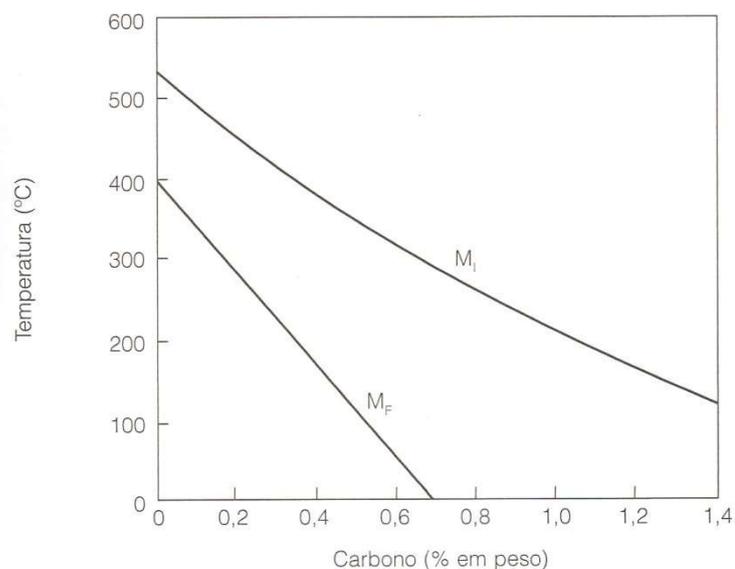


Figura 5 – Efeito do teor de carbono nas temperaturas de início (MI) e fim (MF) da transformação da austenita em martensita. (COSTA e SILVA & MEI, 2010)



Figura 6 – Aço 0,2 C – 1 Mn – 0,03 Nb, temperado em água. (COSTA e SILVA & MEI, 2010)

### 3.4 Têmpera

O tratamento térmico de têmpera visa, primordialmente, a formação de martensita no material, portanto, para esta formação o processo deste tratamento consiste basicamente em aquecer o material até a temperatura adequada para obtenção de microestrutura austenítica, manutenção desta temperatura para um tempo determinado e finalmente o resfriamento utilizando um meio que resulte na microestrutura desejada.

Segunda Costa e Silva & Mei (2010), uma das características mais importantes dos aços, como materiais de construção mecânica, é a possibilidade de desenvolver ótimas combinações de resistência e tenacidade e a estrutura que permite, de forma mais eficaz, relacionar estas é a martensita revenida.

O processo de têmpera é principalmente diferenciado do recozimento ou normalização devido à velocidade de resfriamento, que neste processo deve ser muito rápida.

A profundidade do endurecimento da têmpera está diretamente ligada à característica de temperabilidade do aço, no tamanho e forma da peça e principalmente na temperatura de austenitização e do meio de têmpera.

Deve-se ainda observar que o teor de carbono no aço influencia a temperatura para início da formação da martensita, onde o aumento deste teor reduz a temperatura (COSTA e SILVA & MEI, 2010). A têmpera do material leva este a uma modificação intensa de sua microestrutura, gerando aumento da dureza, resistência ao desgaste, resistência à tração, porém reduz sua ductilidade, aumentando as tensões internas no material.

Esta modificação gera tensões internas que podem ser classificadas em duas naturezas, tensões estruturais e tensões térmicas, sendo esta última relacionada ao resfriamento desigual ao longo da peça.

### **3.4.1 Temperabilidade**

Temperabilidade pode também ser considerada como a capacidade do aquecimento penetrar, ou seja, diz respeito a profundidade de penetração da têmpera no material.

Esta característica define a variação de dureza desde a superfície até o centro da peça depois de temperada, está associada à capacidade de um determinado aço formar martensita.

De acordo com Colpaert (2008) o tamanho de grão austenítico e a homogeneidade da microestrutura inicial, denominada austenítica, tem efeito sobre a temperabilidade do aço.

Outro aspecto relevante a temperabilidade do material e também relacionada à

composição química do aço é o impacto do carbono, que tem um forte efeito sobre a dureza martensítica, e outros elementos de liga que são adicionados ao aço que comumente retardam as transformações de decomposição da austenita.

### 3.4.2 Meios de têmpera e severidade

Meios de têmpera é o termo dado ao método com que o aço será resfriado após o aquecimento até a temperatura de austenitização. A escolha deste meio deve ser, por exemplo, relacionada ao estudo da geometria da peça, distorções toleradas após a têmpera e gradientes de redução da temperatura.

“Como orientação básica para a escolha do meio de têmpera, deve-se considerar que a água deve ser usada para peças de geometria simples, simétrica, em que alguma distorção pode ser tolerada (por exemplo, por meio de usinagem final pós-tratamento). Meios de resfriamentos menos drásticos, que promovam menores gradientes de temperatura nas peças, devem ser empregados quando a distorção e a possibilidade de trincas são fatores críticos (COLPAERT, 2008).”

Segundo Colpaert (2008) a escolha do meio de têmpera será importante então para determinação do processo de resfriamento a ser empregado, a fim de reduzir riscos com distorções, maior velocidade no resfriamento e assim obter a melhor microestrutura possível. De acordo com a Tabela 1, podem-se observar os meios mais comuns utilizados para têmpera e o fator de severidade (H) de cada meio. Na tabela 1 adotou-se o meio de resfriamento em água como referencial, ou seja,  $H = 1$ .

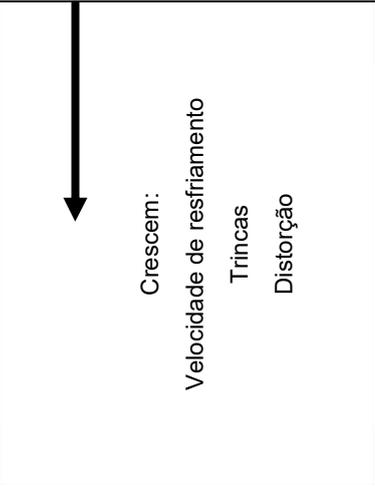
Meio de Têmpera	Severidade de têmpera (H)	
Óleo sem agitação	0,2	
Óleo moderadamente agitado	0,5	
Óleo violentamente agitado	0,7	
Água sem agitação	1,0	
Água fortemente agitada	1,5	
Salmoura sem agitação	2,0	
Salmoura fortemente agitada	5,0	

Tabela 1 - Severidade de têmpera de diferentes meios comparadas com a água (COLPAERT, 2008).

A escolha adequada do meio de tempera é também aplicado ao controle da taxa de resfriamento, onde cada meio possui uma diferente capacidade de extração de calor (severidade), sendo os mais comuns: água (pura ou com adição de sal), óleo e ar. (SILVA & MEI, 2010)

### 3.4.3 Água como meio de têmpera

Um dos métodos de resfriamento utilizado no tratamento térmico de têmpera é o jato de água em alta pressão. Este processo é aplicado em resfriamento de peças que necessitam de uma alta taxa de resfriamento, onde o alto impacto da água na superfície da peça reduz a temperatura até o centro desta.

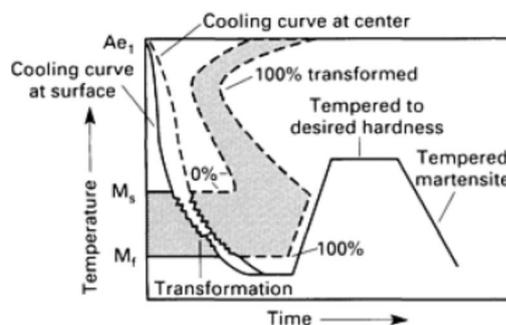


Figura 7 - Curva TTT – variação de têmpera na superfície e centro da peça. (COLPAERT, 2008)

A alta pressão aplicada no processo de resfriamento por spray de água é importante também para o controle da dureza obtida, após o resfriamento, ao longo da espessura da peça.

