

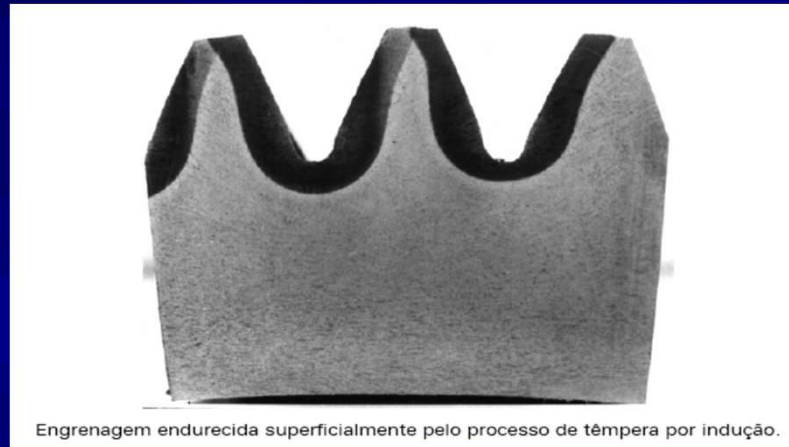
Têmpera Superficial

Engenharia e Ciência dos Materiais I

Profa.Dra. Lauralice Canale

Endurecimento Superficial

- Os processos de endurecimento superficial visam o aumento de dureza (ou outras propriedades mecânicas) de uma região específica de um componente.



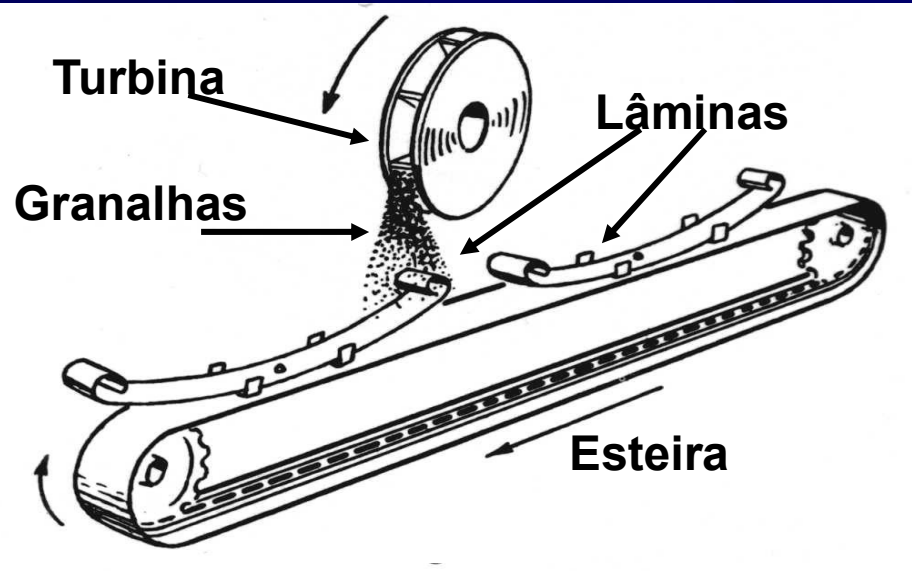
Engrenagem endurecida superficialmente pelo processo de têmpera por indução.

- Normalmente, tal região sofrerá algum tipo de solicitação localizada. A solicitação mais comum é o desgaste abrasivo e, assim, torna-se importante um aumento de resistência ao desgaste da região por meio de um endurecimento localizado, conservando as características originais do núcleo do componente

Métodos de Endurecimento Superficial

- Encruamento por conformação mecânica a frio (“shot peening” ou “roletagem”);
- Têmpera superficial
- Tratamentos termoquímicos (cementação, nitretação, carbonitretação etc.)
- Tratamentos de eletrodeposição ou aspensão térmica (aplicação de “cromo duro”, revestimentos cerâmicos e etc.)

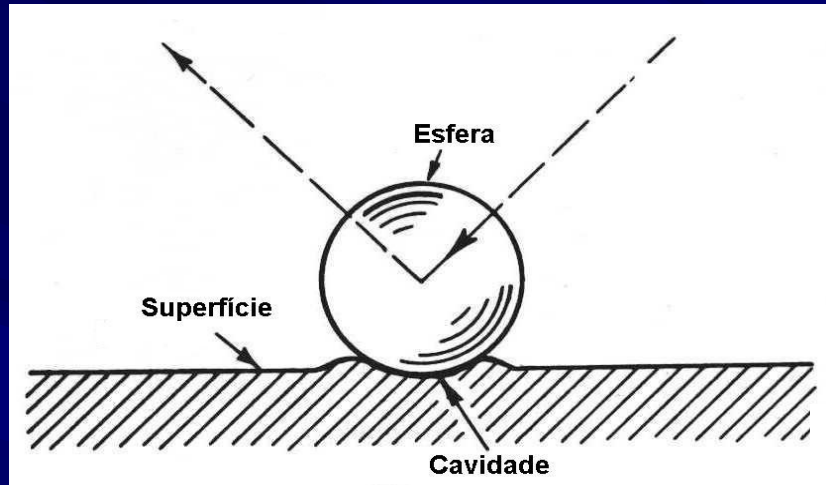
“shot peening”



**Esquema da
realização do
jateamento por
granalhas – Feixe
molas carro
(lamina)**

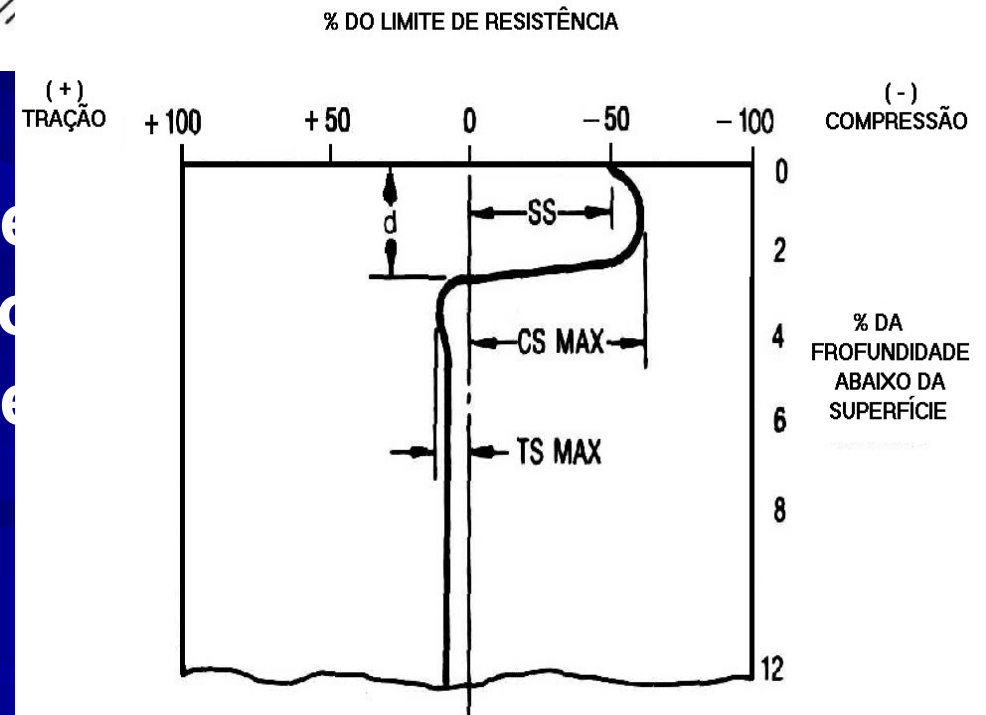


“shot peening”



