

**DIDIER LEON DHERTE**

**TÊMPERA POR INDUÇÃO DE SEMI EIXOS DE  
TRANSMISSÃO**

**Trabalho de formatura apresentado  
à Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo.  
Orientador:  
Prof. Dr. José Deodoro Trani  
Cappocchi**

**São Paulo  
2002**

# SUMÁRIO

## LISTA DE TABELAS

## LISTA DE FIGURAS

1.	INTRODUÇÃO.....	4
2.	PRINCÍPIO DO AQUECIMENTO INDUTIVO .....	6
3.	SELEÇÃO DE FREQUENCIA.....	8
4.	CARACTERÍSTICAS DO INDUTOR .....	11
5.	CONCENTRADORES DE CAMPO MAGNÉTICO .....	13
6.	RESFRIAMENTO.....	15
7.	EQUIPAMENTOS.....	17
7.1	<i>TIPOS DE MÁQUINAS E SUAS PROPRIEDADES.....</i>	17
7.2	<i>PREPARAÇÃO DA MÁQUINA.....</i>	18
8.	ASPECTOS PRÁTICOS.....	19
9.	VERIFICAÇÕES E PROVIDÊNCIAS DE ROTINA .....	25
10.	BENEFICIAMENTO .....	26
11.	ENDIREITAMENTO E ALÍVIO DE TENSÕES .....	27
12.	REVENIMENTO POR INDUÇÃO .....	28
13.	DADOS EXPERIMENTAIS.....	29
14.	TRATAMENTO DOS DADOS E DISCUSSÃO .....	38
15.	CONCLUSÕES.....	42
	BIBLIOGRAFIA.....	44

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1: Descrição do equipamento e de suas funções .....</i>	17
<i>Tabela 2: Influência dos Parâmetros de Regulagem no Processo.....</i>	22
<i>Tabela 3: Exemplo de limites de regulagem da máquina 15458 para uma peça.....</i>	30
<i>Tabela 4: Primeiro caso de reprovação.....</i>	31
<i>Tabela 5: Segundo caso de reprovação.....</i>	32
<i>Tabela 6: Terceiro caso de reprovação.....</i>	33
<i>Tabela 7: Quarto caso de reprovação.....</i>	34
<i>Tabela 8: Quinto caso de reprovação .....</i>	35
<i>Tabela 9: Sexto caso de reprovação.....</i>	36
<i>Tabela 10: Sétimo caso de reprovação.....</i>	37

## LISTA DE FIGURAS

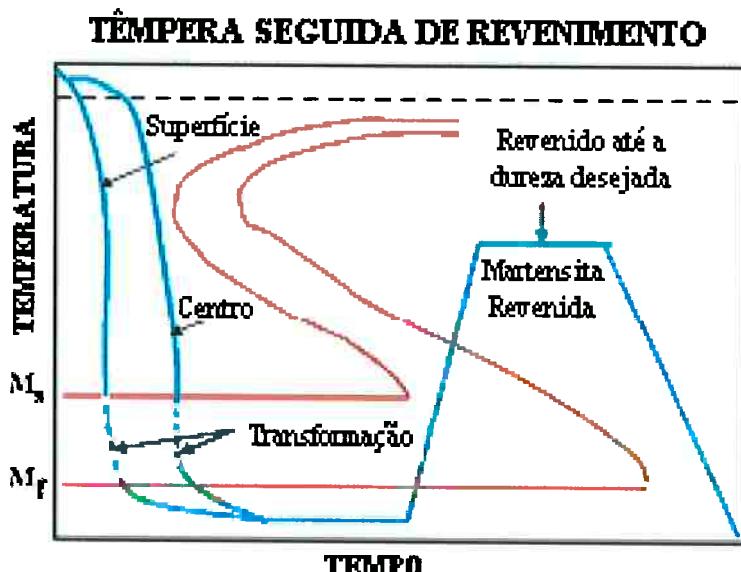
<i>Fig. 1: Têmpera e revenimento .....</i>	5
<i>Fig. 2: Linhas de campo e Correntes induzidas.....</i>	6
<i>Fig. 3: Sistema de indução.....</i>	7
<i>Fig. 4: Relação da freqüência com a penetração do aquecimento.....</i>	10
<i>Fig. 5: Exemplo de têmpera por indução.....</i>	11
<i>Fig. 6: Exemplos de indutores.....</i>	12
<i>Fig. 7: Efeito do concentrador.....</i>	13
<i>Fig. 8: Efeito do concentrador de campo magnético.....</i>	14
<i>Fig. 9: Mecanismo de resfriamento .....</i>	15
<i>Fig. 10: Indutor e Chuveiro .....</i>	16
<i>Fig. 11: Corte longitudinal de semi-eixo .....</i>	16
<i>Fig. 12: Relação da com profundidade de aquecimento.....</i>	18
<i>Fig. 13: Especificação de tratamento térmico semi eixo A 314 357 0501.....</i>	20
<i>Fig. 14: Instrução de Regulagem da máquina 12771 para semi eixo A 360 357 1601.....</i>	23
<i>Fig. 15: Relatório de Análise (CTQ- atende).....</i>	24
<i>Fig. 16: estufa de revenimento .....</i>	27
<i>Fig. 17: Prensa de endireitamento.....</i>	27
<i>Fig. 18: Curva TTT do aço SAE 4140.....</i>	29
<i>Fig. 19: macrografia .....</i>	30
<i>Fig. 20: máquina de têmpera por indução.....</i>	38
<i>Fig. 21: Região afetada pelo aquecimento com indutor estacionário.....</i>	39
<i>Fig. 22: Conjunto indutor + chuveiros .....</i>	41

## **1. INTRODUÇÃO**

O tratamento térmico dos aços por indução combina uma das mais antigas tecnologias, o tratamento térmico, com uma das mais modernas, aquecimento por indução. O tratamento térmico é a chave para adequar as propriedades do aço a uma grande variedade de aplicações. O objetivo deste trabalho é estudar e delinear o processo de têmpera por indução como um todo, e uma de suas aplicações, a têmpera de semi-eixos de transmissão, verificando a eficiência e a simplicidade de operação do processo.

Os aços e ferros fundidos no estado bruto de fundição, forjamento e laminação, apresentam propriedades mecânicas insuficientes para as exigências durante o trabalho, principalmente quanto a dureza superficial, resistência ao desgaste e resistência à fadiga.

Um dos processos de tratamento térmico para adequar estas propriedades é a Têmpera, que consiste no aquecimento da peça de aço ou ferro fundido até uma temperatura dentro do campo austenítico, por determinados períodos de tempo, a fim de austenitizar toda a estrutura, seguido de um resfriamento brusco de modo a formar uma microestrutura martensítica. O resfriamento pode ser feito em tanques ou através de chuveiros utilizando-se solução de óleo (ou polímero) e água. Após a têmpera é necessário efetuar um revenimento para alívio de tensões.



*Fig. 1: Têmpera e revenimento<sup>[1]</sup>*

O aquecimento por indução é um processo industrial largamente utilizado no aquecimento de qualquer material condutor de eletricidade.

Apesar de ser usado principalmente com metais, também é possível aquecer grafite, vidro fundido, óxidos e outros materiais não metálicos assim como gás ionizado. Para materiais não condutores podemos utilizar aquecimento indireto.

## 2. PRINCÍPIO DO AQUECIMENTO INDUTIVO<sup>[2]</sup>

O aquecimento por indução fornece um meio para o aquecimento preciso de objetos condutores. Em alguns casos, é o único meio prático de fornecer calor para o material de trabalho. É limpo, rápido, repetível e se presta à automação. Não é preciso haver contato físico entre a carga e a fonte de calor, e este pode ser restrito a áreas localizadas ou zonas superficiais.

O princípio para aquecimento indutivo se baseia na habilidade de induzir correntes elétricas em condutores elétricos. Existem dois métodos simples de induzir correntes, pelo princípio do transformador ou pelo deslocamento de objetos magnetizados no interior de uma espira. Na verdade, é a presença de um campo magnético variante na direção perpendicular ao eixo da espira (ou bobina) que induz a corrente (posteriormente a bobina será substituída pela carga a ser aquecida).

Quando uma corrente elétrica passa através de um condutor metálico, é gerado um campo eletromagnético em torno do condutor.

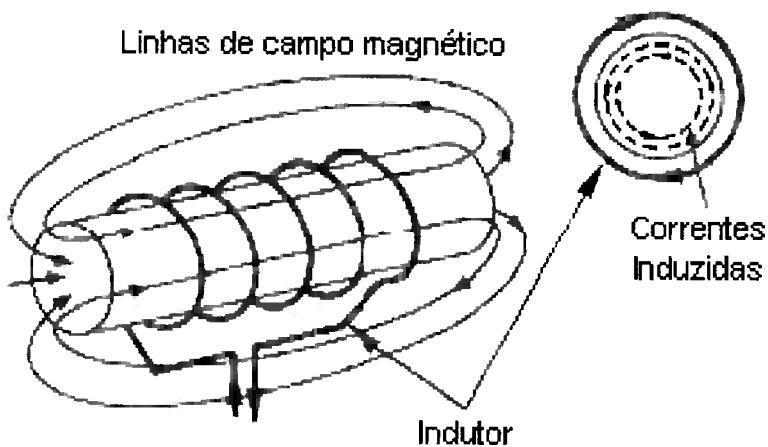


Fig. 2: Linhas de campo e Correntes induzidas<sup>[3]</sup>

Este campo magnético, quando encontra uma peça em seu raio de ação, produz na mesma uma corrente induzida. A resistência da peça à passagem desta corrente induzida proporciona o seu aquecimento.

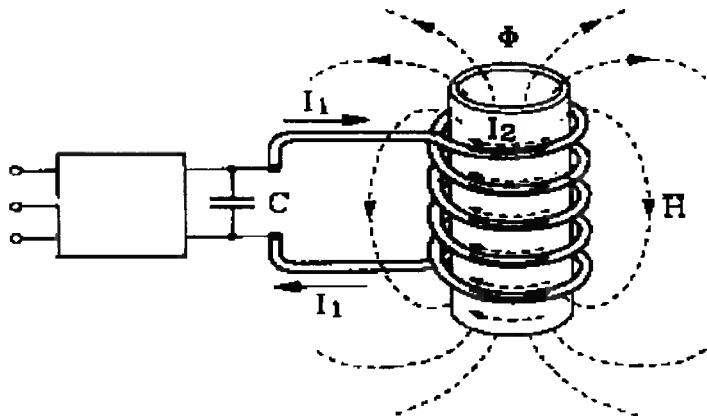


Fig. 3: Sistema de indução<sup>[3]</sup>

“ O aquecimento indutivo proporciona um excelente controle da profundidade de aquecimento, que varia com a freqüência de oscilação do campo indutor. É possível até aquecer peças de dentro para fora, por exemplo no aquecimento de tarugos para forjamento, resultando em um aquecimento mais homogêneo do tarugo.

