

EQUIPAMENTO ESTÁTICO DE INDUÇÃO DA USIMINAS
- O PIONEIRO NA AMÉRICA LATINA - (1)

Vivek B. Dutta (2)
José Godoy de Abreu Filho (3)
Joaquim Nunes de Almeida (4)

O trabalho introduz conceitos e aplicações do tratamento térmico por indução a média frequência, com uso de equipamento estático, para cilindros de aço forjado. Compara-se este método com os mais conhecidos: progressivo de indução, e com chamas.

Discute-se o equipamento recentemente adquirido pela USIMINAS, comentando-se, ainda, sua flexibilidade no tratamento térmico de cilindros.

-
- (1) - Trabalho a ser apresentado no I Simpósio da COMFIT - Escola de Engenharia da UFMG - Belo Horizonte, Maio de 1980.
- (2) - Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista da Unidade de Pesquisa de Processos de Conformação do Centro de Pesquisas da USIMINAS - Ipatinga - MG.
- (3) - Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, Coordenador de Controle de Qualidade das Oficinas de Manutenção do Departamento de Manutenção da USIMINAS - Ipatinga - MG.
- (4) - Membro da ABM; Técnico Metalurgista, Supervisor da Oficina de Cilindros do Departamento de Tiras a Frio da USIMINAS - Ipatinga - MG.

1. INTRODUÇÃO

O aquecimento por indução tem sido há muito utilizado com sucesso nas indústrias siderúrgicas e oficinas de tratamentos térmicos. Para os fornecedores de cilindros de aço forjado para as laminações de tiras a frio de metais ferrosos e não ferrosos, a têmpera por indução é agora um processo indispensável para se obter as altas resistências ao desgaste e à fadiga por contato requeridas nas instalações modernas. Como resultado, a têmpera superficial é a aplicação mais comum do aquecimento por indução nos cilindros.

O aquecimento por indução é feito quando o objeto metálico (peça a ser aquecida) é colocado em um campo magnético gerado por uma bobina indutora. Esta induz uma corrente chamada "Eddy Current" dentro do próprio objeto metálico. (Figura 1a e 1b).

Esta corrente induzida tem uma peculiaridade, como está mostrada na figura 2, com a densidade da corrente sendo máxima na superfície e diminuindo rapidamente à medida que se distancia da mesma. Este fenômeno é chamado "Skin Effect".

Devido ao fenômeno de "skin effect", a camada superficial do cilindro aquece-se muito rapidamente atingindo altas temperaturas, enquanto a parte interna permanece fria, ou é levemente aquecida (através da condutividade térmica somente). Assim uma condição ideal de têmpera superficial é obtida.

Os parâmetros "input" de potência e o tempo total que o cilindro permanece na bobina, formam a base para controlar o processo a fim de se obter a dureza superficial e a penetração de dureza desejadas no cilindro (no caso de têmpera). Os mesmos parâmetros, aliados à velocidade de resfriamento, podem também ser controlados para se conseguir outras condições de tratamento térmico, como recozimento, revenimento ou alívio de tensão.

2. TIPOS DE TÊMPERA DE CILINDROS POR INDUÇÃO

Com o princípio básico de aquecimento sendo o mesmo, existem dois modos de aplicação de têmpera por indução na mesa dos cilindros.

Têmpera por Indução Progressiva

É também conhecida como têmpera por "scanning". Neste caso o cilindro a ser temperado faz dois movimentos simultâneos, gira e desloca ao longo do seu eixo (fig. 3), enquanto o indutor permanece estacionário (em alguns métodos o inverso é verdadeiro - o cilindro apenas gira em torno de seu eixo e o indutor move ao longo do comprimento da mesa). Em tal situação o calor é aplicado na superfície da mesa do cilindro progressivamente, enquanto o resfriamento é feito por meio de um dispositivo de jateamento de água montado a alguma distância do indutor.

A camada aquecida (e assim a dureza e penetração de dureza) é principalmente controlada pela potência, velocidade de deslocamento do cilindro em relação à bobina ou vice-versa, e a distância entre a bobina e o jato de água.