Formação da cavidade devido ao impacto da esfera no jateamento

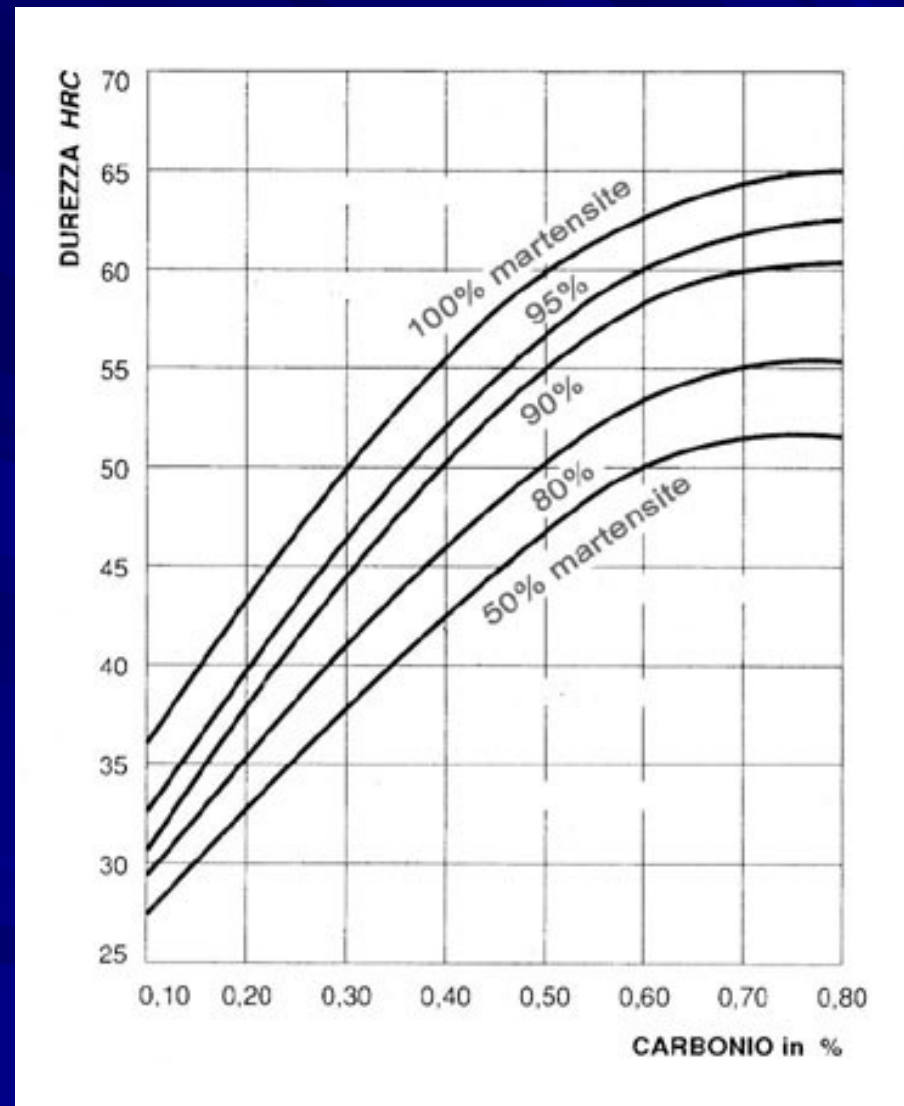
Exemplo do perfil de tensão residual criado pelo processo de jateamento



Têmpera Superficial

- A têmpera superficial produz regiões endurecidas na superfície do componente (de microestrutura martensítica) de elevada dureza e resistência ao desgaste, sem alterar a microestrutura do núcleo.

Durezza da Martensita



Vantagens da Têmpera Superficial

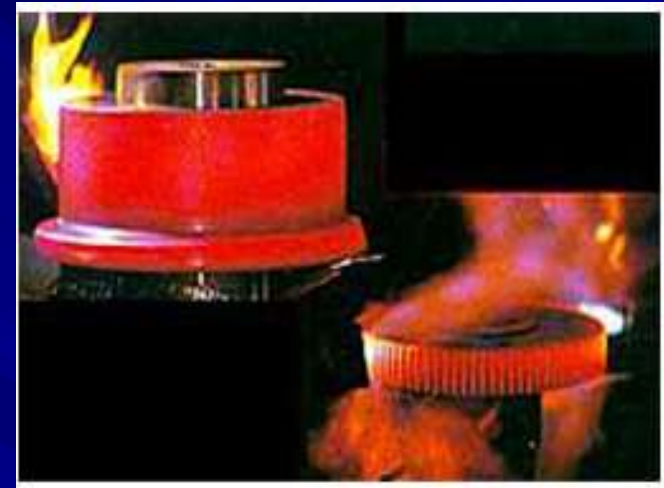
- Aplica-se à peças de grandes dimensões (engrenagens de 2-3 m)
- Permite o endurecimento em áreas localizadas
- Pode ser usado quando a geometria da peça ocasionar grandes deformações
- Permite obter a combinação de altas resistências ao desgaste e dureza na superfície, com ductilidade e tenacidade no núcleo da peça
- Não exige fornos de aquecimento
- É rápida (pode ser aplicada na oficina)
- Não produz grandes oxidações e descarbonetações no aço.