“ A principal vantagem do aquecimento indutivo no processo de têmpera é possibilitar o tratamento de regiões específicas da peça, com o controle da profundidade. Este poderá ser superficial ou total, e de forma rápida se comparado aos processos convencionais como fornos e banhos de sais.

Na têmpera por indução pode ocorrer além do aquecimento indutivo, o aquecimento por *condução* em função do nível da potência aplicado, o tempo e a geometria da peça, permitindo que o calor se propague além do aquecimento indutivo.

O aquecimento pode ser feito de duas maneiras: *estacionário* onde o indutor e peça estão parados ou com *avanço*, quando há movimento relativo entre o indutor e a peça.

### 3. SELEÇÃO DE FREQUENCIA

O aquecimento por indução é prático e efetivo se algumas relações básicas entre a freqüência do campo magnético (e portanto a freqüência da corrente alternada no indutor) e as propriedades da peça trabalhada forem satisfeitas.

Embora estas relações não sejam críticas, elas devem ser satisfeitas para garantir um certo grau de “skin effect” (*efeito pelicular*) na peça. Quando uma corrente elétrica alternada de freqüência  $f$  circula por um material condutor, a solução das equações de Maxwell nos mostra que nem sempre ela circula por toda a seção reta do material (como no caso de correntes contínuas). Embora isso seja válido para qualquer geometria, o caso de geometria cilíndrica tem soluções relativamente simples [2]. Segundo pode ser facilmente demonstrado, dependendo da freqüência da corrente, esta circulará somente pela superfície do material. Este é o fenômeno conhecido por *skin-effect*.

“Skin effect” é portanto, o fenômeno pelo qual as correntes fluindo por um peça cilíndrica tendem a ser mais intensas na superfície, enquanto são praticamente nulas no centro. Existe portanto uma taxa de aquecimento maior na superfície do que no centro da peça, o “skin effect” está presente em todas as aplicações bem sucedidas de aquecimento indutivo. A matemática necessária para explicar o efeito pelicular não está no escopo deste trabalho, mas deve ser mencionado que a intensidade do campo em um condutor sob o efeito de um campo magnético alternado pode ser descrita por uma equação diferencial que tem soluções na forma das funções de Bessel. Estas soluções demonstram que a corrente induzida decresce exponencialmente da superfície para o centro da peça. Um dos maiores benefícios obtidos das soluções da equação diferencial que descreve o aquecimento indutivo é que elas permitem a definição de uma profundidade de referência,  $d$ . Ela depende da freqüência do campo alternado, da resistividade elétrica e da permeabilidade magnética relativa da peça, e é muito útil para estimar a suscetibilidade de um material ao aquecimento indutivo. A definição de  $d$  é:

$$d = 5000 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \text{ (unidades métricas),}$$

Onde  $d$  é profundidade de referencia em cm,  $\rho$  é a resistividade do material (peça),  $\mu$  é a permeabilidade magnética do material (adimensional) e  $f$  é a freqüência do campo alternado em hertz.

A profundidade de referencia é a distancia da superfície em que os valores de corrente e de campo induzido são reduzidos a  $1/e$  ou seja 37% do valor na superfície. Neste ponto, a densidade de potência caiu para  $1/e^2$  ou 14% do valor na superfície.

Um resultado muito importante do “skin effect” é evidenciado na eficiência de aquecimento. Esta eficiência é a porcentagem de energia aplicada no indutor que é transferida por indução para a peça. Foi mostrado que a eficiência decresce se a proporção entre diâmetro da barra cilíndrica e profundidade de referencia for menor do que 4:1. Se a proporção é de 4:1, chamamos a freqüência correspondente de *freqüência critica*. Para freqüências acima da freqüência crítica, o ganho de eficiência é muito pequeno, em compensação para freqüências abaixo da freqüência crítica a perda de eficiência é significativa pois a corrente induzida é menor devido ao cancelamento de corrente (as correntes induzidas de cada lado da peça interagem e se anulam).

No caso em estudo neste trabalho, i.e. têmpera por indução de semi-eixos de transmissão, utilizam-se altas freqüências de aquecimento, já que desejamos fazer apenas uma têmpera superficial e que a profundidade de aquecimento é inversamente proporcional à freqüência da corrente (do campo magnético). A figura seguinte mostra a relação da profundidade de referência com a freqüência de indução.

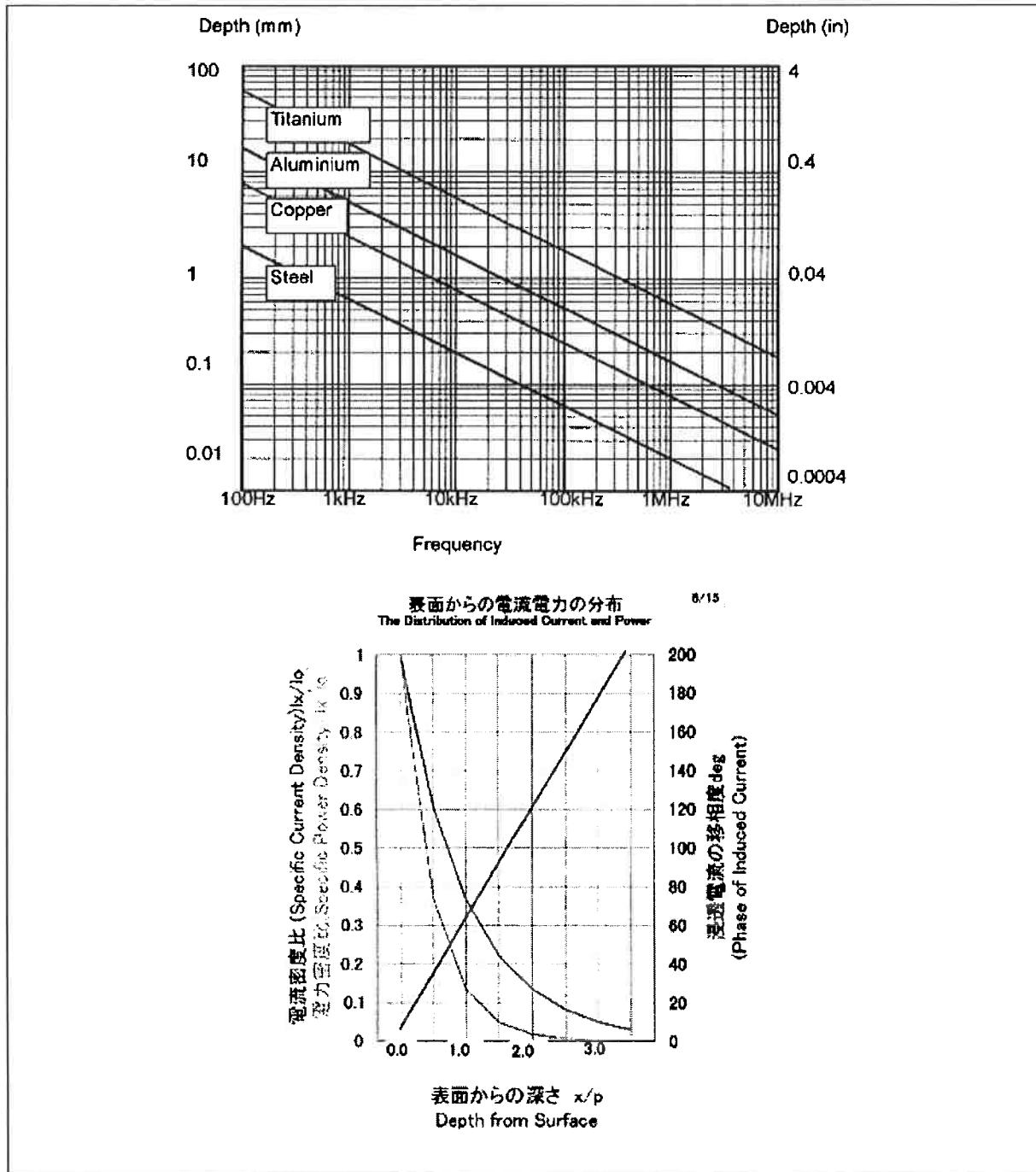


Fig. 4: Relação da freqüência com a penetração do aquecimento.<sup>[4]</sup>

No caso da têmpera por indução realizada na DaimlerChrysler, a freqüência não é um parâmetro de processo, ela é fixa, existe um gerador de freqüências para cada máquina, mas este fornece sempre a mesma freqüência. O ajuste de profundidade se faz pela potência fornecida ao semi-eixo. As profundidades são crescentes para potências crescentes.

#### 4. CARACTERÍSTICAS DO INDUTOR<sup>[3]</sup>

Existe uma grande variedade de geometrias de indutores, mas apenas algumas delas são comumente utilizadas. A geometria varia com o tipo de peça e o tipo de aquecimento que se deseja fazer, assim como com a freqüência, a potência, a corrente e a sua variação com o tempo.

A geometria do indutor é definida em função da geometria da peça e das exigências do desenho, como dureza e profundidade de camada.

O material ideal para fabricar indutores é o cobre eletrolítico, (99,99% puro) a fim de minimizar as perdas com a resistência à passagem de corrente elétrica (resistividade do material).