De acordo com Costa e Silva & Mei (2010) a utilização de meios líquidos para tempera, gera três estágios de resfriamento a proporção em que a peça atinge a temperatura ambiente, sendo estes estágios:

- a. Formação de um filme contínuo de vapor sobre a peça. A taxa de resfriamento   baixa, pois o filme de vapor atua como isolante térmico. A  gua apresenta um estágio de filme contínuo particularmente longo, onde para aliviar este, pode-se agitar a peça durante o início da têmpera para romper o filme de vapor;
- b. O filme de vapor colapsa e a taxa de resfriamento aumenta, com nucleação de bolhas de vapor sobre a superfície da peça. Neste estágio, também é importante a agitação do meio de têmpera para se evitar a permanência de bolhas sobre os mesmos locais por tempos longos, causando pontos resfriados lentamente, denominados de pontos moles.
- c. Este estágio começa quando a temperatura da superfície da peça fica abaixo do ponto de ebulição do meio de têmpera, interrompendo a formação de bolhas de vapor. O resfriamento ocorre por condução e convecção. Este estágio é controlado pela capacidade calorífera do meio de têmpera, pelas condições interfaciais entre a peça e o meio de têmpera e pela agitação.

### 3.4.4 Trincas de têmpera

Em função de aquecimentos seguidos de resfriamentos, surgem nos aços tensões relativas à heterogeneidade nas temperaturas das peças e de sua dilatação térmica. Para o resfriamento rápido de têmpera esta questão é agravada que segundo Colpaert (2008) pode ser a combinação de dois fatores:

- a. Maior heterogeneidade de temperatura associada ao resfriamento rápido, que cria gradientes de temperatura e assim geram gradientes de tensão relacionados a expansão térmica desiguais ao longo do material;
- b. A variação drástica do volume associada à transformação martensítica que ocorre à medida que as diferentes regiões da peça vão atingindo a temperatura  $M_s$ .

Costa e Silva & Mei (2010) afirmam que a severidade imposta ao material, durante o processo de têmpera, faz com que ocorra, neste processo, gradientes bastante acentuados entre o centro e a superfície. Para uma mesma peça, estes gradientes serão tanto maior quanto mais severo for o meio da têmpera e a presença destes gradientes de temperatura na peça a temperar geram tensões internas associadas à:

- a. Contração durante o resfriamento;
- b. Expansão associada com a transformação martensítica;
- c. Mudanças bruscas de secção e outros concentradores de tensões;

Dependendo das tensões resultantes da combinação dos esforços mencionados anteriormente, podem ocorrer no material uma deformação plástica (empeno), ruptura (trincas) e tensões residuais. (COSTA e SILVA & MEI, 2010)

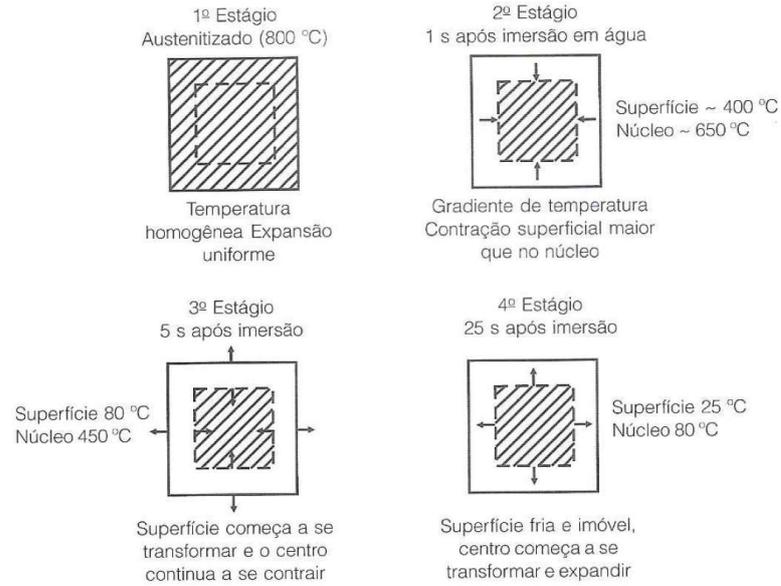


Figura 8 - Esquema do estado da tensão existente em um bloco de aço durante os estágios de têmpera em água. (COSTA e SILVA & MEI, 2010)

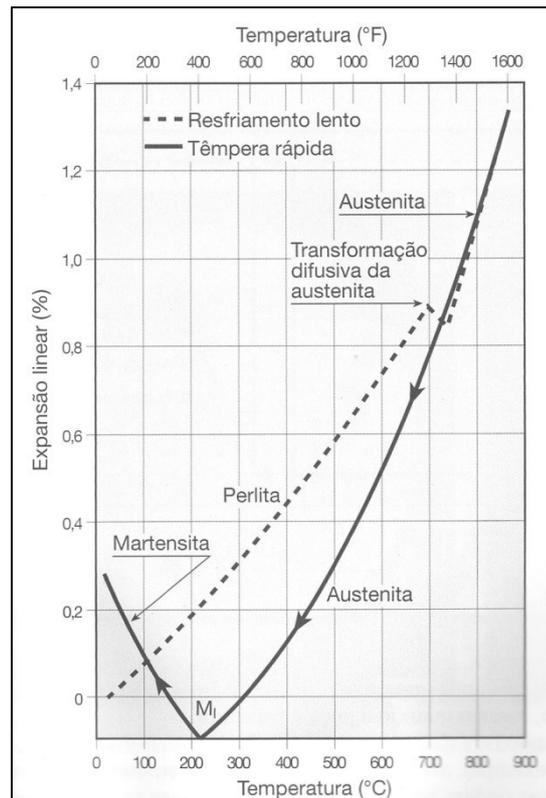


Figura 9 - Medidas dilatométricas da variação de comprimento (expansão linear) de aço resfriado lenta ou rapidamente. (COLPAERT, 2008)

Com a formação da martensita introduz um nível considerável de tensões no material

e estas podem originar trincas de têmpera caso medidas de prevenção não sejam consideradas durante o processo.

De acordo com Colpaert (2008) as trincas de têmpera são, normalmente, intergranulares, onde aços com maior tamanho de grão austenítico e menores temperaturas  $M_i$  tem maior probabilidade ocorrer deste tipo de trinca.

Entretanto, segundo Chiaverini (1986), os inconvenientes causados pelo tratamento térmico de têmpera tais como tensões internas, associada à excessiva dureza e quase total ausência de ductilidade no aço temperado podem ser corrigidas através de um tratamento térmico denominado revenimento.

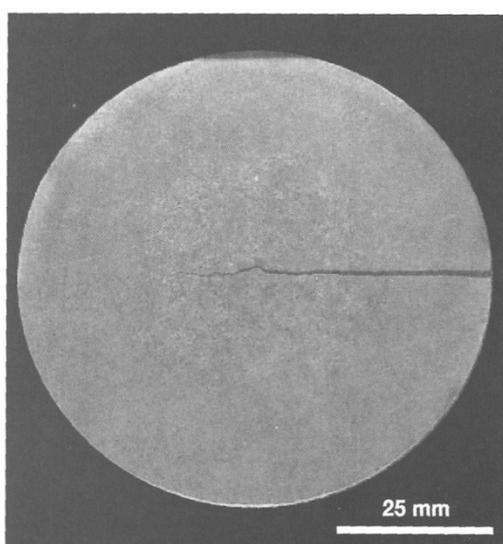


Figura 10 - Trinca originada por tensões de têmpera em barra cilíndrica de aço AISI 4340. (COLPAERT, 2008)

Colpaert (2008) afirma ainda que nem sempre o emprego de um meio de têmpera que gera um resfriamento rápido é a única causa do aparecimento de trincas, podem existir causas relacionadas a evidencias de descarbonetação na trinca indicando que não se trata de uma trinca de têmpera recente.

Além do controle de aspectos de aquecimento, caso o resfriamento não seja suficientemente uniforme ou homogêneo, as tensões podem ser concentradas nas áreas de menor circulação e assim causar trincas, conseqüentemente o aço terá microestrutura não

uniforme e dureza desiguais ao longo de sua espessura.

“Quando o resfriamento não é suficientemente uniforme, ocorrendo, por exemplo, áreas de fluido estagnado, ou com baixa circulação, as tensões podem ser também suficientes para causar trincas. Neste caso, a heterogeneidade de microestrutura e de dureza são sinais que podem indicar a causa do problema (COLPAERT, 2008).”