Processos Usuais de Têmpera Superficial

- Por Chama
- Por Indução
- Por Laser
- Por Feixe eletrônico

Têmpera por chama

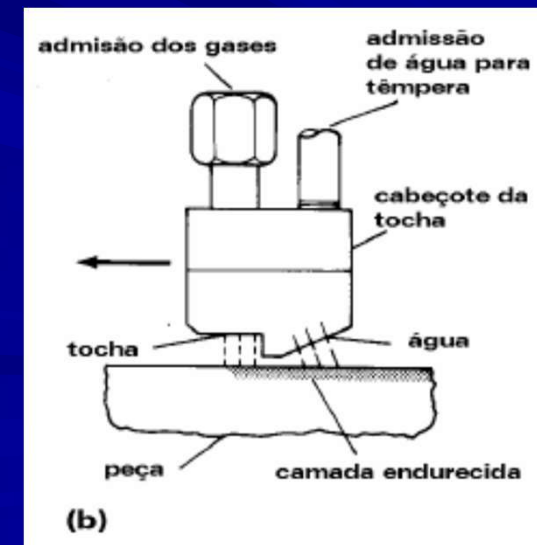
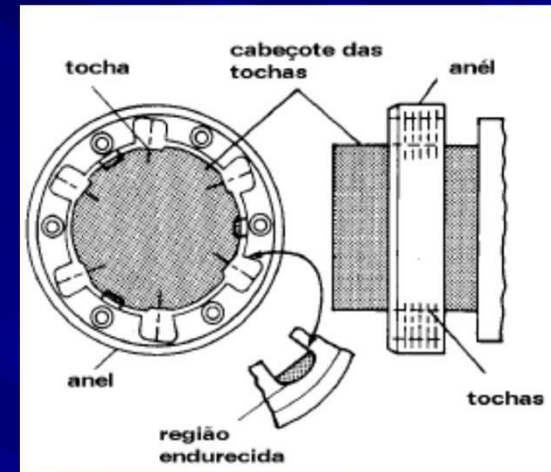
- O aquecimento é realizado por meio de chama oxiacetilênica até a austenitização da camada desejada. O resfriamento é realizado com salmoura, soluções de polímeros, água; por meio de spray ou imersão.
- Podem ser atingidas profundidades de até 6,3 mm
- A profundidade da camada é controlada pela intensidade, distância e tempo de duração da chama aplicada



Têmpera por chama - métodos

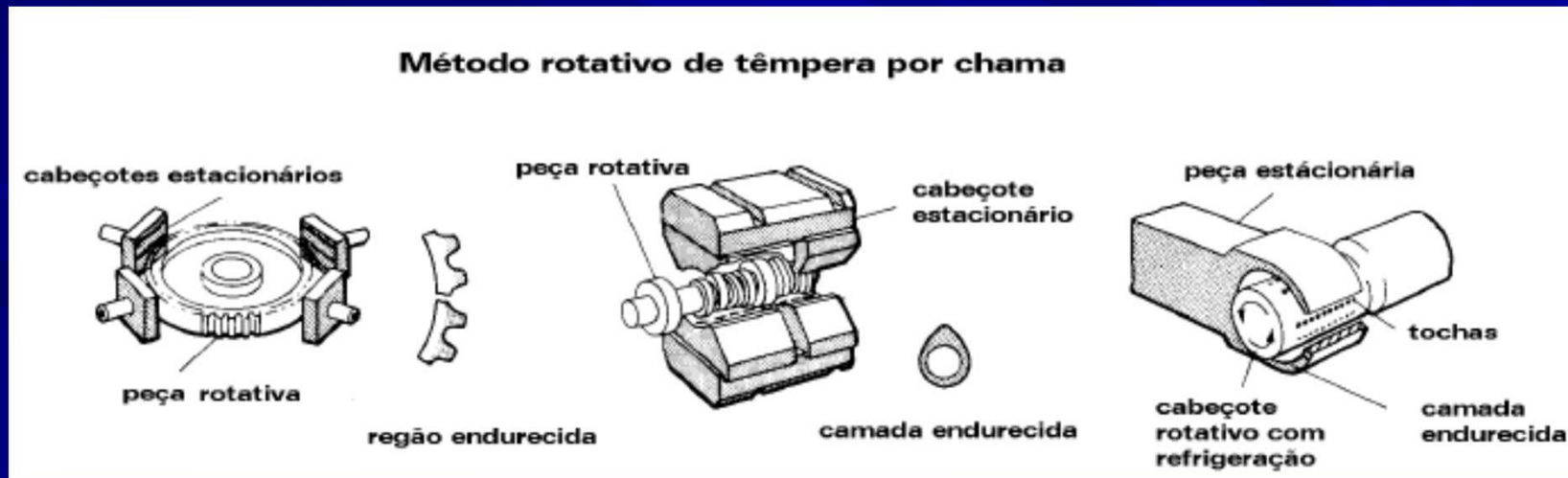
- Estacionário: Aquece-se apenas o local a ser endurecido com subsequente resfriamento rápido, por meio de aspersão ou imersão. É o método mais simples. Emprega apenas um maçarico e um tanque para resfriamento

- Progressivo: método direcionado ao tratamento de peças de grande porte. O equipamento consiste de uma ou mais tochas de aquecimento e um dispositivo de resfriamento por aspersão, montados em um carro que pode ter sua velocidade controlada. As velocidades variam, normalmente, de 5 a 30 cm/min.



Têmpera por chama - métodos

- Giratório: o componente, de seção circular, gira a uma velocidade estabelecida empiricamente, enquanto a tocha oxiacetilênica austenitiza a região ser endurecida. Para um aquecimento mais rápido e homogêneo são empregadas diversas tochas



para método progressivo giratório

■ Consumo de Oxigênio :

$$C_o = 0.7 (p)^{1/2} \quad [l/cm^2]$$

p = profundidade endurecida em mm

■ Consumo de acetileno:

$$C_a = 0.45 p^{1/2} \quad [l/cm^2]$$

■ Tempo de aquecimento

$$7 \cdot p^2 \quad [s]$$

■ Velocidade de movimento da tocha

$$72 / p^2 \quad [cm/minuto]$$

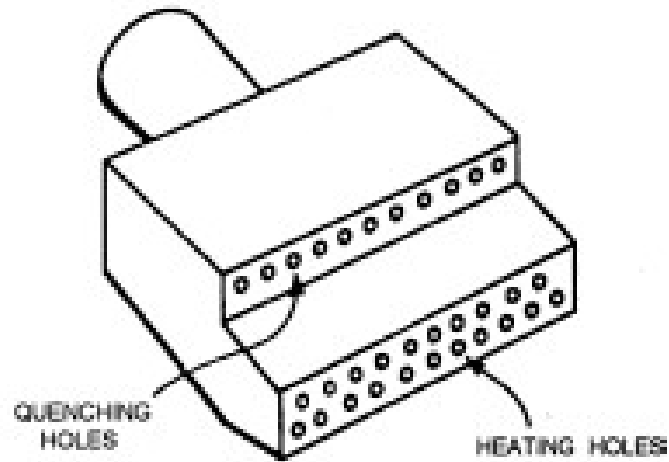
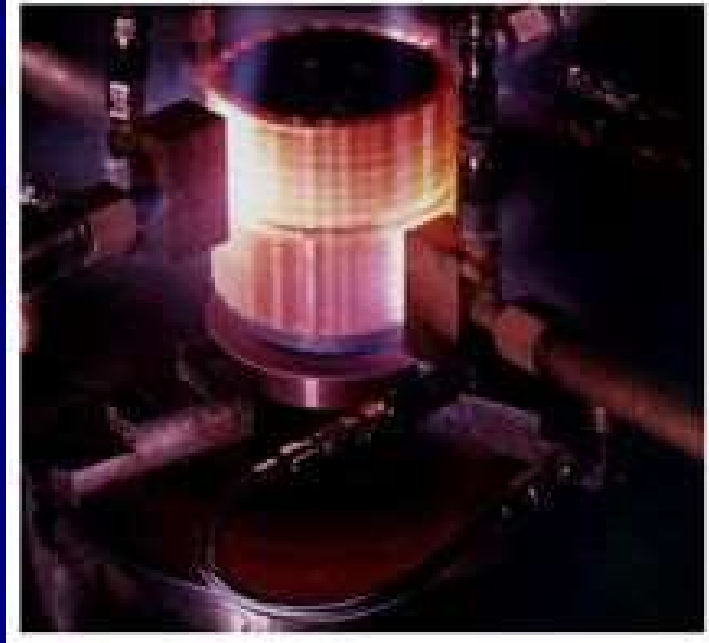
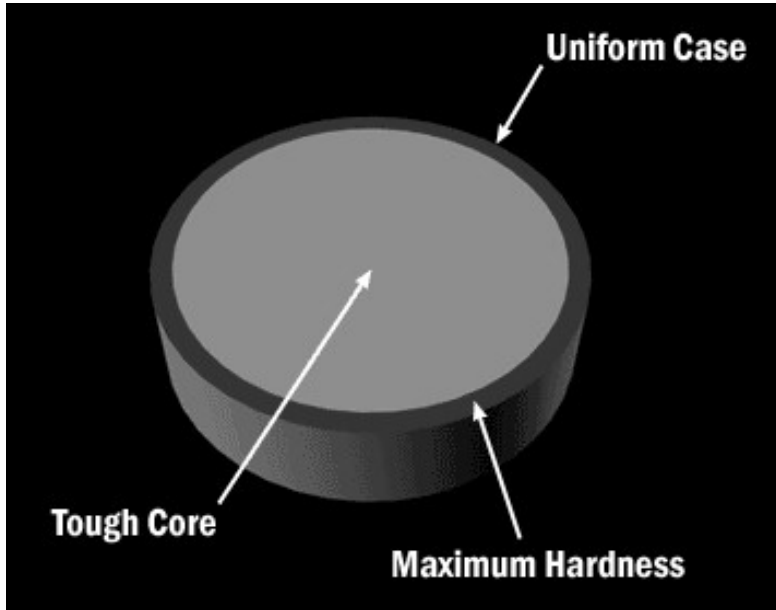
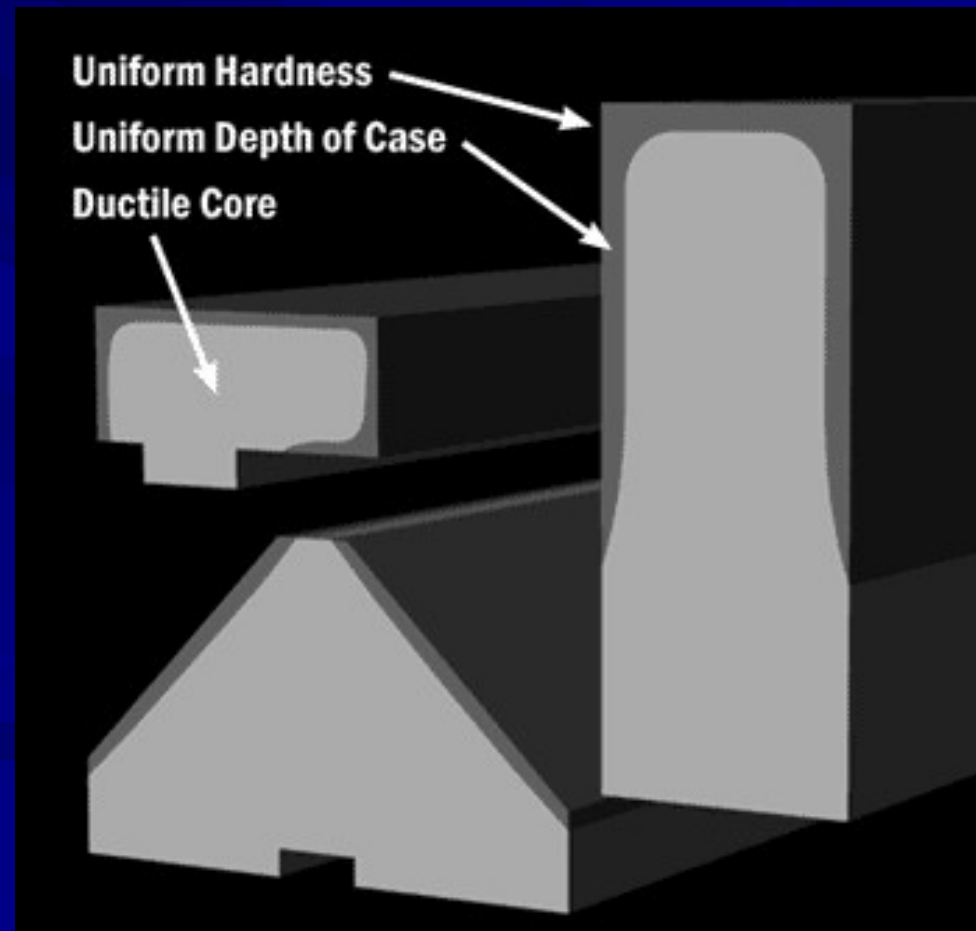
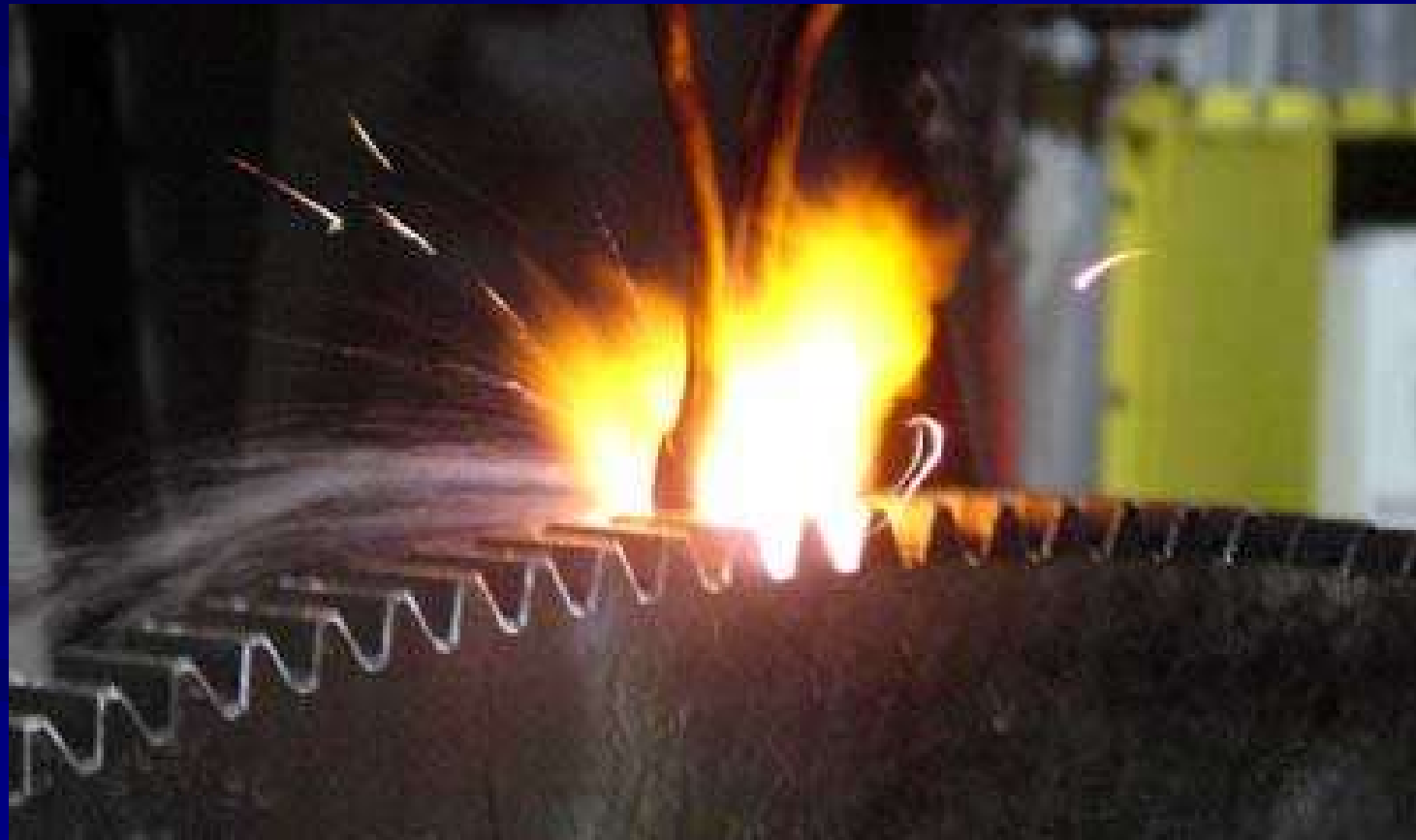