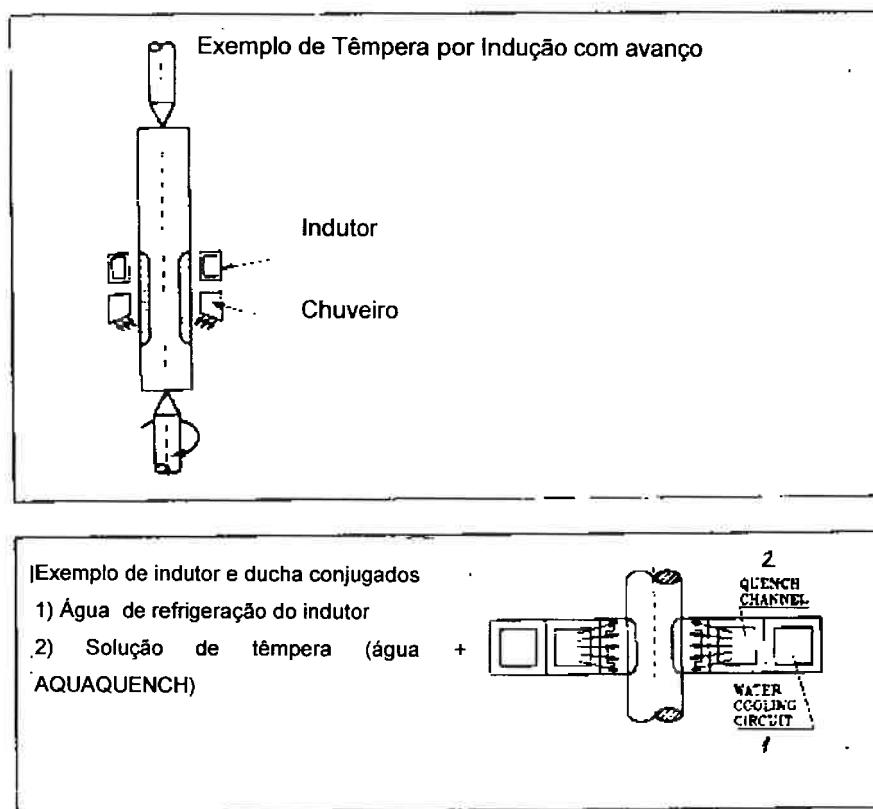


Fig. 5: Exemplo de têmpera por indução<sup>[2]</sup>

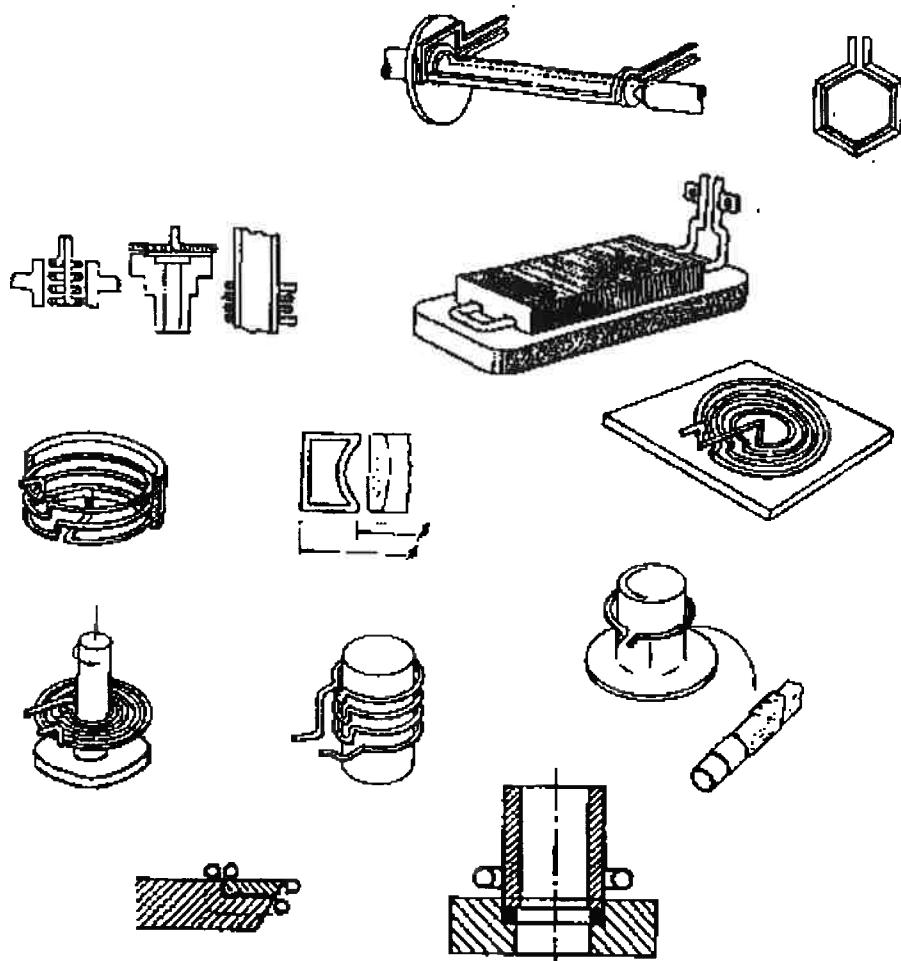


Fig. 6: Exemplos de indutores<sup>[2]</sup>

## 5. CONCENTRADORES DE CAMPO MAGNÉTICO<sup>[5,6]</sup>

São constituídos de placas de Fe-Si e têm o objetivo de direcionar e concentrar o fluxo das linhas de campo, aumentando o rendimento do indutor. Deve ser bem projetado, porque o seu processo de fabricação é muito mais trabalhoso.

As figuras abaixo mostram a influência dos concentradores de campo em um indutor de mesma geometria.

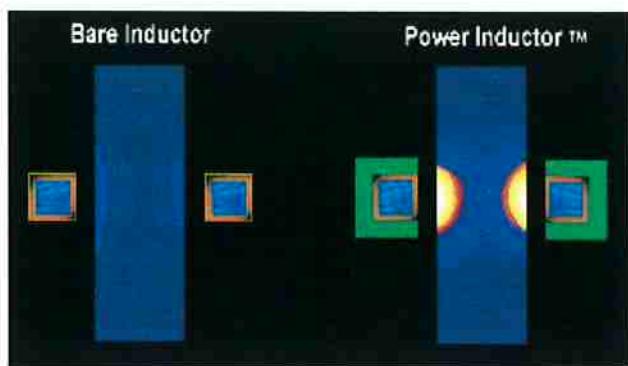


Fig. 7: Efeito do concentrador<sup>[7]</sup>

As funções tradicionais dos concentradores de campo magnético em tratamentos térmicos de indução tem sido de aumentar a eficiência do par magnético (pela redução das perdas) e obter aquecimento seletivo em áreas de difícil aquecimento na peça.

Como funcionam?

Sem o concentrador, o fluxo magnético se espalharia em volta do indutor ou de um condutor de corrente conectado à vizinhanças condutoras. O concentrador forma um caminho magnético para canalizar o fluxo magnético principal em uma área bem determinada fora do indutor.

A figura a mostra a distribuição de corrente em um condutor isolado. A redistribuição de corrente no interior deste condutor, após a colocação de uma carga (peça) condutora na sua proximidade pode ser observada na Figura b. Esta figura mostra que devido ao efeito de proximidade, uma parte significativa da corrente no condutor vai fluir próxima da superfície mais próxima da carga. O restante da corrente estará concentrada nas laterais do condutor. Após colocar um concentrador de fluxo em volta do condutor (fig.c),

praticamente toda a corrente se concentrará na superfície mais próxima da carga. O concentrador magnético vai “espremer” a corrente para a superfície aberta do condutor. Este fenômeno eletromagnético é conhecido como “slot effect”.

A concentração de corrente na superfície do indutor mais próxima da carga resulta num bom acoplamento (magnético) melhorando portanto a eficiência.

É necessário mencionar que este efeito também acontece sem a presença de carga, neste caso a corrente vai estar ligeiramente mais distribuída no indutor, no entanto, a maior parte ainda está concentrada na superfície aberta.

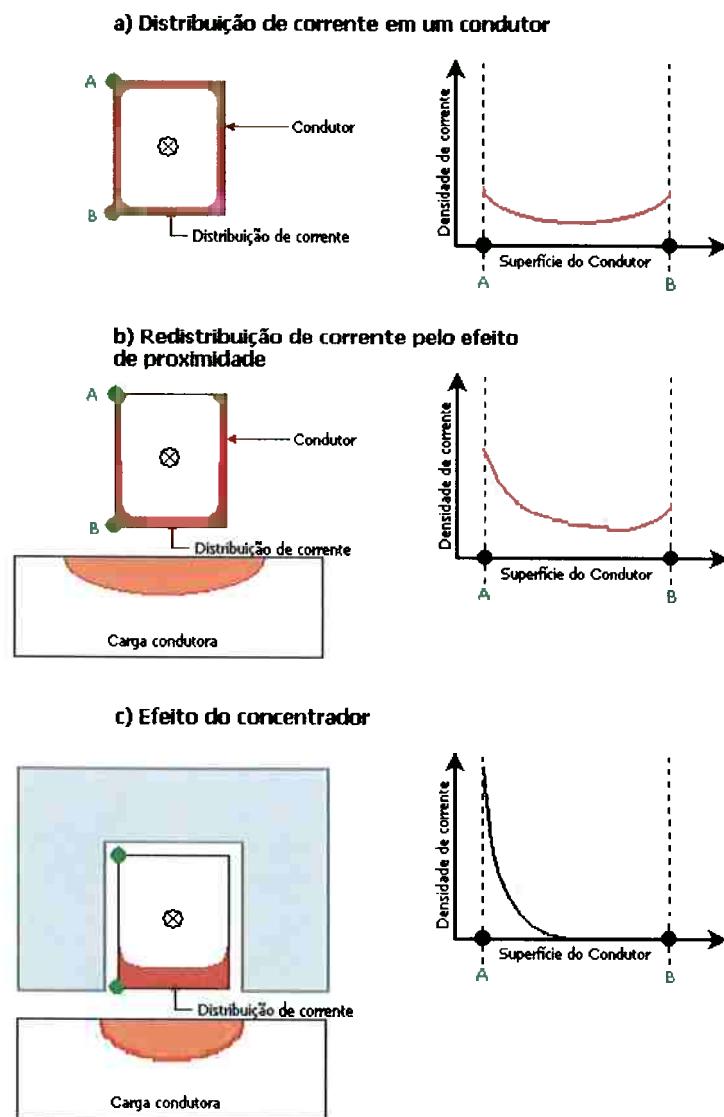


Fig. 8: Efeito do concentrador de campo magnético<sup>[5]</sup>

## 6. RESFRIAMENTO<sup>[2]</sup>

Na têmpera por indução, o resfriamento pode ser feito em tanques ou através de chuveiros como ilustrado na figura 5. O meio de resfriamento é a água acrescida de polímeros em concentrações e temperaturas específicas para cada processo. Os polímeros são utilizados para dar maior estabilidade à solução de têmpera e controlar a severidade do meio de têmpera (velocidade de resfriamento).

Quanto maior a porcentagem do polímero, menor a velocidade de resfriamento.  
Quanto maior a temperatura da solução, menor a velocidade de resfriamento.