### **3.5 Revenimento**

Com as transformações da microestrutura do aço após o processo de têmpera, o material acumula altos níveis de tensões residuais e baixa ductilidade e tenacidade, estes fatores impedem que este seja utilizado na maioria das aplicações.

O tratamento térmico, então, responsável em produzir alterações estruturais que aliviem estas tensões recorrentes da têmpera é denominado revenimento ou também de revenido.

Segundo Chiaverini (1986) o revenimento é aplicado nos aços temperados, imediatamente após a têmpera, a temperaturas inferiores a zona crítica, resultando em modificação da estrutura obtida na têmpera.

Sendo assim, essas modificações garantem ao aço a possibilidade deste ser aplicado em diversas áreas, pois a ductilidade é melhorada ao mesmo tempo em que as tensões internas são aliviadas.

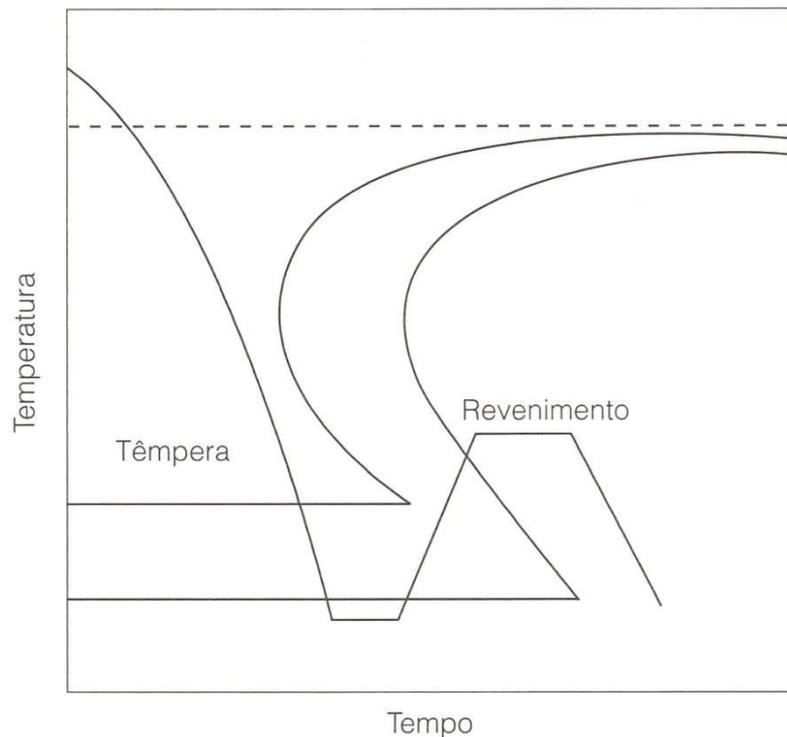


Figura 11 - Ciclo de têmpera + revenimento. (COSTA e SILVA & MEI, 2010)

### 3.5.1 Transformações no revenimento

A formação da martensita é o principal objetivo do processo de têmpera, porém esta é uma fase metaestável, o que gera a necessidade de um novo aquecimento abaixo da zona crítica. De acordo com Colpaert (2008), esta ação favorece a transformação em fases mais próximas do equilíbrio, até, eventualmente, atingir-se microestruturas compostas por ferrita e cementita.

As transformações obtidas através do processo de revenimento podem ser extremamente interessantes, devido ao fato de ser possível a obtenção de diversas propriedades mecânicas.

Em termos gerais, o processo de revenimento é utilizado para aumento da ductilidade e redução das tensões residuais internas, entretanto pode ser aplicado também na fabricação de aços ferramentas, onde a dureza no revenido do material é alta, isto se deve ao endurecimento por precipitação.

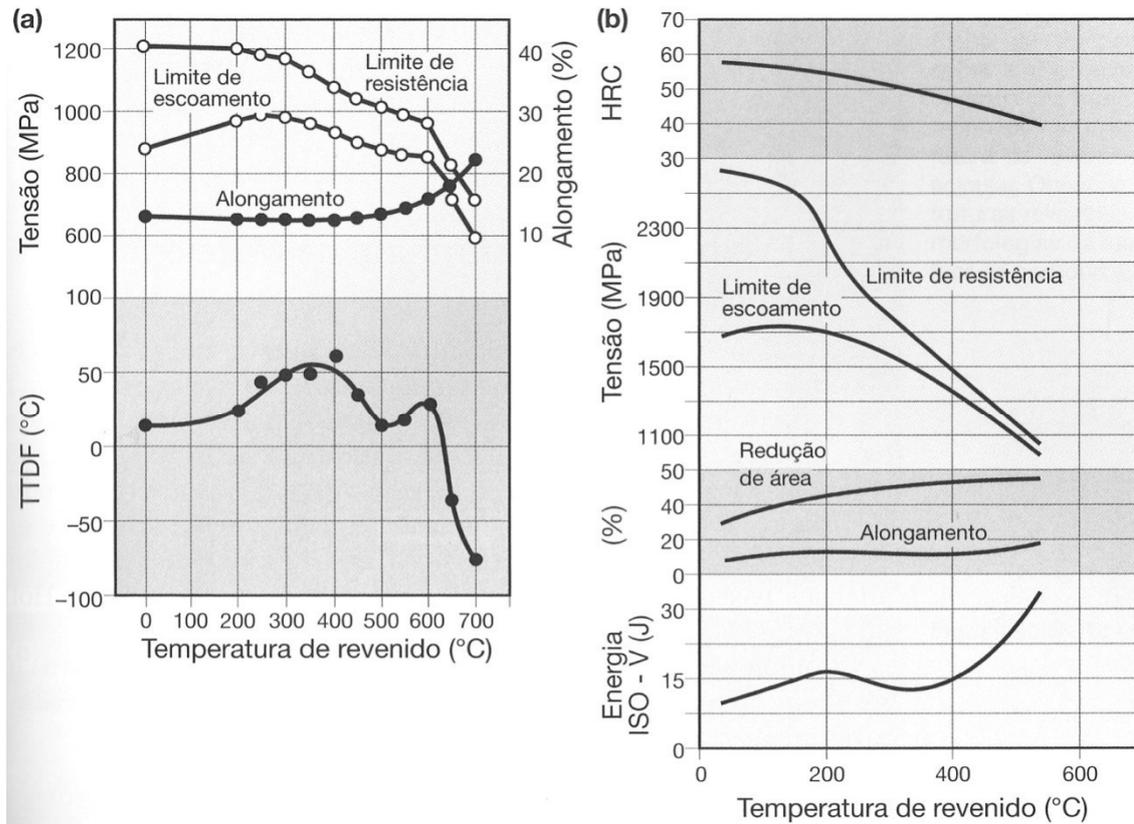


Figura 12 - (a) efeito do revenimento sobre as propriedades mecânicas de um aço. (b) efeito do revenimento sobre as propriedades mecânicas do aço AISI4340. (COLPAERT, 2008)

De acordo com Colpaert (2008) o processo de revenimento gera transformações na martensita formada no aço que podem ser sequenciadas da seguinte forma:

- A. Redistribuição dos átomos de carbono – até próximo de 100 °C;
- B. Precipitação de carbonetos – entre 100 e 300°C;
- C. A austenita retida em aços de médio e alto carbono se decompõe – entre 200 a 300°C;
- D. Inicia-se o processo de recuperação e recristalização da martensita (com eliminação de discordâncias) – a partir de 300°C;
- E. Para aços que contenham elementos de liga formadores de carbonetos, pode ocorrer a precipitação de carbonetos destes elementos – entre 500 e 650°C;

Ainda conforme Colpaert (2008), as etapas descritas podem não ser passivas de acompanhamentos detalhados.

### 3.5.2 Fragilização no revenimento

Existem diversos fenômenos de fragilização no revenimento, mas aqui serão destacados dois, o mais comum que ocorre em grande parte dos aços para construção mecânica, alguns aços especialmente desenvolvidos para a construção mecânica tem uma faixa de temperaturas evitadas a fim de eliminar o risco desta fragilização.