Figure 2-1.—Progressive hardening torch tip.

Têmpera Superficial a Chama



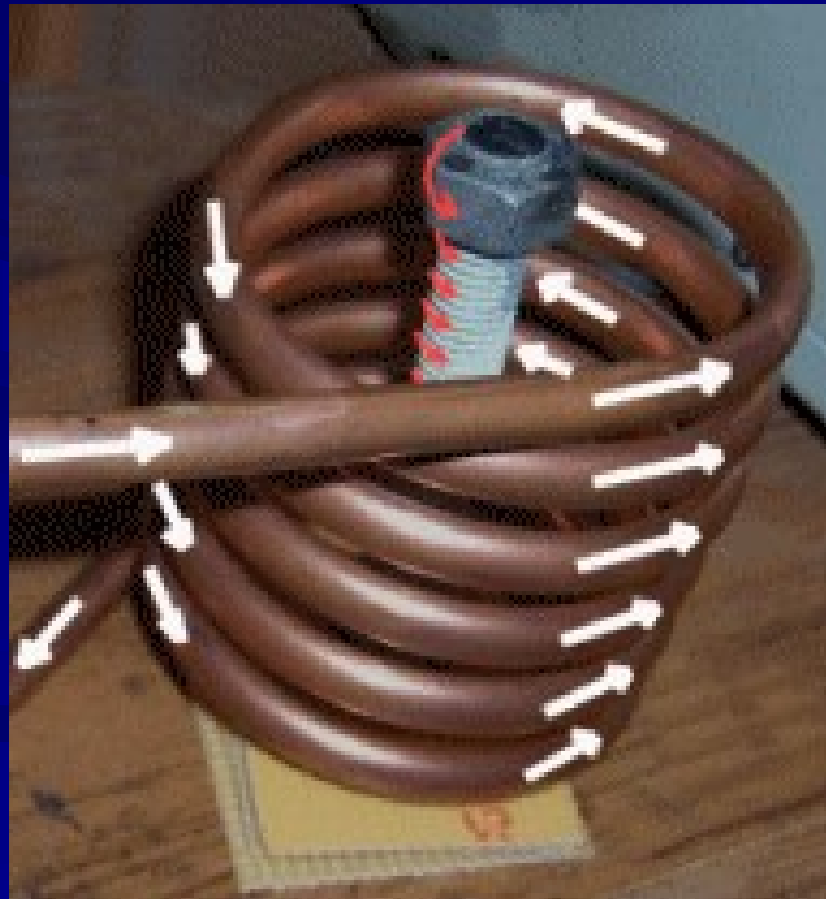
Têmpera Superficial a Chama



1.2- TÊMPERA POR INDUÇÃO

- O calor é gerado na peça por indução eletromagnética, utilizando-se bobinas de indução, nas quais flui uma corrente elétrica de alta frequência.
- Se uma **corrente** alternada passa por um bobina, estabelece-se nesta um **campo magnético** alternado, o qual induz um **potencial elétrico** na peça a ser aquecida. Como a peça é um circuito fechado, a tensão induzida provoca um **fluxo de corrente**. **A resistência à passagem desta corrente provoca o aquecimento da região a ser temperada**

Indução (correntes parasitas)



Têmpera por indução

- O tempo de aquecimento é da ordem de segundos. O resfriamento é realizado da mesma maneira que a têmpera por chama.



TÊMPERA POR INDUÇÃO

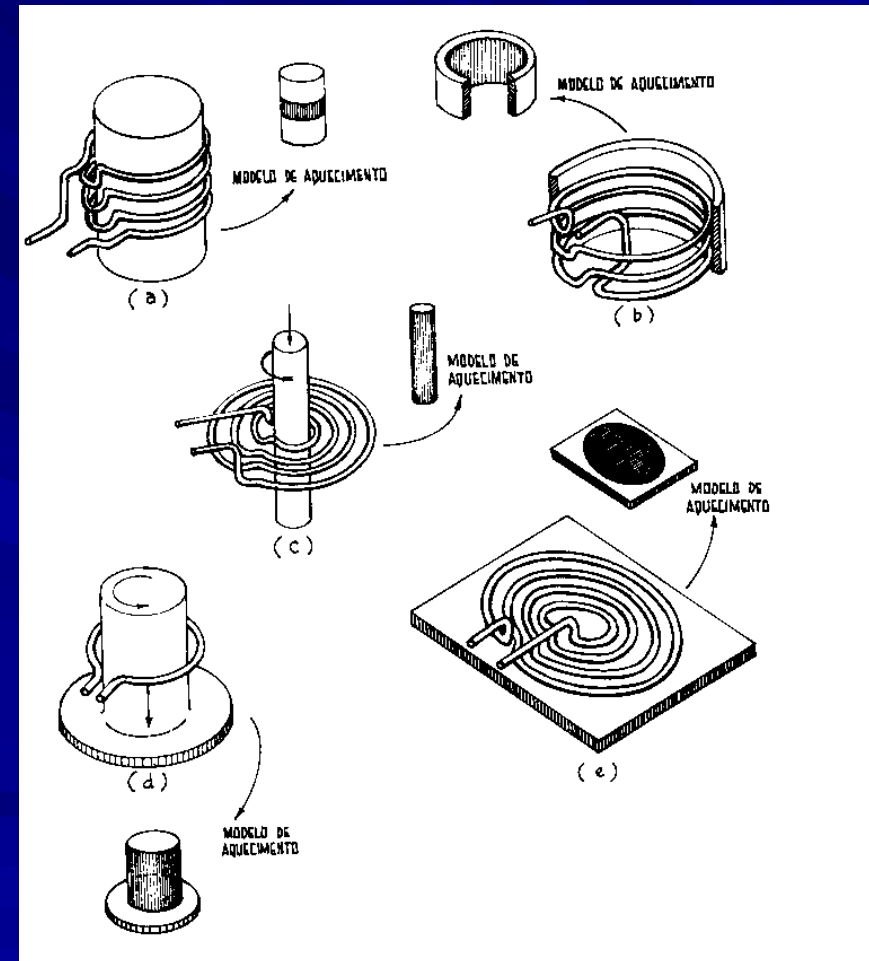
- A quantidade de calor gerada é dada pela lei de Joule:

$$Q = 0,239 \cdot i^2 \cdot R \cdot t$$

- i é a corrente em amperes
- R a resistência do condutor em ohms
- t o tempo que circula a corrente em segundos

A profundidade da camada temperada é controlada pela:

- Forma da bobina
- Distância entre a bobina e a peça
- Frequência elétrica (500-2.000.000 ciclos/s)
- Tempo de aquecimento



A profundidade da camada temperada é dada por:

$$p = 5030 \cdot (\rho / \mu \cdot f)^{1/2}$$

- p : profundidade da camada em cm
- ρ : resistividade do material em ohm.cm
- μ : permeabilidade magnética do material em Gauss/Oersted
- f : frequência da corrente em Hz

Frequência (Hz)	Profundidade do endurecimento (pol)	Penetração da energia elétrica (pol)
3.000	0,060	0,035
10.000	0,040	0,020
450.000	0,020	0,003

A profundidade da camada temperada é dada por:

$$p = 5030 \cdot (\rho / \mu \cdot f)^{1/2}$$

p: profundidade da camada em cm

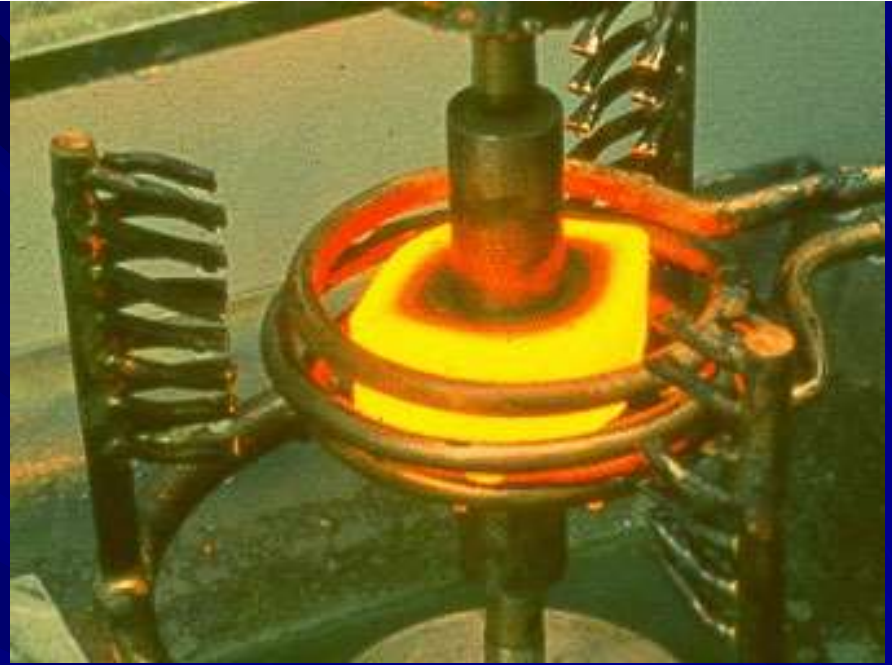
ρ : resistividade do material em ohm.cm

μ : permeabilidade magnética do material em Gauss/Oersted

f : frequência da corrente em Hz

Têmpera por indução - Vantagens

- Pode-se determinar com precisão a profundidade da camada temperada.
- O aquecimento é rápido
- As bobinas podem ser facilmente confeccionadas e adaptadas à forma da peça
- Não produz o superaquecimento da peça → permitindo a obtenção de uma estrutura martensítica acicular fina
- Geralmente, possibilita um maior aumento da dureza e da resistência ao desgaste
- A resistência a fadiga é também superior
- Não tem problema de descarbonetação.

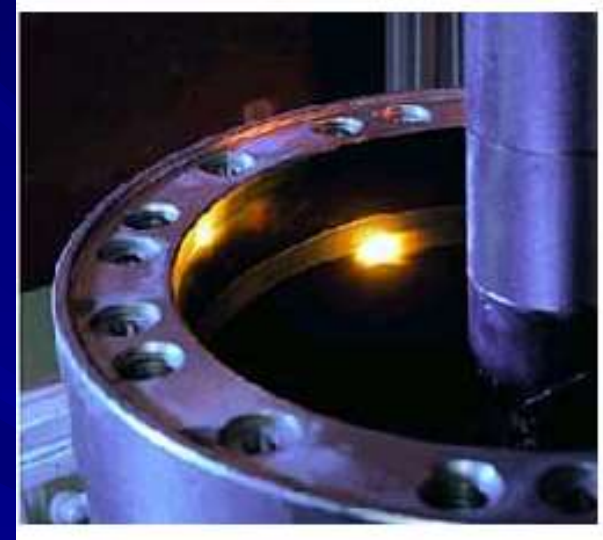


Têmpera por laser

- Utilizada na têmpera de peças com geometrias variadas
- O processo é muito preciso em impor aquecimento seletivo sobre áreas bem específicas. Além disto o processo pode ser feito em alta velocidade, produzindo pouca distorção.

VARIÁVEIS QUE CONTROLAM A PROFUNDIDADE DA CAMADA

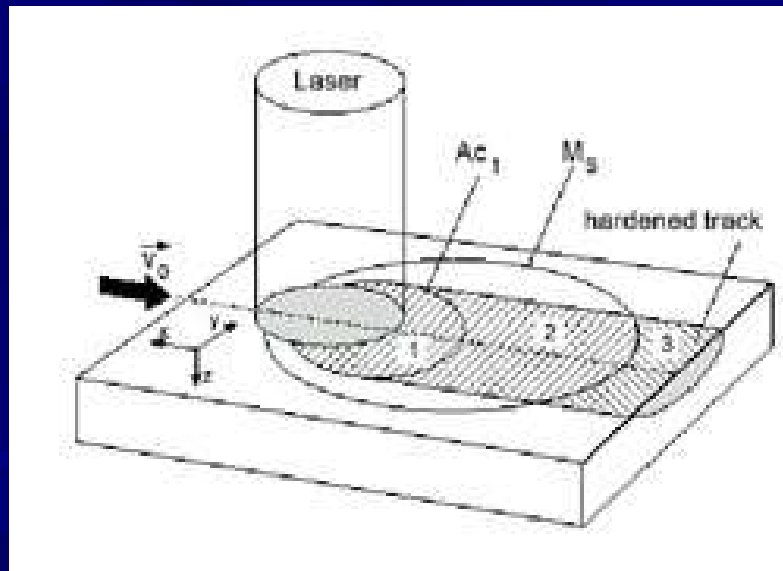
- Diâmetro do raio
- Intensidade
- Velocidade de varredura (100 polegadas/min.)