Na Mercedes-Benz é utilizado o polímero AQUAQUENCH, produzido pela Houghton.

O gráfico mostra as 3 etapas envolvidas durante o resfriamento com o uso de polímeros

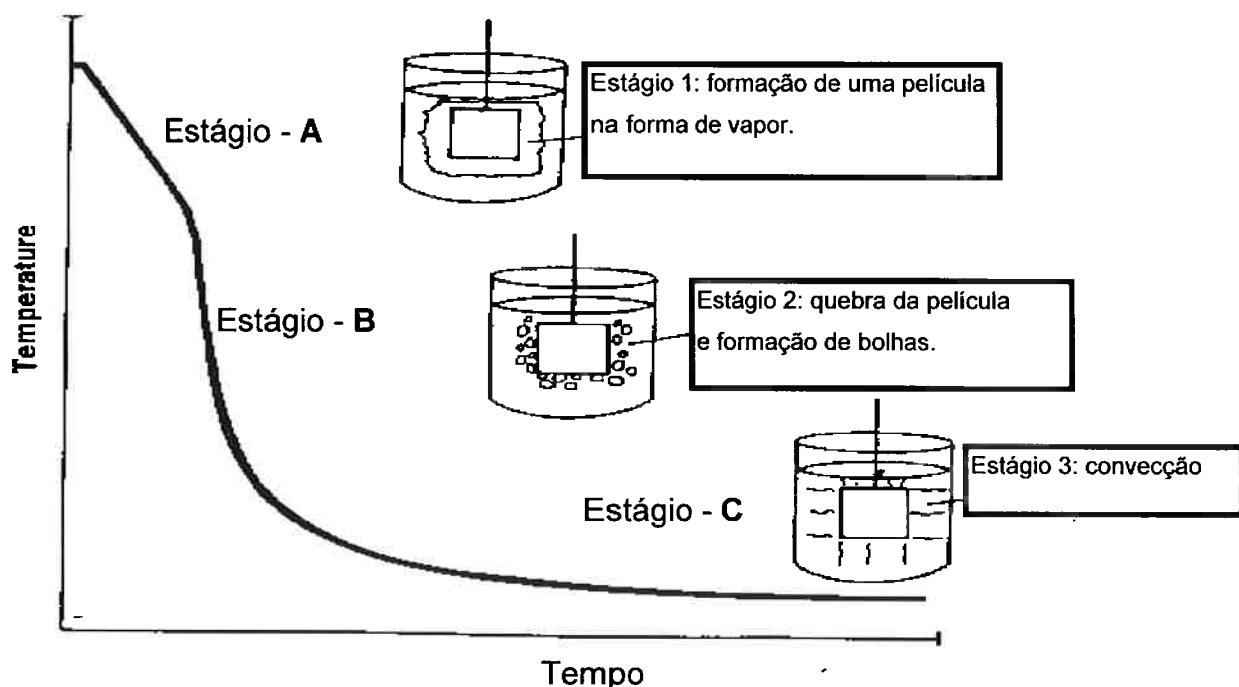


Fig. 9: Mecanismo de resfriamento<sup>[2]</sup>

Combinando o aquecimento por indução com um resfriamento com chuveiros, rotação do semi-eixo e avanço do conjunto chuveiro/indutor como ilustrado na figura 10, é feito o endurecimento superficial progressivo da peça. O resultado do tratamento está

evidenciado na figura 11, que mostra o corte longitudinal de um semi-eixo após o tratamento de têmpera por indução.

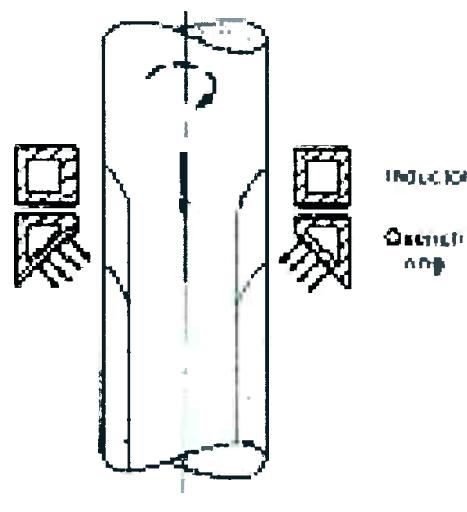


Fig. 10: Indutor e Chuveiro<sup>[8]</sup>



Fig. 11: Corte longitudinal de semi-eixo<sup>[9]</sup>

## 7. EQUIPAMENTOS<sup>[2]</sup>

Tabela 1: Descrição do equipamento e de suas funções

Componentes	Características
Fonte	Moto-gerador ou Conversor Estático de média freqüência ou Gerador de Alta Freqüência com válvula osciladora.
Transformador de Impedância	Tem a função de reduzir a tensão para adequar a impedância do indutor com a peça.
Estação de trabalho	Encontram-se os dispositivos de fixação, indutor, chuveiro, prolongador do indutor e painéis de controle de parâmetros.
Unidade de resfriamento do meio de têmpora	Sistema com circuito fechado para manter a temperatura e pressão da ducha sob controle.
Unidade de resfriamento da máquina	Também conhecido como <i>chiller ou geladeira</i> , responsável pela refrigeração de todos os componentes da máquina.
Sistema de filtragem para a água de refrigeração	Filtro com 3 cartuchos com malha de 75 $\mu\text{m}$ e filtro tipo Y.

### 7.1 Tipos de máquinas e suas propriedades

As máquinas são caracterizadas pelos dados nominais de potência (kW) e freqüência (kHz). Define-se como freqüência ao número de vezes que um fenômeno ocorre em um determinado período de tempo.

Exemplos:

1 rpm = uma rotação por minuto

1 Hz = um ciclo por segundo

1 kHz = mil ciclos por segundo

A especificação da máquina segue a sua aplicação. Um dos dados mais importantes para especificar uma máquina é a profundidade da camada exigida.

De uma forma geral temos:

Baixa frequência  $\Rightarrow$  alta profundidade de aquecimento

Média frequencia  $\Rightarrow$  média profundidade de aquecimento

Alta frequênciia  $\Rightarrow$  baixa profundidade de aquecimento

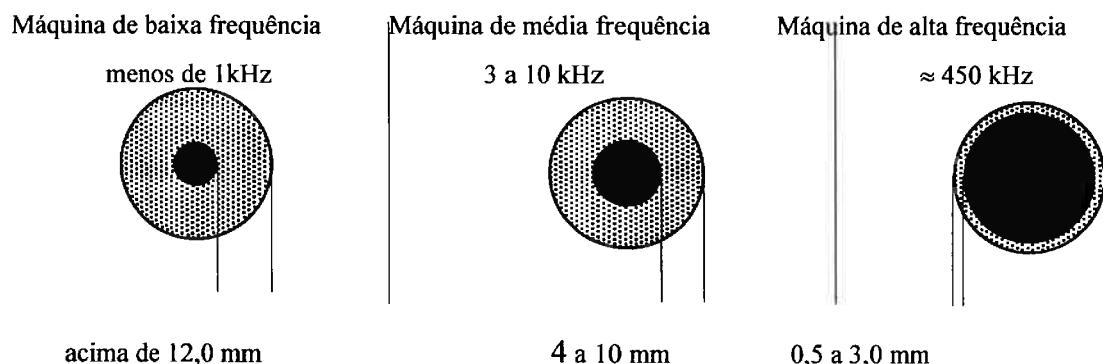


Fig. 12: Relação da com profundidade de aquecimento<sup>[2]</sup>.

## 7.2 Preparação da Máquina

Para a preparação da máquina temos à disposição a ET-I (especificação de tratamento térmico) e a IR (instrução de regulagem). Em caso de try-out, é necessário o levantamento de todos os parâmetros.

**ET-I:** Especificação de Tratamento Térmico por Indução. É elaborada pelo laboratório (CTQ – centro tecnológico da qualidade) e indica a dureza HRC (Rockwell C), a profundidade da camada RHT em milímetros e a região da peça a ser temperada. Os dados da ET-I (figura 13) são obtidos no desenho do produto e nas normas DCBR (DaimlerChrysler do Brasil).

**IR:** Instrução de Regulagem de Máquina de Indução, elaborada pelo GED (gerência de eixos dianteiros). Estão indicados os principais dispositivos, parâmetros de processo e quando necessário os cuidados específicos.

## 8. ASPECTOS PRÁTICOS

O processo de têmpera por indução é controlado por diversos fatores, cada um com o seu grau de importância. A somatória destes irá definir o resultado em qualidade do produto. Todos deverão ser muito bem balanceados durante a preparação e principalmente em alguma correção do processo.

- Material
- Meios de produção
- Operador
- Regulagem da máquina

**Material:** deverá estar em ordem com relação a composição química, tratamento térmico, tolerâncias dimensionais e isento de descarbonetação.

**Indutor:** Obedecer as seguintes condições:

- Fixado com parafusos apropriados de latão ou aço inoxidável.
- Isento de vazamentos e amassados.
- Fixação eficiente entre o indutor e transformador, evitando a formação de óxidos nas áreas de contato.

**Regulagem da Máquina:** definida pela IR que contém os principais parâmetros de processo. Os valores de trabalho destes parâmetros são fornecidos dentro de uma faixa de tolerância, de forma a obter os resultados exigidos na ETI. Os principais parâmetros são:

- ◊ Potência.
- ◊ Tempo de aquecimento.
- ◊ Tempo de resfriamento
- ◊ Tempo de retardamento de ducha.
- ◊ Avanço(mm/seg ou valor referencial)
- ◊ Concentração e temperatura de Aquaquench.
- ◊ Distância do indutor a peça.
- ◊ Rotação da peça.
- ◊ Posição da peça em relação ao indutor e ao chuveiro.