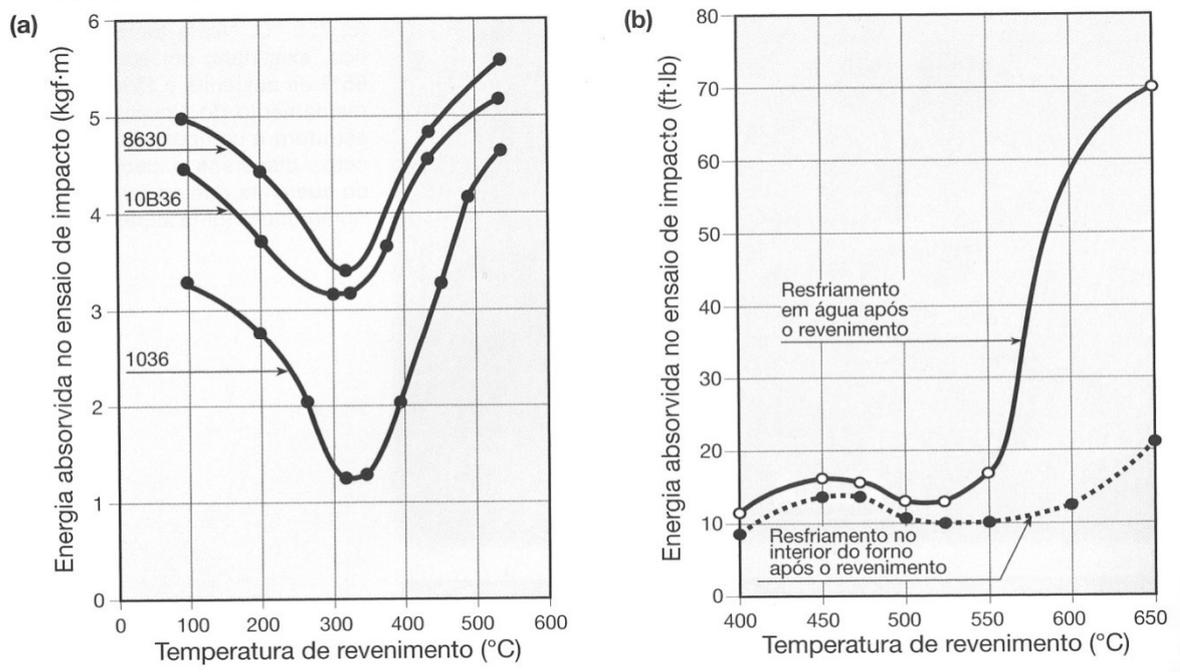


Figura 13 - Dois tipos de fragilização no revenimento (a) a forma mais comum observada num aço da construção mecânica. (b) fragilização observada em alguns aços como o empregado neste caso C: 0,35%, Ni: 3,44% e Cr: 1,05%. (COLPAERT, 2008)

Um segundo fenômeno importante de fragilização no revenimento é associado à permanência do material na temperatura em torno de 500 °C, para correção deste efeito o resfriamento deve ser rápido, para minimizar o tempo na faixa de temperaturas de fragilização.

## 4 TRATAMENTO TÉRMICO POR INDUÇÃO

O aquecimento por indução é considerado, muitas vezes, um dos mais efetivos processos de tratamento térmico, disponíveis para uma variedade de aplicações, incluindo: endurecimento da superfície, têmpera, revenimento, alívio de tensões (baixa temperatura), recozimento e normalização (alta temperatura), sinterização dentre outros. (TOTTEN, 2007)

Existem diversas maneiras de aquecer peças de metal, incluindo o uso de aquecedores por indução, fornos a gás, fornos de leito fluidizado, banhos de sal, aquecedores infravermelhos, fornos elétricos, e assim por diante. Cada método tem suas próprias vantagens. Não há, obviamente, um método universal que seja aplicado de melhor forma em todos os casos de aquecimento e tratamento térmico de metais. (RUDNEV, 2002)

Nas últimas três décadas o aquecimento por indução tornou-se mais popular. um dos principais motivos é a capacidade de criar alta intensidade de calor muito rapidamente em locais bem definidos na peça. Isto leva a baixo tempo de ciclo do processo (alta Produtividade), com qualidade reproduzível. (RUDNEV, 2002, p. 11)

Na maioria destas aplicações do aquecimento por indução, apresentadas anteriormente, este método pode ser utilizado para aquecer, seletivamente, apenas a parte que requer tratamento. Isto significa que o processo pode ser realizado em um tempo relativamente curto e com elevada eficiência, porque a energia é aplicada à peça única em que há alta produtividade, menor distorção, e um ambiente limpo. (TOTTEN, 2007)

O sistema de indução geralmente requer muito menos tempo de inicialização e desligamento e custo do trabalho mais baixo para operadores de máquinas. Outro fator importante de máquinas de aquecimento por indução inclui garantia de qualidade, capacidade de automação, alta confiabilidade e fácil manutenção do equipamento. Em muitos casos de aquecimento por indução exigirá espaço mínimo para instalação e produzem menos distorção na peça. (RUDNEV, 2002, p. 11)

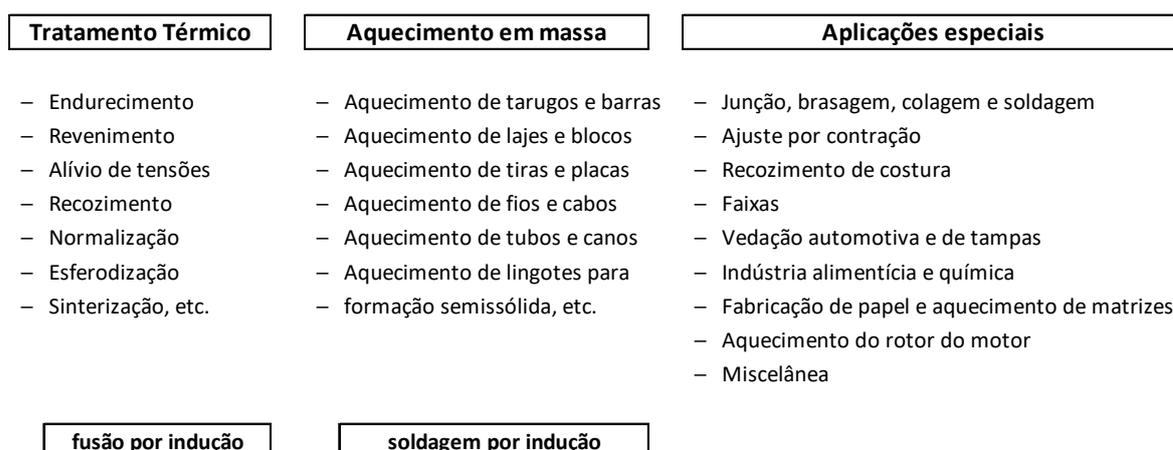


Figura 14 – Aplicações industriais para tratamento térmico por indução. (RUDNEV, 2002)

Qualquer material condutor de eletricidade pode ser aquecido por indução eletromagnética. A capacidade de aplicar energia em uma determinada parte específica de uma peça, por indução, e obter o tratamento térmico desejado depende de muitos fatores, onde alguns dos fatores mais importantes são: propriedades térmicas e eletromagnéticas do material, energia aplicada, a frequência selecionada, a taxa de aquecimento, o processo de resfriamento, a capacidade do material para responder a tratamento térmico, a forma construtiva da peça, do indutor e do design de têmpera. (TOTTEN, 2007)

#### 4.1 Teoria básica do aquecimento por indução

O princípio básico do fenômeno envolvido no aquecimento por indução eletromagnética é discutido em diversas áreas, onde uma tensão alternada aplicada a uma bobina indutora resultará em uma corrente alternada no circuito desta bobina. Esta corrente produzirá um campo magnético ao redor da peça e com a mesma frequência da corrente aplicada, entretanto em direção oposta à corrente da bobina. Esta corrente é gerada, pelo efeito do campo eletromagnético, apenas em materiais eletricamente condutivos que estejam dentro deste campo, onde o conceito da indução aplicada obedece ao Efeito Joule, regido pela lei descrita através da fórmula  $I^2 \times R$ . (RUDNEV, 2002)