Têmpera por laser - Vantagens

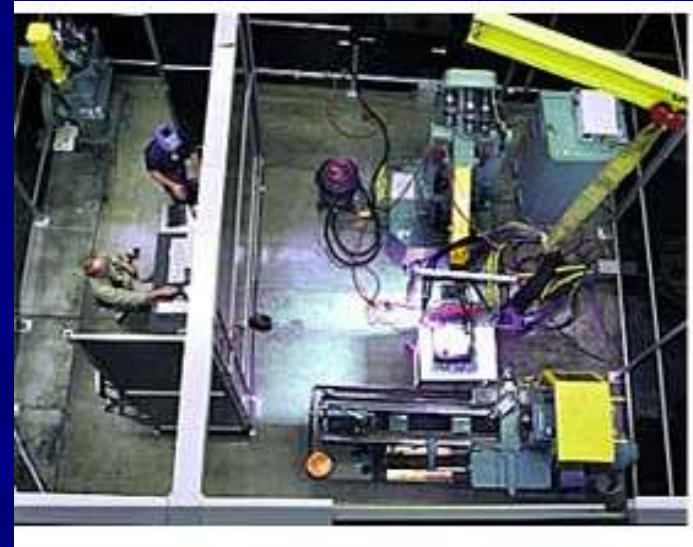
- O processo opera a altas velocidades
- A distorção provocada é pequena
- Pode ser usado para áreas selecionadas
- Softwares e automação podem ser usados para controlar os parâmetros

Têmpera Superficial a Laser



Têmpera por feixe eletrônico

- O endurecimento por feixe de elétrons é similar ao endurecimento por laser. A fonte de energia é um feixe de elétrons de alta energia.
- O processo pode ser automatizado, mas deve ser conduzido sob condições de vácuo, visto que os feixes de elétrons dissipam-se facilmente no ar.
- Como no caso do laser, a superfície pode ser endurecida com muita precisão, tanto na profundidade como na posição.



Martêmpera

MARTEMPERING is a term used to describe an interrupted quench from the austenitizing temperature of certain alloy, cast, tool, and stainless steels. The purpose is to delay the cooling just above the martensitic transformation for a length of time to equalize the temperature throughout the piece. This will minimize the distortion, cracking, and residual stress. The term martempering is somewhat misleading and is better described as marquenching. The microstructure after martempering is essentially primary martensitic that is untempered and brittle.

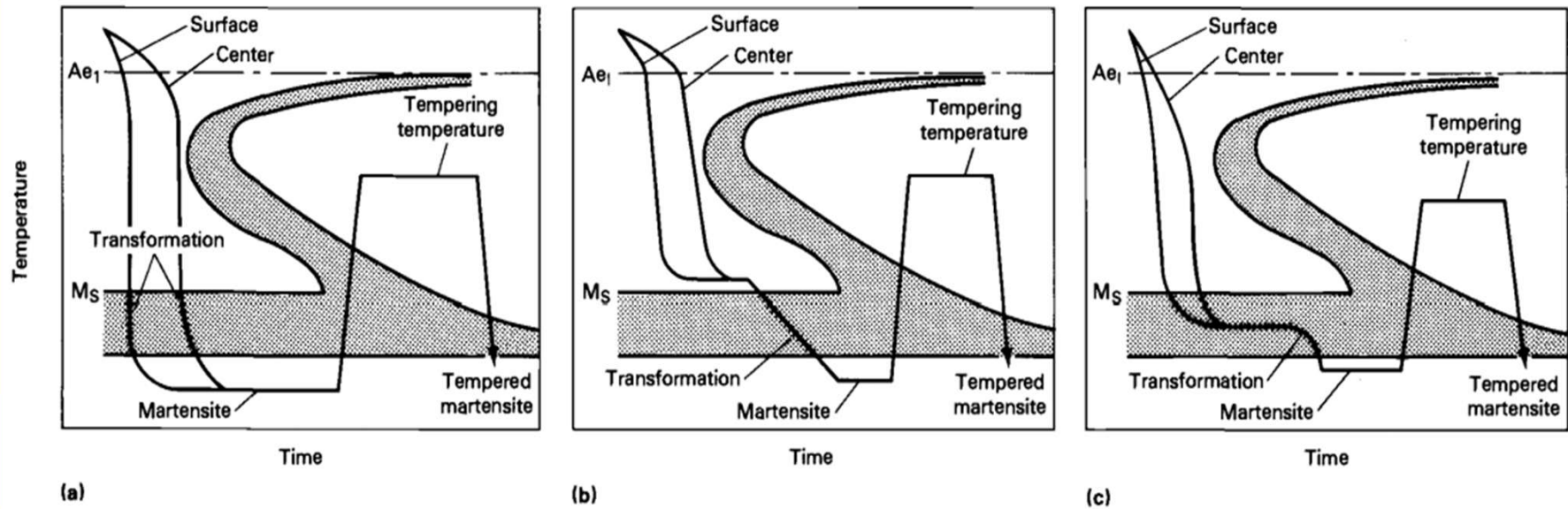


Fig 1 Time-temperature transformation diagrams with superimposed cooling curves showing quenching and tempering. (a) Conventional process. (b) Martempering. (c) Modified martempering

Table 1 Mechanical properties of 1095 steel heat treated by two methods

Specimen number	Heat treatment	Hardness, HRC	Impact energy		Elongation(a), %
			J	ft · lbf	
1	Water quench and temper	53.0	16	12	0
2	Water quench and temper	52.5	19	14	0
3	Martemper and temper	53.0	38	28	0
4	Martemper and temper	52.8	33	24	0

(a) In 25 mm or 1 in.

Martêmpera

- The advantage of martempering lies in the reduced thermal gradient between surface and center as the part is quenched to the isothermal temperature and then is air cooled to room temperature.
- Residual stresses developed during martempering are lower than those developed during conventional quenching because the greatest thermal variations occur while the steel is in the relatively plastic austenitic condition and because final transformation and thermal changes occur throughout the part at approximately the same time.
- Martempering also reduces or eliminates susceptibility to cracking.