A especificação de tratamento térmico é apresentada da seguinte forma:

MERCEDES-BENZ  
EMM.01

ET.1176 I

02/06/86 FOLHA: 001  
R.2493

**ESPECIFICACAO DE TRATAMENTO TERMICO**

DENOMINACAO: SEMI EIXO TRASEIRO - A 314 357 0501 | NORMAS MBB

357 01

- |                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| 1. MATERIAL                       | : ACO QUALIDADE 42CRMO4 NORMALIZADO,<br>COALESCIDO E BENEFICIADO PARA RM<br>980 A 1180 N/MM2.  |
| 2. ESPECIFICACAO<br>CONF. DESENHO | : TEMPERADO POR INDUCAO<br>RHT 450=6,0 A 8,0 MM<br>HRC 54 A 60   |
| 3. TRATAMENTO TERMICO             |  |
| 3.1 TEMPERA POR INDUCAO           | : CONFORME INSTRUCAO DE REGULAGEM<br>DA MAQUINA IR. 1176.  |
| 3.2 ALIVIO DE TENSOES             | : 180 OC/2 HORAS EM TEMPERATURA EM<br>FORNO ELETTRICO PROVVIDO DE CIRCULA-<br>CAO FORCADA DE AR.   |
| 4. ENSAIOS DE VERIFICACAO         | : POR AMOSTRAGEM   |
| 4.1 E M M                         | : METALOGRAFIA (PERFIL DA CAMADA<br>TEMPERADA).<br>RHT 450=6,0 A 8,0 MM<br>HRC 54 A 60<br>FREQUENCIA DOS TESTES, UMA PECA A<br>CADA INICIO DE REGULAGEM DA MAQUI-<br>NA. |
| 4.2 CONTROLE (100%)               | : HRC 54 A 60<br>ENSAIO DE MAGNAFLUX   |

**MODIFICACOES**

02.06.86 ET NOVA

LABORATORIO METALURGICO

GERENCIA - GDL  
AUTORIZADO

PREPARADO

REVISADO

Fig. 13: Especificação de tratamento térmico semi eixo A 314 357 0501

Após a preparação da máquina, é produzida uma peça que é analisada pelo laboratório (CTQ) para verificar se todas as exigências da ET-I estão sendo cumpridas:

- Profundidade da camada temperada (Pt ou Rht).
- Dureza superficial em HRC.
- Deslocamento de têmpera.
- Manchas moles.
- Existência de trincas, dobras de material, provenientes da forjaria e vazios ou bolhas no caso de ferro fundido.

Se todos estiverem aprovados, inicia-se a produção do lote. Em caso contrário, a causa da reprovação é avaliada, para então alterar os parâmetros necessários para corrigir o desvio apresentado. Procura-se, se possível, alterar somente um ou dois parâmetros de cada vez para entender melhor o comportamento do processo.

Na prática, a IR (instrução de regulagem) não leva em conta o desgaste do equipamento de têmpera por indução, e tampouco as flutuações na concentração de polímero e no material fornecido para fabricação do semi-eixo.

Este problema é em parte amenizado por um simples procedimento realizado pelos próprios operadores do equipamento. A cada novo lote de peças a ser temperado, é utilizada a última IR referente ao mesmo tipo de peça.

A IR só é alterada no caso de reprovação da primeira peça do lote, após análise do relatório do CTQ e estudo das correções necessárias. Esta instrução atualizada passa a ser então o padrão para o próximo lote que será tratado.

A instrução de regulagem é a base deste trabalho, já que através da IR anterior e da IR corrigida vamos determinar as causas das reprovações.

Também consta na IR a regulagem do fator de freqüência. Ela aparece como graduação fina e grossa ou sincronização, dependendo da máquina ,na Mercedes das duas máquinas usadas, cada uma é de um dos tipos. Esta regulagem é feita através de um painel, selecionando o número de capacitores que entrarão no circuito. Deste modo através de um indicador de sen  $\varphi$  (ao invés de cos  $\varphi$ , sendo  $\varphi$  a defasagem), tentamos anular a defasagem entre tensão e corrente.

*Tabela 2: Influência dos Parâmetros de Regulagem no Processo<sup>[2]</sup>*

Aumento de	Resultado
Potência	Aumenta temperatura superficial e profundidade da camada.
Tempo de aquecimento	Idem Potência e proporciona o aquecimento por condução.
Retardamento de Ducha	Reduz probabilidade de trincas Aumenta a “sombra” Diminui a dureza
Avanço	Diminui a camada, temperatura e dureza
Concentração ou Temperatura do AQUAQUENCH	Diminui velocidade de resfriamento Diminui risco de trincas Diminui dureza
Distância Indutor até a peça	Diminui temperatura superficial Diminui profundidade de camada Diminui rendimento do indutor
Pressão da Ducha	Aumenta velocidade de resfriamento
Rotação da peça no aquecimento	Melhor uniformidade de aquecimento
Rotação da peça no resfriamento	Dificulta o resfriamento em regiões “escondidas”

A IR segue o seguinte modelo:

DAIMLERCHRYSLER-SBC GED. 01	M A T R I Z IR	16/09/02	FOLHA: 001 R. 8593																																																																																						
REF. IR																																																																																									
PECA: Semi-eixo NUM : 360 357 1601		MBB 12771	DATA 16/09/02	CAC APROV NUM: 12256	CAC REFERENTE NUM:																																																																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>BASE</th> <th>CORPO</th> <th>ESTRIA</th> <th>CORPO</th> <th>ESTRIA</th> <th>RESFR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>REGULAGEM</td> <td>85Kw</td> <td>100Kw</td> <td>-</td> <td>100Kw</td> <td>90 Kw</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>DAS</td> <td>26 %</td> <td>46%</td> <td>-</td> <td>46%</td> <td>42%</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>POTENCIAS</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>-</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>REGULAGEM DOS AVANCOS MM/S - RPM</td> <td>-</td> <td>8,0mm/s</td> <td>-</td> <td>5,2mm/s</td> <td>5,2 mm/s</td> <td>12 mm/s</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>1</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>TEMPO DE AQUECIMENTO</td> <td>9,0 s</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>DISTANCIA INDUTOR-BASE</td> <td>0,5 mm</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>GRADUACAO FINA:</td> <td>4</td> <td>GRADUACAO GROSSA:</td> <td>4</td> <td>SINCRONIZACAO:</td> <td>-</td> <td></td> </tr> <tr> <td>PREPARACAO:</td> <td>Ariovaldo</td> <td>APROVACAO:</td> <td>Sebastiao</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>OBS:-</td> <td colspan="5">Indutor f375210873534</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>							BASE	CORPO	ESTRIA	CORPO	ESTRIA	RESFR	REGULAGEM	85Kw	100Kw	-	100Kw	90 Kw	-	DAS	26 %	46%	-	46%	42%	-	POTENCIAS	1	2	-	2	3	-	REGULAGEM DOS AVANCOS MM/S - RPM	-	8,0mm/s	-	5,2mm/s	5,2 mm/s	12 mm/s	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	2	2	3	TEMPO DE AQUECIMENTO	9,0 s	-	-	-	-	-	DISTANCIA INDUTOR-BASE	0,5 mm	-	-	-	-	-	GRADUACAO FINA:	4	GRADUACAO GROSSA:	4	SINCRONIZACAO:	-		PREPARACAO:	Ariovaldo	APROVACAO:	Sebastiao				OBS:-	Indutor f375210873534					
	BASE	CORPO	ESTRIA	CORPO	ESTRIA	RESFR																																																																																			
REGULAGEM	85Kw	100Kw	-	100Kw	90 Kw	-																																																																																			
DAS	26 %	46%	-	46%	42%	-																																																																																			
POTENCIAS	1	2	-	2	3	-																																																																																			
REGULAGEM DOS AVANCOS MM/S - RPM	-	8,0mm/s	-	5,2mm/s	5,2 mm/s	12 mm/s																																																																																			
-	-	-	-	-	-	-																																																																																			
-	1	-	-	2	2	3																																																																																			
TEMPO DE AQUECIMENTO	9,0 s	-	-	-	-	-																																																																																			
DISTANCIA INDUTOR-BASE	0,5 mm	-	-	-	-	-																																																																																			
GRADUACAO FINA:	4	GRADUACAO GROSSA:	4	SINCRONIZACAO:	-																																																																																				
PREPARACAO:	Ariovaldo	APROVACAO:	Sebastiao																																																																																						
OBS:-	Indutor f375210873534																																																																																								

*Fig. 14: Instrução de Regulagem da máquina 12771 para semi eixo A 360 357 1601*

Mercedes-Benz do Brasil S.A.

Folha: 1

Area/Nome  
GED-2514 GRUPO PYRO TA/TB

Data  
16/09/02

MEMO-Referencial: 0012256/2002

T3013 CONTROLE DE ATENDIMENTO A CLIENTES  
CAC-ATEND Comunicacao de Ocorrencias

----- Dados da Ocorrencia -----

Numero.....: 12256/2002 Central: 010-CTQ-ATENDE  
Responsavel: F031080 - MILTON RAMOS DOS SANTOS

Cliente....: 29020000/DAIMLERCHRYSLER DO BRASIL LTDA.  
Dt Cliente.: 16/09/02 Hora: 10:24 Data Prevista: 16/09/02  
Dt Inclusao: 16/09/02 Hora: 10:27  
Severidade.: 5 - analise urgente  
Solicitante: GRUPO PYRO Fone.: 07588593 8593 Area: 251.4  
N.Peca.....: A 3603571601 Forme: DCBR Qd: 700  
Referencia.: CAC - Tempera por Inducao Semi Eixo  
Ref.Cliente: f036015  
Aberta Por.: F036015 - TRAB/GRUPO Area: GED 01  
Status.....: FI - Ocorrencia Fechada. Cliente Informado.  
Classif....: 007 - analise preventiva de produto/processo

----- Descricao Detalhada -----

	G	E	D
Data :	16/09/02		
Nome da Peca :	semi-eixo		
Numero da Maquina :	12771		
Observacoes :			

	C	T	Q
Pt :	corpo : 8,6 a 12,0 mm (*)		
	raio : 8,5 mm		
	base : 3,6 mm		
	saida : 2,5 mm		
	diametro : 82,0 mm		

Observacoes : (\*) proximo a flange

Descricao : Semi eixo, material aco sup. escura.

Identificacao : 360.357.1601

RHT (464) : 9,45 mm

Dureza Rockwell : HRC 150 = 59,0 Rc

Dureza Brinell : HBS 5/750 = 285

Laudo : ( X ) APROVADO  
( ) REPROVADO

ANALISTAS : MILTON

Fig. 15: Relatório de Análise (CTQ- atende)

## **9. VERIFICAÇÕES E PROVIDÊNCIAS DE ROTINA**

Diariamente:

- Funcionamento de galvanômetros e controladores de processo.
- Comparar valores obtidos com os valores da IR.
- Vazamentos de água pelo indutor, chuveiro, mangueiras e transformador.
- Temperatura e concentração da solução de Aquaquench.
- Homogeneidade da ducha (furos alinhados e desobstruídos).
- Alinhamento do conjunto: peça/indutor/chuveiro/dispositivos.
- Luzes de controle e alarmes.
- Verificar se os fluxostatos, pressostatos e termostatos estão atuando, para proteger o gerador, capacitor, transformador e indutor.