Devido a esses fenômenos eletromagnéticos, a distribuição da corrente dentro do indutor e a peça não é uniforme. Este aquecimento não uniforme causa um aquecimento não uniforme na peça, podendo gerar algumas anomalias no tratamento, sendo algumas destas o efeito de camada, de proximidade e efeito anel. (TOTTEN, 2007)

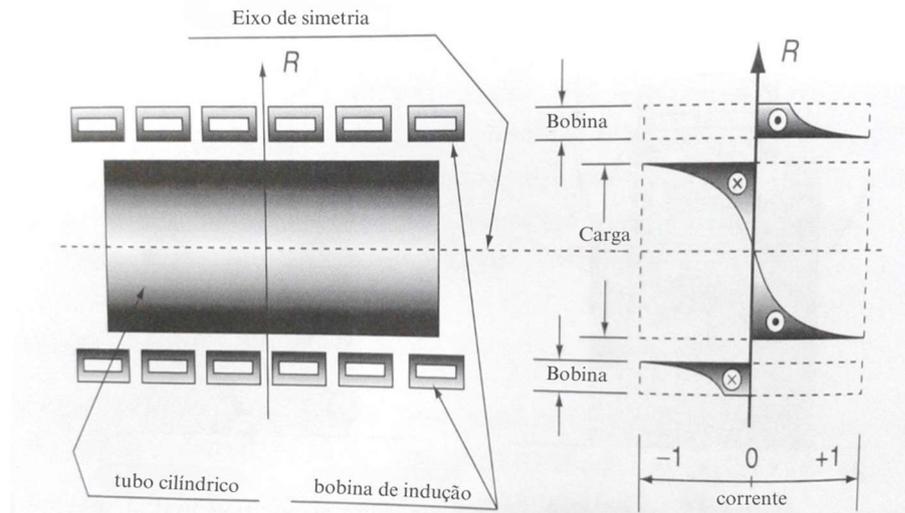


Figura 15—Distribuição da corrente entre a bobina e peça. (TOTTEN, 2007)

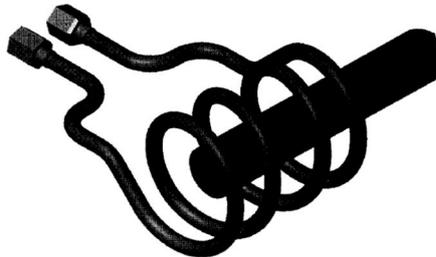


Figura 16 - Esquema de uma bobina indutora circular para aquecimento de tubos e barras. (RUDNEV, 2002)

## 4.1.1 Efeitos gerados no aquecimento por indução

### 4.1.1.1 Efeito de camada

Portanto, sendo assim, a corrente alternada não é uniforme dentro do indutor, nisto o máximo valor da densidade da corrente estará localizado, sempre na superfície do condutor e esta densidade reduzirá a partir da superfície externa até o centro da peça. Este fenômeno

da não uniformidade da distribuição da corrente dentro do indutor é chamado de Efeito de camada. (TOTTEN, 2007)

Em função deste efeito 86% da potência estará concentrada na camada superficial do condutor, onde a penetração da corrente na peça dependerá da frequência e das propriedades do material (resistividade elétrica e permeabilidade magnética). (RUDNEV, 2002)

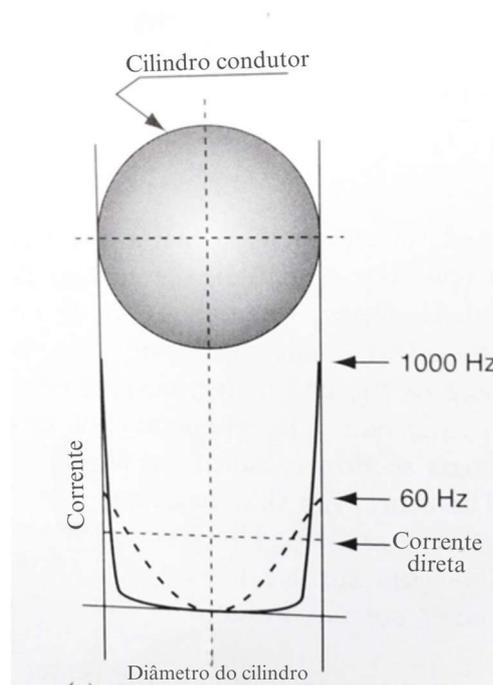


Figura 17 - Distribuição da corrente em função da frequência. (TOTTEN, 2007)

#### 4.1.1.2 Efeito das espiras

O efeito anel acontece quando um condutor, com seção retangular, é montado em forma de espiras, a corrente será redistribuída, onde as linhas de fluxo eletromagnético serão concentradas dentro desta espira e o fluxo na região externa será dissipada. (TOTTEN, 2007)

Como pode ser observado, o efeito anel leva a concentrar a corrente na superfície interna da bobina indutora. Este efeito é aplicável não apenas a um anel mas também a indutores com vários anéis. Entretanto este terceiro efeito é responsável pela distribuição do sistema de indução. (RUDNEV, 2002, pag. 122)

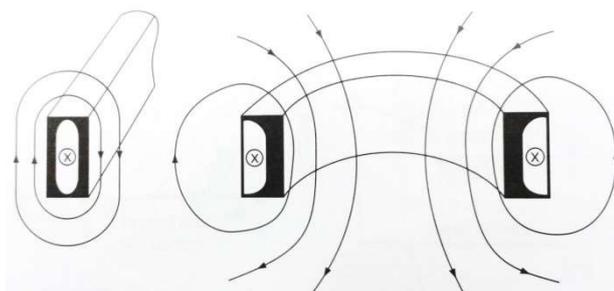


Figura 18– Efeito anel em condutores retangulares. (TOTTEN, 2007)

## 4.2 Tratamento térmico por indução de tubos

O tratamento térmico de tubos, utilizando o processo de aquecimento por indução eletromagnética, é um pouco diferente do aquecimento de corpos sólidos. Nas peças que possuem massa até o centro, é tido que a condução do aquecimento deve atingir o centro do corpo. Considerando um objeto oco, como o tubo, os parâmetros elétricos e térmicos, obrigatoriamente, utilizam diferentes limites de condições de fronteiras, ou seja, a partir do momento que a peça possui um diâmetro interno e externo, estas condições descrevem corretamente o ciclo do tratamento térmico ao longo da espessura, onde a partir do aquecimento da superfície externa é relativamente menor do que a penetração da corrente, dada pela frequência escolhida para o processo. Para os tratamentos de tubos, estes parâmetros elétricos são determinantes para a especificação do sistema de indução a ser utilizado. (RUDNEV, 2002)

Segundo Rudnev (2002) o uso extensivo de tubos em milhares de aplicações exige hoje, uma vasta variedade de conceitos de processos. O mercado de óleo e gás, com suas altas pressões requeridas, tem representado um considerável mercado para a aplicação do sistema de tratamento por indução de tubos e vem apresentando eficácia comprovada.

A eficiência do processo de aquecimento de tubos, com aplicação de indução eletromagnética, é uma função complexa de diversos parâmetros incluindo diâmetro interno da bobina indutora e diâmetro externo do tubo (espaço entre o tubo e o indutor), propriedades do material, comprimento da bobina, espessura do tubo e a frequência, sendo esta última a mais crítica.