Martêmpera

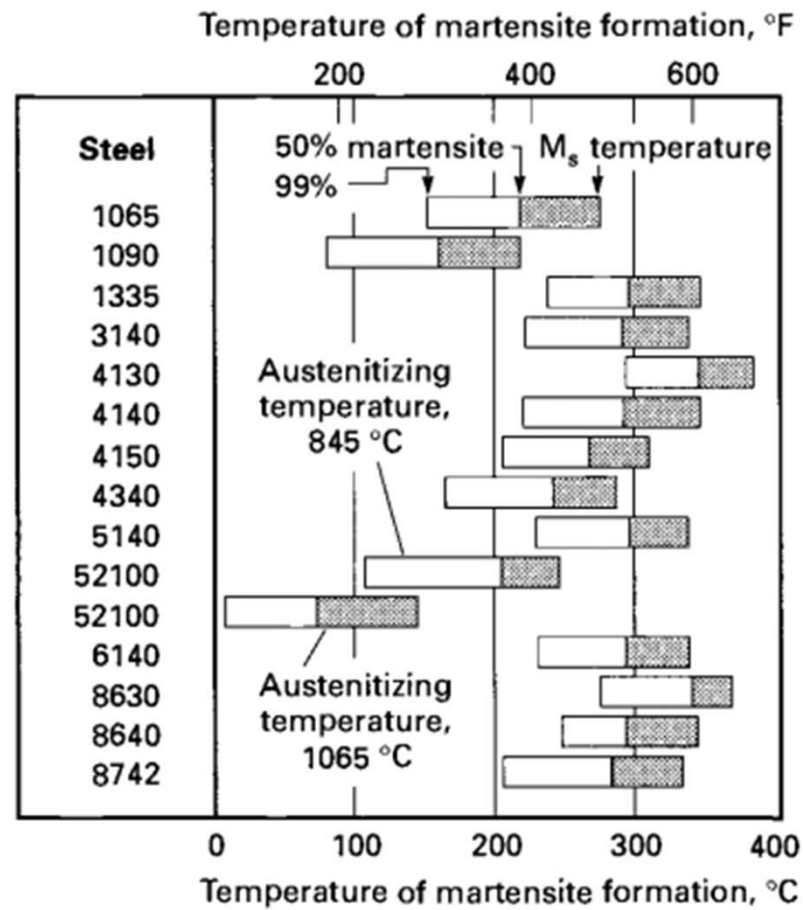


Fig 4 Temperature ranges of martensite formation in 14 carbon and low-alloy steels

Martêmpera – meios de resfriamento

- Molten salt and hot oil are both widely used for martempering. Several factors must be considered when choosing between salt and oil.
- Operating temperature is the most common deciding factor.
- Oils are widely used for martempering at up to 205 °C (400 °F) and sometimes at temperatures as high as 230 °C (450 °F). Molten salt is used for martempering in the range of 160 to 400 °C (320 to 750 °F).

Austêmpera

- Consiste do aquecimento do aço até uma temperatura acima da “zona crítica” (vide termo), seguido de resfriamento rápido num meio mantido a uma temperatura constante, dentro da faixa de formação do microconstituente bainita (na faixa de 250 a 400 °C), durante o tempo necessário até se produzir a “transformação completa” da austenita em bainita. Em seguida, o aço é resfriado sem restrições e dispensando a realização do processo térmico de revenimento.

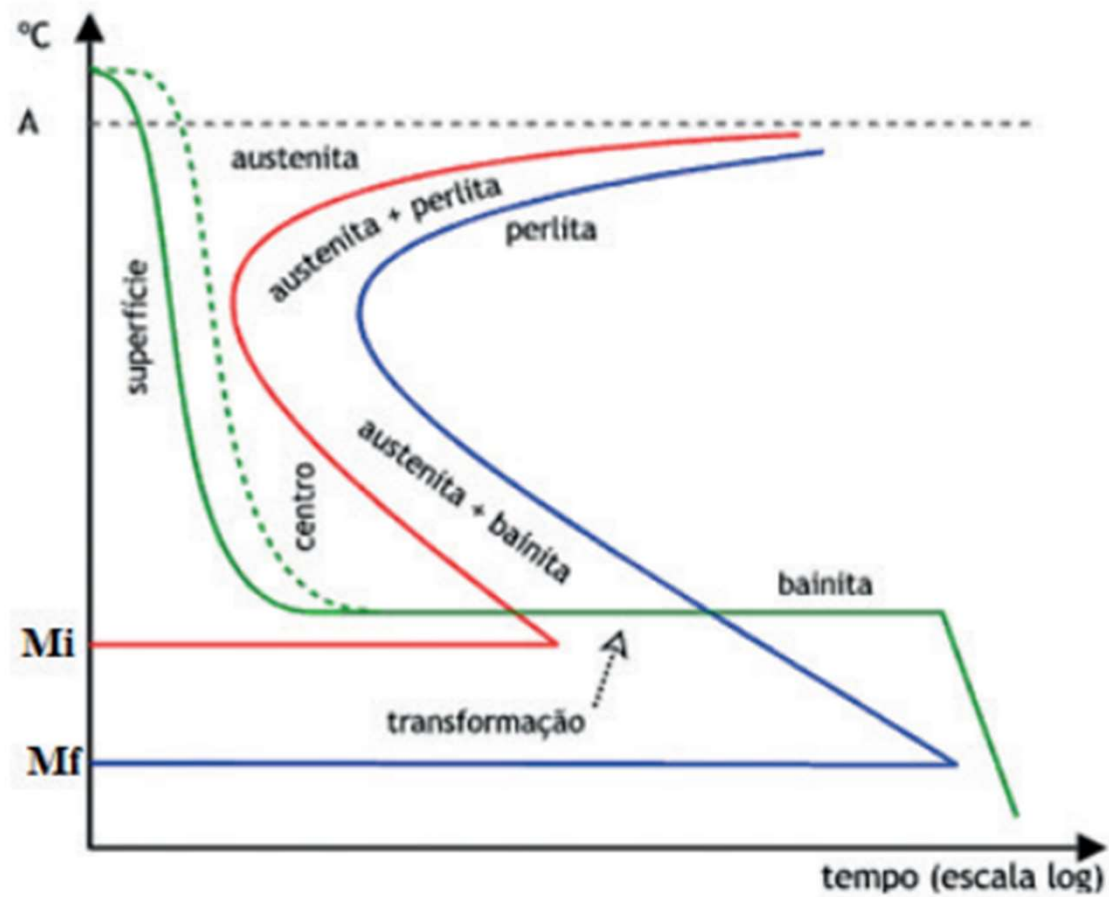


Figura 1 - Representação esquemática do processo austêmpera.

As estruturas bainíticas obtidas na austêmpera, sobretudo aquelas produzidas em menores temperaturas, caracterizam-se por elevada ductilidade e durezas elevadas da ordem de 50 HRC.

- A grande vantagem do processo de austêmpera é que, além de não necessitar de tratamento de revenimento, como no caso dos componentes temperados, as tensões residuais praticamente inexistem.
- Essa característica da transformação bainítica reduz a distorção, ou empenamento, o que é particularmente importante em peças de seções finas e formas complexas.