Semanalmente:

- Limpeza dos filtros.
- Contaminação da solução.
- Formação de óxidos nas áreas de contato.

## **10. BENEFICIAMENTO**

O tratamento de têmpera por indução muda apenas as propriedades da superfície da peça. Ele sozinho, não é suficiente para adequar a peça (neste caso o semi-eixo) as condições de trabalho. O núcleo também precisa ter suas propriedades melhoradas.

O tratamento efetuado não faz parte do escopo deste trabalho, mas precisa ser citado pois é parte integrante do processo de fabricação do semi-eixo.

O semi-eixo sofre antes da têmpera por indução um tratamento de beneficiamento. Este tratamento consiste em aquecer o semi-eixo até a temperatura de austenitização, aproximadamente 850 °C em forno contínuo com atmosfera endotérmica protetora (gerada a partir de uma mistura de ar e propano), e em seguida temperá-lo em óleo.

Esta têmpera deve ser feita em prensas especiais que possam manter a integridade dimensional do semi-eixo minimizando o seu empenamento. Em seguida, é feito um revenimento em alta temperatura (550 °C) que tem dois objetivos; aliviar as tensões geradas na têmpera e nas operações de usinagem que precederam o tratamento, e formar uma estrutura martensítica de baixa dureza no núcleo, fazendo com que tenha boa ductilidade e resistência mecânica. Em seguida,

## 11. ENDIREITAMENTO E ALÍVIO DE TENSÕES

Após a têmpera por indução, o aço apresenta uma estrutura martensítica, com elevado nível de tensões residuais, a qual é frágil com baixa resistência ao impacto e sujeita a trincas.

O alívio de tensões consiste em aquecer o aço a temperaturas entre 150 e 200 °C por um período de uma a duas horas. É o segundo processo de revenimento, só que em temperaturas mais baixas pois não queremos amolecer demais a martensita formada na superfície. O ideal é que seja feito logo após a têmpera e em estufas com circulação forçada de ar. Em alguns casos, é necessário endireitar algumas peças antes do alívio de tensões.



Fig. 16: Estufa de revenimento



Fig. 17: Prensa de endireitamento

## **12. REVENIMENTO POR INDUÇÃO**

Tem o mesmo objetivo do alívio de tensões, com a vantagem de poder ser feito apenas em determinadas regiões da peça em tempo muito mais curto, se comparado com a operação feita em estufas.

A fim de evitar deformações excessivas e trincas, o aquecimento é feito lentamente e com baixos níveis de potência se comparados aos utilizados para a têmpera por indução.

Em qualquer situação, seja na têmpera ou no revenimento por indução, é necessário ter cuidado com a geometria da peça, evitando que regiões mais finas atinjam temperaturas superiores ao especificado, favorecendo o aparecimento de trincas.

Tradicionalmente, o revenimento por indução é feito em máquinas específicas para esta finalidade. Hoje em dia, é possível no caso de têmpera por indução, fazer o revenimento sem nenhuma etapa adicional no processo de têmpera.

Através do controle do resfriamento, é possível fazer com que o núcleo permaneça a uma certa temperatura, provocando o recalescimento da camada temperada, este último sendo então responsável pelo revenimento. Esta técnica é chamada de auto-revenimento.

## **13. DADOS EXPERIMENTAIS**

É importante mencionar que o tratamento busca adequar o semi-eixo de aço DIN 42CrMo4 (SAE/AISI 4140) às solicitações as quais será submetido quando posto em operação. A curva TTT deste aço aparece na figura seguinte.

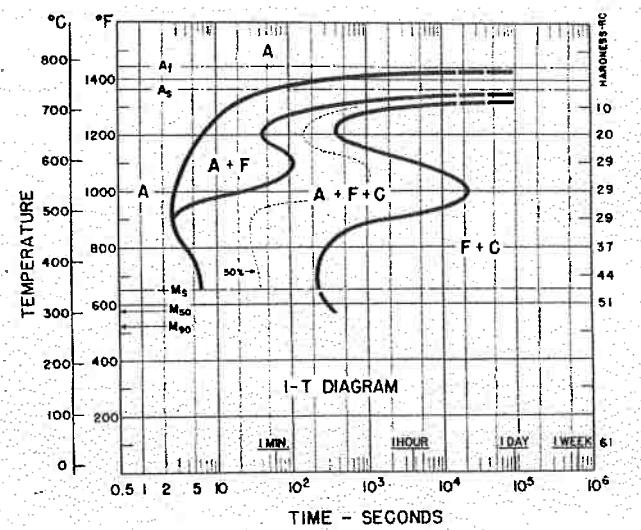


Fig. 18: Curva TTT do aço SAE 4140<sup>[9]</sup>

Os dados que serão analisados foram coletados dos registros diários de produção do tratamento térmico por indução. Eles são referentes à peças reprovadas após serem analisadas pelo laboratório. As peças analisadas são sempre as primeiras de um determinado lote. Em seguida são analisadas as causas de reprovação e as devidas correções são efetuadas na máquina, através da instrução de regulagem, para que a produção pudesse ser retomada. Após a correção da IR, uma segunda peça é temperada e controlada pelo laboratório, no caso de nova reprovação, repete-se a análise. Se a peça atender às especificações, a IR é confirmada e o restante do lote tratado.

No laboratório é usado um formulário como o mostrado na figura 19, no qual o técnico anota os resultados das medições efetuadas. Este formulário é exclusivo de cada peça e traz informações sobre as tolerâncias e o posicionamento da camada temperada. A figura 19 é um modelo para o semi-eixo 360 357 1601, no qual podemos ver que existem variações de camadas em várias regiões da peça.

Existem quatro grandes regiões distintas; **P**- profundidade da camada no corpo da peça, **S** – saída (final da peça), **B** – base (penetração na flange), **D** – diâmetro total da camada na flange.

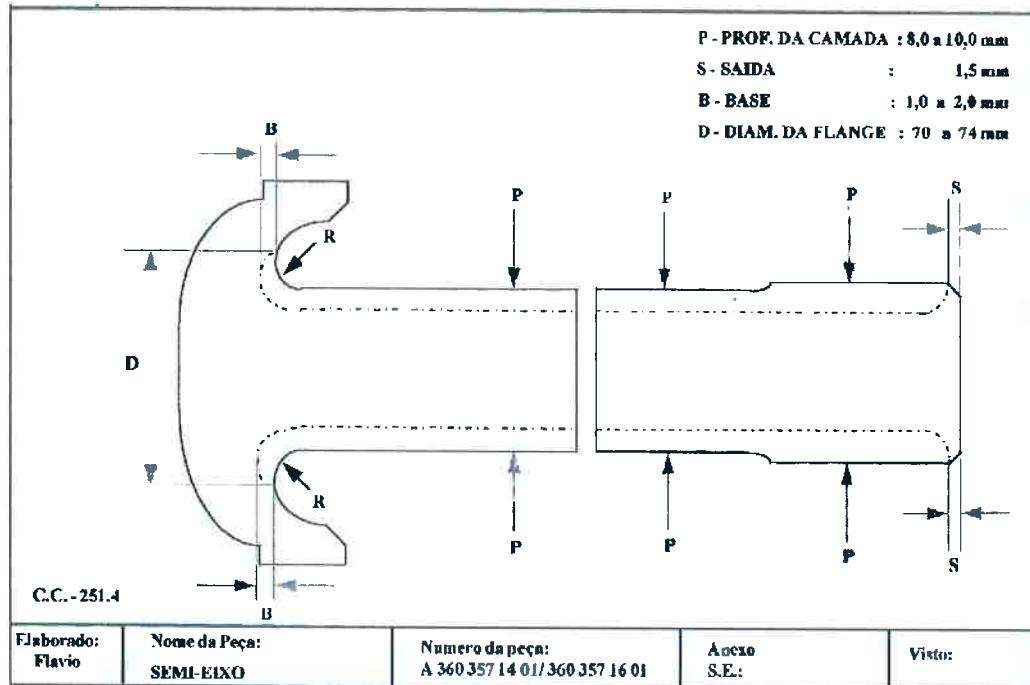


Fig.19: Macrografia

A primeira peça a ser analisada é o semi-eixo de número 314 357 0501. A sua ET-I (especificação de tratamento) é a numero 1176 e fornece os seguintes limites para as IR:

Tabela 3: Exemplo de limites de regulagem da máquina 15458 para a peça 314 357 0501

Nº Indutor	75200917485	Nº chuveiro	75520917486
Potencia 1 (kW)	55 - 70	Velocidade 1 (rpm)	300 - 340
Potencia 2 (kW)	85 - 100	Velocidade 2 (rpm)	320 - 360
Potencia 3 (kW)	75 - 90	Velocidade 3 (rpm)	700 - 800
Potencia 4 (kW)	-	Velocidade 4 (rpm)	-
Tempo de pré-aquecimento (s)	6 - 8	Distancia Indutor / Flange (mm)	1,5 – 2,0
Sincronização	9		

Se a máquina não conseguir mais atingir a camada e a dureza especificada para estes limites de regulagem, se torna necessária a realização de uma manutenção; corretiva. Isto não é desejável, pois é necessário interromper a produção para que se faça a intervenção.

Tabela 4: Primeiro caso de reprovação

IR reprovada		Semi eixo 360 357 1601 / máquina 12771					
		BASE	CORPO	ESTRIA	CORPO	ESTRIA	RESFR
Regulagem das potencias	85 KW	95 KW	90 KW	-	-	-	-
	22 %	40 %	41 %	-	-	-	-
	1	2	3	-	-	-	-
Regulagem dos avanços	-	8,0 mm/s	5,2 mm/s	-	-	12 mm/s	
	-	-	-	-	-	-	-
	-	1	2	-	-	3	
Tempo de aquec.	10,0 s	-	-	-	-	-	-
Distancia ind./flange	0,5 mm	-	-	-	-	-	-
Graduação Fina: 4		Graduação Grossa: 4		Sincronização: -			

Motivo da reprovação: região com 13 mm de camada temperada junto a flange

IR Aprovada		BASE	CORPO	ESTRIA	CORPO	ESTRIA	RESFR
Regulagem das potencias	85	95	90	-	-	-	-
	22%	40%	41%	-	-	-	-
	1	2	3	-	-	-	-
Regulagem dos avanços	-	8,0 mm/s	5,2 mm/s	-	-	12 mm/s	
	-	-	-	-	-	-	-
	-	1	2	-	-	3	
Tempo de aquec.	9,0 s	-	-	-	-	-	-
Distancia ind./flange	0,5 mm	-	-	-	-	-	-
Graduação Fina: 4		Graduação Grossa: 4		Sincronização: -			

Tabela 5: Segundo caso de reprovação

IR reprovada		Semi eixo 360 357 1601 / máquina 12771					
		BASE	CORPO	ESTRIA	CORPO	ESTRIA	RESFR
Regulagem das potencias	85 KW	95 KW	90 KW	-	-	-	-
	22 %	40 %	41 %	-	-	-	-
	1	2	3	-	-	-	-
Regulagem dos avanços	-	8,0 mm/s	5,2 mm/s	-	-	12 mm/s	
	-	-	-	-	-	-	
	-	1	2	-	-	-	3
Tempo de aquec.	9,0 s	-	-	-	-	-	-
Distancia ind./flange	0,5 mm	-	-	-	-	-	-
Graduação Fina: 4	Graduação Grossa: 4			Sincronização: -			

Motivo da reprovação: Região próxima a flange com apenas 7,7 mm de camada.