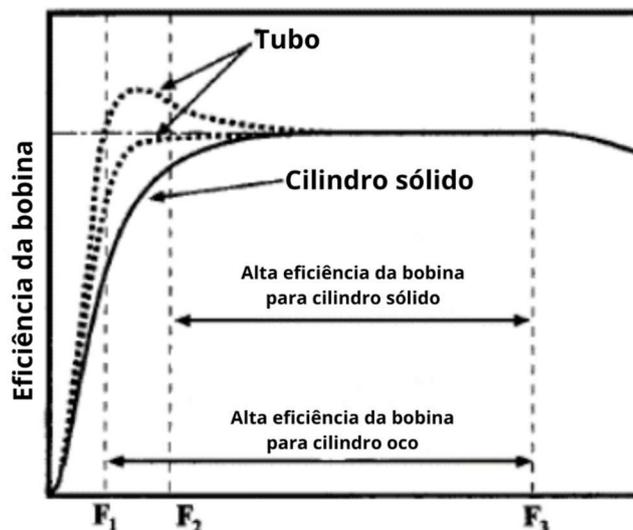


Figura 19 – Eficiência da bobina indutora em relação à frequência aplicada. (RUDNEV, 2002)

A gama de processos de tratamentos térmicos de tubos de aço é adaptada a uma linha de aquecimento por indução de tratamentos de têmpera e revenimento, ou seja, uma alimentação contínua de material através de múltiplas bobinas indutoras pode ser utilizadas para diversos tipos de tratamentos térmicos, tais como, normalização, recozimento, alívio de tensões e outros. (RUDNEV, 2002)

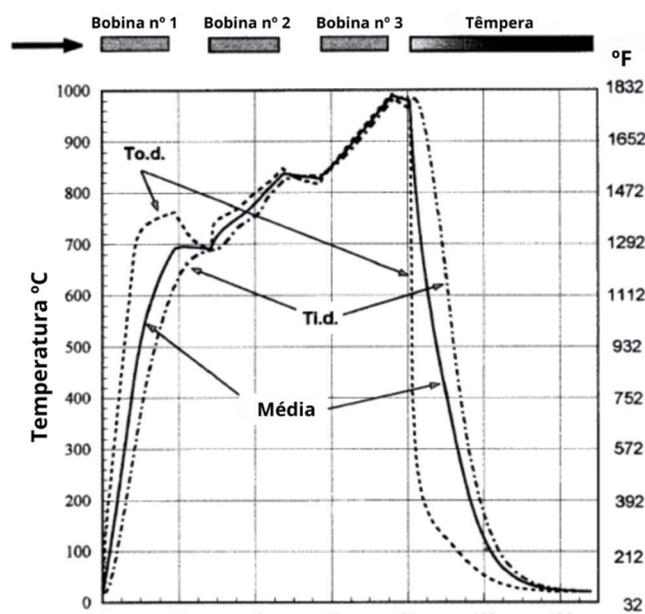


Figura 20 – Tratamento térmico de têmpera de um tubo de aço carbono de diâmetro externo: 127mm, espessura: 12,7mm, diâmetro interno: 101,6mm, produzindo a 3t/h, frequência: 3kHz, comprimento de bobina indutora: 0,4m e uma distancia entre bobinas de 0,2m. (Rudnev,2002)

A capacidade da indução eletromagnética em concentrar o aquecimento em uma determinada área do tubo é a principal razão para este método de tratamento ser aplicado a este tipo de produto. A máxima temperatura é observada logo abaixo do indutor no meio da zona de aquecimento. Como resultado da perda de calor por radiação e convecção, ocorrerá um resfriamento do diâmetro interno e externo a partir do centro dos indutores. Obviamente que a perda do diâmetro interno é menor em relação à perda ocorrida no diâmetro externo.

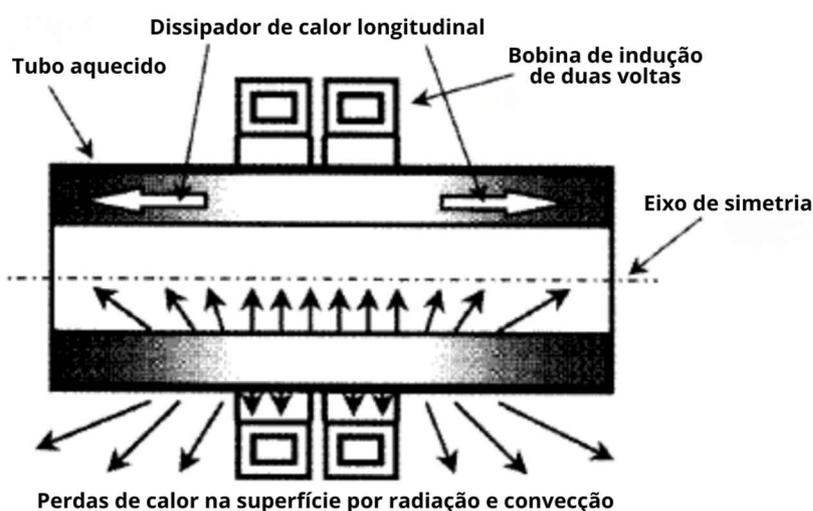


Figura 21 – Perda de calor por radiação e convecção ao longo do tubo durante aquecimento com uma bobina indutora de duas espiras. (TOTTEN, 2007)

Outra característica importante que afeta consideravelmente os parâmetros de potência necessária, desenho da bobina indutora e escolha da frequência é a existência de zona de transição e o efeito de resfriamento, devido à dissipação de calor longitudinal entre as extremidades frias do tubo.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados neste trabalho são tubos produzidos pela empresa Apolo Tubulars, sendo estes fabricados de acordo com a norma API5CT:2011. Esta norma é voltada à regulamentação de fabricação de tubos com ou sem costura para aplicação em processo de extração e prospecção de óleo e gás.



Figura 22 - Processo de tratamento térmico.

Estes tubos possuem comprimentos variáveis entre 9,75 e 12,0m, e espessuras entre 4,83 e 10,03mm. Com composição química típicas de aço SAE1025 com variação de carbono de 0,25 a 0,29%. Este aço é comprado na usina com denominação de aço T380, com típicas composições químicas apresentadas na Tabela 2.

O processo de tratamento térmico, utilizado pela empresa, consiste em cinco etapas de aquecimento, onde três destas são aplicadas para têmpera e duas para revenimento, obedecendo uma ordem sequencial, ou seja, etapas 01, 02 e 03 para têmpera e etapas 04 e 05 para revenimento.

Material	C	Mn	P <sub>(MAX)</sub>	S <sub>(MAX)</sub>	Al
T380	0,24 – 0,28	1,25 – 1,45	0,025	0,010	0,015 – 0,050

Tabela 2 – Tabela da composição química, em percentual (%), típica para material utilizado nos tubos tratados termicamente

O aço utilizado para a formação de tubos e tratamento térmico é especificado com foco nos processos de têmpera e revenimento da empresa, devido ao teor de carbono, molibdênio e boro, presentes neste.

## 5.1 Confeção de corpos de prova

Os corpos de prova devem ser confeccionados de acordo com o especificado na norma API5CT para cada tipo de ensaio a ser realizado.

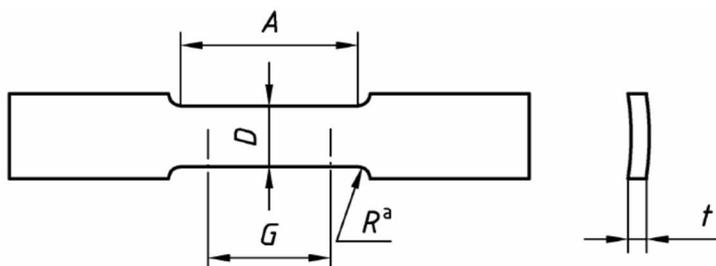


Figura 23 – Desenho esquemático do corpo de prova para ensaios de tração. (NORMA API5CT:2011)

Dimensão	Amostra de tira mm (pol)	Amostra de barra redonda mm (pol)	
		D = 12,7 (0.500)	D = 8,9 (0.350)
Comprimento do calibre, G	50,8 ±0.13 (2000 ±0.005)	50,8 ±0.13 (2000 ±0.005)	35,6 ±0.13 (1400 ±0.005)
Diâmetro ou largura, D	38,1 (1.500) aprox.	12,7 ±0.25 (0.500 ±0.010)	8,9 ±0.18 (0.350 ±0.007)
Raio do filete min., R	25,4 (1.000)	9,5 (0.375)	6.4 (0.250)
Comprimento da seção reduzida, min., A	57,2 (2.250)	57,2 (2.250)	44,5 (1.750)

Figura 24 - Dimensões do corpo de prova para ensaiados de tração referentes. (NORMA API5CT:2011)

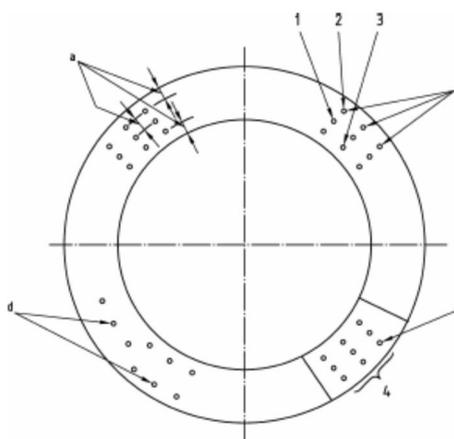


Figura 25 – Desenho esquemático de amostra para ensaio de dureza e localização dos pontos a serem ensaiados ao longo da espessura do tubo. (NORMA API5CT:2011)

## 5.2 Caracterizações mecânicas

Para caracterização mecânica foram utilizados diversos ensaios mecânicos em laboratório para definição das propriedades mecânicas dos tubos, após o tratamento térmico de têmpera e revenimento.