IR aprovada		BASE	CORPO	ESTRIA	CORPO	ESTRIA	RESFR
Regulagem das potencias	85 KW	95 KW	90 KW	-	-	-	-
	26 %	44 %	44 %	-	-	-	-
	1	2	3	-	-	-	-
Regulagem dos avanços	-	8,0 mm/s	5,0 mm/s	-	-	12 mm/s	
	-	-	-	-	-	-	
	-	1	2	-	-	-	3
Tempo de aquec.	9,0 s	-	-	-	-	-	-
Distancia ind./flange	0,5 mm	-	-	-	-	-	-
Graduação Fina: 4	Graduação Grossa: 4			Sincronização: -			

Tabela 6: Terceiro caso de reprovação

IR reprovada		Semi eixo 360 357 1601 / máquina 12771					
		BASE	CORPO	ESTRIA	CORPO	ESTRIA	RESFR
Regulagem das potencias	85 KW	100 KW	90 KW	-	-	-	-
	26 %	44 %	44 %	-	-	-	-
	1	2	3	-	-	-	-
Regulagem dos avanços	-	8,0 mm/s	5,0 mm/s	-	-	12 mm/s	
	-	-	-	-	-	-	
	-	1	2	-	-	-	3
Tempo de aquec.	9,0 s	-	-	-	-	-	-
Distancia ind./flange	0,5 mm	-	-	-	-	-	-
Graduação Fina: 4		Graduação Grossa: 4		Sincronização: -			

Motivo da reprovação: RHT = 10,5 mm (maior do que o especificado)

IR aprovada		BASE	CORPO	ESTRIA	CORPO	ESTRIA	RESFR
Regulagem das potencias	85 KW	100 KW	90 KW	-	-	-	-
	26 %	44 %	42 %	-	-	-	-
	1	2	3	-	-	-	-
Regulagem dos avanços	-	8,0 mm/s	5,2 mm/s	-	-	12 mm/s	
	-	-	-	-	-	-	
	-	1	2	-	-	-	3
Tempo de aquec.	9,0 s	-	-	-	-	-	-
Distancia ind./flange	0,5 mm	-	-	-	-	-	-
Graduação Fina:	4	Graduação Grossa:	4	Sincronização: -			

Tabela 7: Quarto caso de reprovacão

IR reprovada		Semi eixo 360 357 1601 / máquina 15458					
		BASE	CORPO	ESTRIA	CORPO	ESTRIA	RESFR
Regulagem das potencias	90 KW	100 KW	90 KW	-	-	-	-
	62 %	84 %	73 %	-	-	-	-
	1	2	3	-	-	-	-
Regulagem dos avanços	-	220 rpm	200 rpm	-	-	600 rpm	
	-	-	-	-	-	-	
	-	1	2	-	-	3	
Tempo de aquec.	9,0 s	-	-	-	-	-	-
Distancia ind./flange	0,5 mm	-	-	-	-	-	-
Graduação Fina:	-	Graduação Grossa:	-	Sincronização:	7		

Motivo da reprovacão: camada temperada abaixo do especificado.

IR aprovada		BASE	CORPO	ESTRIA	CORPO	ESTRIA	RESFR
Regulagem das potencias	90 KW	100 KW	90 KW	-	-	-	-
	62 %	84 %	73 %	-	-	-	-
	1	2	3	-	-	-	-
Regulagem dos avanços	-	220 rpm	180 rpm	-	-	600 rpm	
	-	-	-	-	-	-	
	-	1	2	-	-	3	
Tempo de aquec.	9,0 s	-	-	-	-	-	-
Distancia ind./flange	0,5 mm	-	-	-	-	-	-
Graduação Fina:	-	Graduação Grossa:	-	Sincronização:	7		

Tabela 8: Quinto caso de reprovação

IR reprovada		Semi eixo 360 357 1601 / máquina 15458					
		BASE	CORPO	ESTRIA	CORPO	ESTRIA	RESFR
Regulagem das potencias	90 KW	100 KW	85 KW	-	-	-	-
	62 %	84 %	73 %	-	-	-	-
	1	2	3	-	-	-	-
Regulagem dos avanços	-	220 rpm	180 rpm	-	-	600 rpm	
	-	-	-	-	-	-	
	-	1	2	-	-	3	
Tempo de aquec.	9,0 s	-	-	-	-	-	-
Distancia ind./flange	0,5 mm	-	-	-	-	-	-
Graduação Fina:	-	Graduação Grossa:	-	Sincronização: 7			

**Motivo da reprovação:** Profundidade da camada abaixo do especificado na região próxima da flange.

IR aprovada		BASE	CORPO	ESTRIA	CORPO	ESTRIA	RESFR
Regulagem das potencias	90 KW	100 KW	85 KW	-	-	-	-
	62 %	84 %	73 %	-	-	-	-
	1	2	3	-	-	-	-
Regulagem dos avanços	-	220 rpm	180 rpm	-	-	600 rpm	
	-	-	-	-	-	-	
	-	1	2	-	-	3	
Tempo de aquec.	10,0 s	-	-	-	-	-	-
Distancia ind./flange	0,5 mm	-	-	-	-	-	-
Graduação Fina:	-	Graduação Grossa:	-	Sincronização: 7			

Tabela 9: Sexto caso de reprovação

IR reprovada		Semi eixo 360 357 1601 / máquina 15458									
		BASE	CORPO	ESTRIA	CORPO	ESTRIA	RESFR				
Regulagem das potencias	90 KW	100 KW	85 KW	-	-	-	-				
	64 %	84 %	74 %	-	-	-	-				
	1	2	3	-	-	-	-				
Regulagem dos avanços	-	200 rpm	180 rpm	-	-	600 rpm	-				
	-	-	-	-	-	-	-				
	-	1	2	-	-	-	3				
Tempo de aquec.	10,0 s	-	-	-	-	-	-				
Distancia ind./flange	0,5 mm	-	-	-	-	-	-				
Graduação Fina: -	Graduação Grossa: -			Sincronização: 7							
Motivo da reprovação:	Camada e RHT abaixo do especificado e Saída acima do especificado										
-----											
IR aprovada		BASE	CORPO	ESTRIA	CORPO	ESTRIA	RESFR				
Regulagem das potencias	90 KW	100 KW	85 KW	-	-	-	-				
	68 %	90 %	74 %	-	-	-	-				
	1	2	3	-	-	-	-				
Regulagem dos avanços	-	180 rpm	160 rpm	-	-	600 rpm	-				
	-	-	-	-	-	-	-				
	-	1	2	-	-	-	3				
Tempo de aquec.	10,0 s	-	-	-	-	-	-				
Distancia ind./flange	0,5 mm	-	-	-	-	-	-				
Graduação Fina: -	Graduação Grossa: -			Sincronização: 7							

Tabela 10: Sétimo caso de reprovação

IR reprovada		Semi eixo 360 357 1601 / máquina 15458					
		BASE	CORPO	ESTRIA	CORPO	ESTRIA	RESFR
Regulagem das potencias	90 KW	100 KW	85 KW	-	-	-	-
	68 %	90 %	74 %	-	-	-	-
	1	2	3	-	-	-	-
Regulagem dos avanços	-	180 rpm	160 rpm	-	-	-	600 rpm
	-	-	-	-	-	-	-
	-	1	2	-	-	-	3
Tempo de aquec.	10,0 s	-	-	-	-	-	-
Distancia ind./flange	0,5 mm	-	-	-	-	-	-
Graduação Fina: -		Graduação Grossa: -		Sincronização: 7			

Motivo da reprovação: Região próxima a flange com camada acima da especificada.

IR aprovada		BASE	CORPO	ESTRIA	CORPO	ESTRIA	RESFR
Regulagem das potencias	90 KW	100 KW	85 KW	-	-	-	-
	62 %	90 %	74 %	-	-	-	-
	1	2	3	-	-	-	-
Regulagem dos avanços	-	200 rpm	160 rpm	-	-	-	600 rpm
	-	-	-	-	-	-	-
	-	1	2	-	-	-	3
Tempo de aquec.	10,0 s	-	-	-	-	-	-
Distancia ind./flange	0,5 mm	-	-	-	-	-	-
Graduação Fina: -		Graduação Grossa: -		Sincronização: 7			

## 14. TRATAMENTO DOS DADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico vamos discutir as correções feitas nas instruções de regulagem, em função das reprovações de laboratório. Dependendo do desvio apresentado pela peça, não é necessária a reprovação, mas consta no relatório algum ajuste a fazer. Isto acontece muito com a “saída” (figura 19) que é regulada a olho pelo operador que deve “imaginar” o local de incidência da ducha na peça, pois esta é a referência para esta regulagem (padrão para todas as peças). A peça acompanhada foi o semi-eixo A 360 357 1601 temperado em duas máquinas distintas, MBB 12771 e MBB 15458, sendo as duas máquinas muito semelhantes entre si.



Fig. 20: máquina de têmpera por indução

A primeira reprovação apresentada é a da tabela 4. Neste caso, o motivo da reprovação foi um excesso de camada temperada na região próxima à flange, resultando na formação da chamada “barriga”. Esta barriga é prejudicial às propriedades da peça já que a espessura do núcleo que garante a tenacidade do semi-eixo fica reduzida. Ela é formada por um aquecimento excessivo da região adjacente à flange. Isto acontece por causa do tempo em que o indutor permanece estacionário durante o aquecimento da flange. Quando o indutor entra o movimento, ele percorre uma região que foi aquecida por condução térmica. Na passagem do indutor, este fornece mais energia ao local que acaba sendo aquecido

demasiadamente e resultando em uma camada temperada muita espessa. Para reduzir o aquecimento, é necessário diminuir a potencia fornecida a peça (já que a freqüência é fixa) ou então aumentar o avanço do indutor na passagem pela região em questão para evitar os efeitos de condução de calor.

O segundo caso de reprovação, apresentado na tabela 5, teve como motivo o inverso do caso anterior. Ao invés da formação de barriga, houve insuficiência da camada temperada. A região próxima à flange (figura 21) estava com apenas 7,7 mm e o restante do corpo do semi-eixo muito próximo da tolerância mínima permitida (8,0 mm). Para corrigir este problema foram feitas duas pequenas correções, o aumento da potencia aplicada no aquecimento da flange, aumentando a condução de calor para a região assinalada na figura 21, assim como a redução do avanço do indutor na passagem por ela. A potencia aplicada foi aumentada de 22 % para 26 % na flange e de 40 para 41 % no corpo. Apesar deste aumento, o registrador não mostrou alteração significativa da potencia em kilowatts. Podemos ver também que apesar da potencia três aparecer com porcentagem maior que a potencia dois, o valor nominal é inferior. Isto é devido a diferença de sensibilidade dos potencióstatos. O avanço que era de 5,2 mm/s foi reduzido para 5,0mm/s.

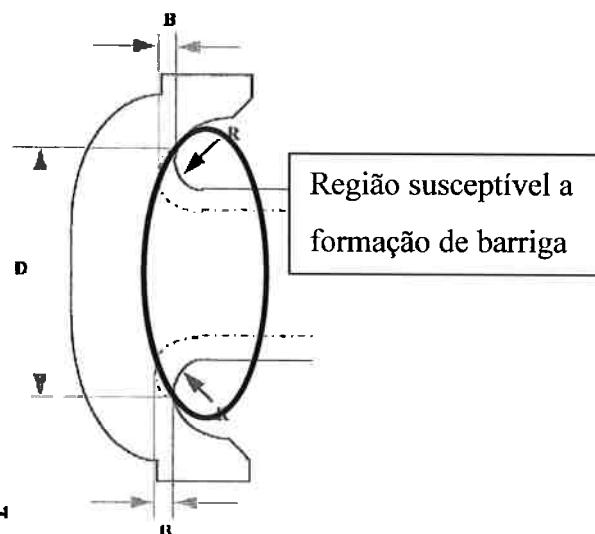


Fig.21: Região afetada pelo aquecimento com indutor estacionário.

Posteriormente esta alteração precisou ser desfeita, pois na terceira reprovação (tabela 6) o RHT, que é medida pela dureza da profundidade efetiva de têmpera, apresentou valores acima da especificação. As tolerâncias são as mesmas que para a camada temperada medida visualmente, isto é de 8,0 a 10,0 mm. O valor medido foi de 10,5 mm.

Como os demais parâmetros controlados estavam dentro das especificações, ajustou-se apenas a velocidade (avanço) do indutor na região do corpo da peça, aumentando-o de 5,0 para 5,2 mm/s.

Continuando o acompanhamento do mesmo semi-eixo (360 357 1601), mas agora em outra máquina, MBB 15458, vemos na tabela 7, que a profundidade de camada ficou abaixo do especificado atingindo 7,1 mm quando o mínimo permitido é de 8,0 mm. Camada insuficiente é sinônimo de baixa penetração do aquecimento. Isto pode ser solucionado de diversas formas, seja aumentando a potencia fornecida, seja diminuindo o avanço, seja diminuindo a freqüência (mas este parâmetro é fixo e não pode ser alterado). Neste caso, o problema foi resolvido diminuindo o avanço de 200 rpm para 180 rpm. Nesta máquina o avanço do indutor é determinado pela rotação do fuso (rosca sem fim) da máquina. Após esta correção, a medida mínima da camada temperada é de 8,2 mm no corpo do semi-eixo.

Neste caso de reprovação, tabela 8, vemos que assim como no caso 2, houve o inverso da formação da barriga. O problema pode ser solucionado pela redução do avanço do indutor na transição da flange para o corpo do semi-eixo, ou pelo aumento do tempo de aquecimento da flange dando desta maneira mais tempo para a penetração por condução térmica. A solução adotada foi de aumentar o tempo de aquecimento de 9 para 10 segundos resultando em aumento da camada de 7,6 para 8,0 mm.

No sexto caso de reprovação, a IR se mostrou totalmente inadequada para o tratamento daquele lote em questão, foram três não conformidades simultâneas. O RHT e a camada temperada estavam com valores bem abaixo da especificação, e a saída da peça estava muito acima da mesma. A saída apenas, não é suficiente para reprovação da IR, mas neste caso, foi destacada por estar bem acima do que deveria. Para resolver estes problemas, foi preciso aumentar as potencias, assim como diminuir os avanços em todas as regiões da peça. Apenas o tempo de aquecimento na flange não foi alterado. Esta diferença repentina de regulagem da máquina pode ter sido devida a alguma variação da matéria prima, já que a permeabilidade magnética e a resistência elétrica; fatores que influenciam diretamente a eficiêncie e a profundidade do aquecimento; são funções diretas do material, da sua composição química e homogeneidade. O RHT e a camada que no mínimo podem ser de 8,0 mm eram de 7,85 e 7,2 respectivamente. As correções efetuadas, apresentadas na tabela 9 apresentaram os seguintes resultados, camada mínima de 8,6 e RHT de 9,65 mm.

Na sétima reprovação, temos mais uma vez a formação de barriga, atingindo 11,0 mm na região próxima à flange. Como já foi tratado anteriormente, corrigiu-se o problema aumentando o avanço do indutor na transição flange/corpo e diminuindo ligeiramente a potência ao invés do tempo de aquecimento da flange. Diminuindo também deste modo a medida de diâmetro da camada temperada na flange que já se tornava excessiva. O avanço foi aumentado de 180 rpm para 200 rpm, e a barriga foi eliminada, a camada voltou a ficar dentro da tolerância de projeto do semi-eixo.



Fig.22: Conjunto indutor + chuveiros

## **15. CONCLUSÕES**

De acordo com os dados coletados, podemos afirmar que o processo de têmpera por indução é muito preciso, confiável e razoavelmente econômico, já que as únicas peças que são perdidas são aquelas que foram cortadas para análise no laboratório. As demais, mesmo que tratadas com parâmetros errados de regulagem das máquinas, não são perdidas, pois elas necessitam apenas de um tratamento de recocimento para recuperar a estrutura e em seguida poderem ser retrabalhadas. Portanto, nos custo do processo não existem perdas por refugo, apenas de energia e mão de obra para os retrabalhos ocasionais.

As correções feitas nas instruções de regulagem são feitas pelo próprio operador sem a necessidade de uma análise muito elaborada, pois uma vez que o processo está em funcionamento, é muito simples mantê-lo assim. A experiência do preparador é suficiente para tomar as medidas corretas. Por vezes, quando o desvio for maior do que o costumeiro, como no sexto caso analisado, podem ser necessárias mais de um teste com análise (laboratório) para atingir as especificações.

O trabalho inicial para produzir um novo tipo de peça é muito mais trabalhoso pois exige uma série de cuidados, além do projeto do indutor que ainda é muito baseado em experiências prévias, sem muitos critérios a respeitar, apesar de existir uma série de recomendações a serem seguidas. A determinação dos primeiros parâmetros de regulagem para a produção de uma peça nova é feita na fase de try-outs.

Nesta etapa também é feito o acerto do fator de potência do sistema indutivo, de modo a não permitir que se torne capacitivo e nem indutivo. Na MBB 12771, o fator de potência é regulado pelo parâmetro de graduação fina (igual a 4, ver tabelas 4 a 6) e de graduação grossa (igual a 4, ver tabelas 4 a 6), já na MBB 15458, é a sincronização (igual a 7, ver tabelas 7 a 10).

Basicamente consegue-se no dia a dia do processo, controlar as potências, os avanços, o tempo e a posição do indutor, mantendo-se fixos os outros parâmetros. Como a frequência, a temperatura e a concentração do fluido de têmpera por exemplo. Este, que é

mistura de água e polímeros, tem a sua concentração e temperatura controlados diariamente, para que não se torne mais um parâmetro a controlar. assim como uma programação de filtragens e trocas a intervalos regulares.

Constatamos que de fato, o processo tem uma boa repetibilidade, pois muitas vezes passam-se vários meses antes que seja necessário fazer alguma alteração na instrução de regulagem da máquina.

## BIBLIOGRAFIA

1. Elgun, S.Z. "Hardening and Tempering". Farmingdale State University, Farmingdale, NY, USA. 17 de out, 2002. Apresenta teoria de tratamentos térmicos, Disponível em: <<http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/tempering.html>>. Acesso em 27 de out. 2002.
2. de Oliveira e Sá, I. Mendes, P.J. Peters, A. "Tempera por Indução". São Bernardo do Campo, 1997. Apostilas Mercedes-Benz do Brasil.
3. Semiatin, S.L. Stutz, D.E. "Induction Heat treatment of Steel"; Metals Park, Ohio, ASM, 1986.
4. Hocking NDT Ltd. St Albans, Herts, UK. Apresenta a teoria de indução eletromagnética de correntes. Disponível em: <[http://www.hocking.com/theory\\_testing.htm](http://www.hocking.com/theory_testing.htm)>. Acesso em 15 de nov. 2002.
5. Rudnev, V.I.; Cook, R.L. "Magnetic Flux Concentrators: Myths, Realities, and Profits". In: Metal Heat Treating, March/April, 1995.
6. Ruffini, RS. "Production and Concentration of Magnetic Flux for Induction Heating Applications" In: Industrial Heating, 41-45, Novembro 1994;
7. Fluxtrol Manufacturing, Inc. Auburn Hills, Michigan, USA. Apresenta informações sobre concentradores de fluxo magnético para aplicações em aquecimento por indução. Disponível em: <<http://www.fluxtrol.com>>. Acesso em 05 de out. 2002.
8. Hassel, P.A. Ross, N.V. "Induction Heat Treating of Steel" In: ASM Handbook, Ohio, ASM, 1991, V.4, p.164-204.
9. Inductoheat, Madison Heights, Michigan, USA. Apresenta informações e artigos sobre tecnologia e avanços em tempera por indução. Disponível em: <<http://www.inductoheat.net>>. Acesso em 05 de out. 2002.