Os ensaios foram realizados em amostras retiradas dos tubos através de cortes realizados em materiais temperados e revenidos, utilizando serra tipo fita com refrigeração. Este procedimento de corte foi adotado para evitar alterações da estrutura em função de potencial aquecimento da seção do tubo durante o corte, caso fosse utilizados

equipamentos que utilizem discos de corte ou sem utilização de adequada refrigeração.

Os equipamentos utilizados para realização dos testes pertencem à empresa e os ensaios estão de acordo com as especificações da norma API5CT:2011.

### 5.2.1 Ensaios de dureza

Como descrito previamente, toda a metodologia de ensaios e limites para aprovação destes estão de acordo com a norma API5CT:2011.

Conforme apresentado na Figura 26, a norma considerada não estipula limites para os resultados nos ensaios de dureza, ou seja, não há limites máximos de dureza para tubos no grau N80, objeto de estudo neste trabalho.

Grupo	Grau	Tipo	Alongamento total sob carga %	Limite de escoamento Mpa		Resistência à tração min. MPa	Dureza max.		Espessura de parede especificada mm	Variação de dureza permitida HRC
				min	max		HRC	HBW		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	H40	-	0,5	276	552	414	-	-	-	-
	J55	-	0,5	379	552	517	-	-	-	-
	K55	-	0,5	379	552	655	-	-	-	-
	N80	1	0,5	552	758	689	-	-	-	-
	N80	Q	0,5	552	758	689	-	-	-	-

Figura 26 – Limite de dureza e tensão para tubos tratados termicamente no Grau N80. (NORMA API5CT:2011)

A norma API5CT:2011, estipula na observação “a”, na tabela apresentada na página 98 desta mesma norma, deverá ser utilizada os resultados de ensaios de dureza em Rockwell C.

Apesar da norma não definir os limites de dureza no grau N80, a empresa padronizou que os resultados de dureza, tanto para os processos de têmpera quanto para revenimento, não devem ultrapassar 5 pontos entre o mínimo e o máximo. Isto para garantir homogeneidade e estabilidade nos processos.

## 5.2.2 Ensaio de tração

Os ensaios de tração, assim como os ensaios de dureza, seguem as especificações descritas na norma API5CT:2011, onde as informações da tabela apresentada na norma podem ser discutidas durante o procedimento de venda do produto, a ser tratada entre o cliente e o fornecedor. Como estipulado pela norma, os limites de escoamento e resistência estão apresentados na Tabela 3.

<b>Ensaio</b>	<b>Resultado [MPa]</b>
Limite de Escoamento	552 – 758
Limite de Resistência [mínimo]	689

Tabela 3 – Limites de escoamento e resistência para ensaios de tração de acordo com a norma API5CT:2011.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Composição química

A composição química analisada em laboratório da empresa apresentou os valores apresentados na Tabela 4.

Material	C	Mn	P <sub>(MAX)</sub>	S <sub>(MAX)</sub>	Al
T380	0,26	1,30	0,023	0,010	0,030

Tabela 4 – Resultado do ensaio de composição química do aço utilizado nos testes de tratamento térmico.

Comparando os resultados obtidos com as composições químicas, típica deste aço comprado e informado pela usina, conclui-se que são compatíveis com os teores apresentados. Assim sendo o material utilizado para formação e tratamento térmico de têmpera e revenimento dos tubos foram fabricados conforme especificação do Aço T380.

### 6.2 Tratamento térmico

Foram realizados três processos de tratamento térmico para o mesmo material especificado a seguir.

Nestes processos, os parâmetros de tratamento térmicos especificados e aplicados ao forno de tratamento térmico estão apresentados nas tabelas no início de cada sessão que descrevem os testes. Sendo estes parâmetros divididos em ajustes de operação que envolve: definição da velocidade, apontamento da temperatura da água de resfriamento, sendo esta temperatura não ajustável, e as pressões de aplicação do volume de água utilizado na têmpera, e os parâmetros de aquecimento que envolvem os ajustes elétricos dos indutores instalados na têmpera e no revenimento, estes são potência, tensão, corrente e frequência.

Previamente a realização dos testes, se faz necessário especificar o material a ser

utilizado, pois esta etapa influencia diretamente os parâmetros a serem utilizados, conforme demonstrado neste trabalho.

Produto	Dimensões [mm]			Grau do aço (após tratamento térmico)
	Diâmetro externo	Espessura	Comprimento	
Tubing 2 7/8"	73,02	5,51	9750	N80Q

Tabela 5 – Especificação técnica dos tubos utilizados nos processos de tratamento térmico de têmpera e revenimento.

O grau do aço mostrado na Tabela 5 é especificado pela norma API5CT:2011, sendo este uma opção de tratamento térmico onde a aprovação de sua homologação está referenciada aos resultados de dureza para amostras de têmpera e revenimento e resultados de tração em amostras de revenimento.

## 6.2.1 Primeiro teste

### 6.2.1.1 Parâmetros

Pressão 1º Estágio de resfriamento	18 PSI		Temperatura da água na entrada do resfriamento	22 °C
Pressão no 2º Estágio de resfriamento	18 PSI		Velocidade de produção	18 m/min

Tabela 6 – Primeiro Teste: Parâmetros de ajuste do resfriamento e velocidade da linha.

Estágio de aquecimento	1º	2º	3º	4º	5º
Temperatura [°C]	680	785	850	695	725
Potência [kW]	810	575	434	1536	145
Tensão [V]	364	843	749	1048	255
Corrente [A]	1401	770	707	1875	678
Frequência [Hz]	459	750	385	228	436

Tabela 7 – Primeiro Teste: Parâmetros de ajuste nos estágios de aquecimento.

### 6.2.1.2 Resultados

Quadrante	1°			2°			3°			4°		
	Interno	Centro	Externo									
Dureza [HRC]	51	46	44	47	40	42	36	36	41	47	45	44

Tabela 8 – Primeiro Teste: Resultado de dureza em amostra de têmpera.

Quadrante	1°			2°			3°			4°		
	Interno	Centro	Externo									
Dureza [HRC]	26	26	25	26	25	26	25	24	25	25	26	25

Tabela 9 - Primeiro Teste: Resultado de dureza em amostra de revenimento.

Quadrante	1°	2°	3°	4°
Limite de escoamento [MPa]	711	681	695	712
Limite de resistência [Mpa]	757	750	749	762

Tabela 10 - Primeiro Teste: Resultado de tração em amostra de revenimento.

### 6.2.1.3 Discussão dos resultados

Com base nos resultados apresentados, conclui-se que este teste não foi aprovado devido à alta variação nos resultados de dureza, onde na têmpera houve variações entre 36 e 51 HRc.

Os demais resultados estiveram dentro do especificado pela norma.

Dureza na Têmpera [HRc]	Dureza no Revenimento [HRc]	Limite de escoamento [MPa]	Limite de resistência [MPa]
Reprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado

Tabela 11 – Resumo dos resultados do Primeiro Teste.

## 6.2.2 Segundo teste

### 6.2.2.1 Parâmetros

<b>Pressão 1º Estágio de resfriamento</b>	13 PSI		<b>Temperatura da água na entrada do resfriamento</b>	21°C
<b>Pressão no 2º Estágio de resfriamento</b>	13 PSI		<b>Velocidade de produção</b>	18 m/min

Tabela 12 – Segundo Teste: Parâmetros de ajuste do resfriamento e velocidade da linha.

<b>Estágio de aquecimento</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>	<b>4º</b>	<b>5º</b>
<b>Temperatura [°C]</b>	680	785	855	670	700
<b>Potência [kW]</b>	808	563	442	1463	130
<b>Tensão [V]</b>	370	827	730	975	278
<b>Corrente [A]</b>	1314	791	707	1685	625
<b>Frequência [Hz]</b>	459	451	385	227	478

Tabela 13 – Segundo Teste: Parâmetros de ajuste nos estágios de aquecimento.

### 6.2.2.2 Resultados

<b>Quadrante</b>	<b>1º</b>			<b>2º</b>			<b>3º</b>			<b>4º</b>		
<b>Posição</b>	Interno	Centro	Externo									
<b>Dureza [HRC]</b>	42	39	43	33	36	39	38	37	43	44	43	42

Tabela 14 – Segundo Teste: Resultado de dureza em amostra de têmpera.

<b>Quadrante</b>	<b>1º</b>			<b>2º</b>			<b>3º</b>			<b>4º</b>		
<b>Posição</b>	Interno	Centro	Externo									
<b>Dureza [HRC]</b>	24	23	25	26	26	26	26	26	26	24	24	24

Tabela 15 – Segundo Teste: Resultado de dureza em amostra de revenimento.

Quadrante	1°	2°	3°	4°
Limite de escoamento [MPa]	743	734	740	755
Limite de resistência [Mpa]	791	786	785	798

Tabela 16 - Segundo Teste: Resultado de tração em amostra de revenimento.

### 6.2.2.3 Discussão dos resultados

Com base nos resultados apresentados, conclui-se que este teste não foi aprovado devido à alta variação nos resultados de dureza, onde na têmpera houve variações entre 33 e 44HRc. Além desta variação, o resultado de tração para limite de escoamento apresentou um valor de 755 MPa, no quarto quadrante, sendo este um valor muito próximo ao limite estipulado por norma, de 758 MPa.

Os demais resultados estiveram dentro do especificado pela norma.

Dureza na Têmpera [HRc]	Dureza no Revenimento [HRc]	Limite de escoamento [MPa]	Limite de resistência [MPa]
Reprovado	Aprovado	Reprovado	Aprovado

Tabela 17 – Resumo dos resultados do 2º Teste.

## 6.2.3 Terceiro teste

### 6.2.3.1 Parâmetros

Pressão 1º Estágio de resfriamento	20 PSI	Temperatura da água na entrada do resfriamento	21 °C
Pressão no 2º Estágio de resfriamento	20 PSI	Velocidade de produção	18 m/min

Tabela 18 – Terceiro Teste: Parâmetros de ajuste do resfriamento e velocidade da linha.

Estágio de aquecimento	1°	2°	3°	4°	5°
Temperatura [°C]	710	780	835	685	740
Potência [kW]	772	455	336	1392	20
Tensão [V]	560	840	622	570	310
Corrente [A]	1000	580	415	1250	660
Frequência [Hz]	457	453	383	222	429

Tabela 19 – Terceiro Teste: Parâmetros de ajuste nos estágios de aquecimento.

### 6.2.3.2 Resultados

Quadrante	1°			2°			3°			4°		
	Interno	Centro	Externo									
Dureza [HRC]	52	51	51	51	50	50	51	50	50	51	51	50

Tabela 20 – Terceiro Teste: Resultado de dureza em amostra de têmpera.

Quadrante	1°			2°			3°			4°		
	Interno	Centro	Externo									
Dureza [HRC]	23	23	23	23	23	22	23	23	22	23	22	23

Tabela 21 - Terceiro Teste: Resultado de dureza em amostra de revenimento.

Quadrante	1°	2°	3°	4°
Limite de escoamento [MPa]	731	727	729	753
Limite de resistência [Mpa]	785	797	790	801

Tabela 22 - Terceiro Teste: Resultado de tração em amostra de revenimento.

### 6.2.3.3 Discussão dos resultados

Com base nos resultados apresentados, conclui-se que este teste foi aprovado devido a todos os resultados estarem dentro dos limites especificados por padrões da empresa e pela norma API5CT:2011.

Os demais resultados estiveram dentro do especificado pela norma.

<b>Dureza na Têmpera [HRc]</b>	<b>Dureza no Revenimento [HRc]</b>	<b>Limite de escoamento [MPa]</b>	<b>Limite de resistência [MPa]</b>
Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado

Tabela 23 – Resumo dos resultados do 3º Teste.

## 7 CONCLUSÃO

Conclui-se que então, a partir da revisão bibliográfica que o efeito de parâmetros elétricos tais como, potência, tensão, corrente e frequência, bem como ajustes realizados no resfriamento, ou seja, alterando pressão da água utilizada para temperar os tubos, é possível alterar os resultados obtidos para os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, através do processo de aquecimento por indução eletromagnética.

Nos testes realizados, para se alcançar o resultado aprovado, foram alteradas as temperaturas na região da têmpera e também no revenimento.

<b>Estágio de aquecimento</b>	<b>1°</b>	<b>2°</b>	<b>3°</b>	<b>4°</b>	<b>5°</b>
<b>Temperatura no 1° Teste [°C]</b>	680	785	850	695	725
<b>Temperatura no 2° Teste</b>	680	785	855	670	700
<b>Temperatura no 3° Teste</b>	710	780	835	685	740

Tabela 24 – Resumo dos parâmetros de temperatura nos três testes realizados.

Foi utilizada, no terceiro teste, uma variação de temperatura menor entre os estágios de aquecimento, favorecendo assim os parâmetros de aquecimento, sendo estes a potência, tensão e corrente.

Em relação aos parâmetros de resfriamento, estes foram responsáveis por estabilizar e homogeneizar a dureza ao longo da espessura do tubo.

<b>Estágio de resfriamento</b>	<b>1°</b>	<b>2°</b>
<b>Pressão da água no 1° Teste [PSI]</b>	18	18
<b>Pressão da água no 2° Teste [PSI]</b>	13	13
<b>Pressão da água no 3° Teste [PSI]</b>	20	20

Tabela 25 – Resumo dos parâmetros de pressão de água no resfriamento nos três testes realizados

A maior pressão nos estágios de resfriamento garantiu uma maior troca de calor com o material ao longo da espessura, favorecendo a homogeneização da dureza do tubo temperado.

Portanto, como objetivo deste trabalho, pode-se observar que para um adequado controle de parâmetros, no processo de têmpera e revenimento, deve ser medido e acompanhado ao longo de todo o período produtivo, os parâmetros de potência, tensão, corrente, frequência e também pressão de água no resfriamento. Onde, dependendo da velocidade de produção, este acompanhamento pode chegar a ser horário, devido ao volume de produto produzido por hora.

## 8 REFERÊNCIAS

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica** vol.II 2ª Edição, São Paulo Ed. McGraw-Hill,1986.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns** 4º Edição, São Paulo Ed. BLUCHER, 2008.

COSTA e SILVA, A. L. V., & MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais** 3ª Edição, São Paulo, Ed. Blucher, 2010.

RUDNEV, V.; LOVELESS, D.; COOK, R. L.; BLACK. M. **Handbook of induction heating** 1ª Edição, São Paulo Ed. CRC Press 2002.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos** 5ª Edição, São Paulo Ed. Blucher, 1982.

TOTTEN, G. E. **Steel heat treatment equipment and process design**. 2ª Edição, Oregon, Ed. CRC Press, 2007.

VASKEVICIUS, M. **Descobrimos os tratamentos térmicos e termoquímicos**. 1ª Edição, São Paulo, Ed. Komedi, 2007.