Têmpera por Indução Estática

"One shot heating" é também o nome dado a esta técnica. Aqui o cilindro a ser temperado gira dentro da bobina indutora (fig. 4 Stage I). O cilindro é mantido neste estágio por um tempo pré-determinado e a potência de entrada é vagarosamente aumentada de acordo com a temperatura superficial e a camada aquecida requerida. O cilindro é então, rapidamente transferido para o tanque de resfriamento por água. (Fig. 4 Stage II).

3. AVALIAÇÃO GERAL DOS MÉTODOS DE RETÊMPERA

Antes da introdução da têmpera por indução de cilindros de trabalho de aço forjado, métodos de têmpera convencionais (chama ou forno) estavam em uso. A tabela 1 faz uma comparação entre os métodos convencional e por indução estático e progressivo.

4. O EQUIPAMENTO DA USIMINAS

O Departamento de Manutenção da USIMINAS está bem entrosado com o sistema de aquecimento por indução. Com seu equipamento de

têmpera progressiva de alta frequência (4000 Hz), mais que uma década de experiência tem sido acumulada na têmpera de vários tipos de rolos, rodas, eixos, etc, pelo uso da indução. O equipamento é capaz de tratar somente peças pequenas.

No início da década de setenta foi sentida a necessidade de aquisição de um equipamento maior de têmpera por indução, a fim de retemperar os cilindros de trabalho da laminação de tiras a frio. Nesta época, a vantagem de tal processo de retêmpera e a fabulosa economia advinda de seu uso, já tinham sido comprovadas em várias usinas em todo o mundo.

Em 1975 uma longa escolha era possível entre equipamentos de vários fabricantes. Finalmente, chegou-se à conclusão que o equipamento de têmpera por indução estático era o mais apropriado a proporcionar propriedades mecânicas adequadas a cilindros retemperados para laminação a frio. O equipamento encontra-se, agora, em operação na USIMINAS em Ipatinga. Este é o primeiro do seu tipo na América Latina.

Embora o aquecimento por indução seja aplicado principalmente para a têmpera superficial de cilindros - especificamente nos métodos progressivos - este equipamento é também capaz de fazer tratamentos térmicos de recozimento, esferoidização, normalização, revenimento e alívio de tensões em cilindros. Pode tratar termicamente cilindros de aço forjado tão bem como de aço fundido e ferro fundido.

4.1. Informações Gerais sobre o Equipamento

O equipamento consiste das seguintes unidades principais, cada qual com seus controles próprios:

- Sistema de aquecimento com um conjunto de bobinas de aquecimento de diferentes diâmetros.
- Câmara de recozimento.
- Sistema de resfriamento com jateamento direto de água.
- Tanque de tratamento sub-zero.
- Fornos de revenimento (banho de óleo).

As unidades mais complexas dentre estas são o forno de aquecimento e o sistema de resfriamento.

Sistema de Aquecimento

É uma bobina indutora linear refratária (similar a um forno de fusão por indução) com seu comprimento ajustável, a fim de acomodar cilindros com diferentes comprimentos de mesa (figura 5).

O ponto "L" da bobina é fixo, enquanto seu outro terminal pode ser conectado a L_1 , L_2 ... para variar o comprimento LL_1 , LL_2 , LL_3 etc; dependendo do cilindro a ser aquecido. O aquecimento é feito pelo fornecimento de corrente de média frequência ($\pm 1000\text{Hz}$) através de uma fonte de indução (bobina). A temperatura do forno é controlada através do ajuste do "output" da fonte indutora.

A figura 6 explica o diagrama do circuito da fonte de indução, os equipamentos elétricos envolvidos e a alimentação de energia da bobina de aquecimento.

O motor-gerador recebe a energia na frequência da rede geral e a fornece com as desejáveis 1000 Hz, passando por um transformador a fim de aumentar a voltagem da bobina durante o aquecimento. Há dois conjuntos de condensadores usados em paralelo. Um é fixo (CF) e o outro é variável (CV) com a finalidade de controlar o fator de potência durante o aquecimento do cilindro.

Um suporte rotativo operado pneumaticamente é montado no muñão do cilindro. O cilindro é então suspenso verticalmente dentro da bobina para o aquecimento.

Sistema de Resfriamento

Todo o sistema de t ê mpera consiste de um reservat o rio de a gua com um dispositivo de refrigera ç ão da mesma, tanques de estocagem de a gua a alta press ã o, um conjunto de bombas e v a lvulas com o objetivo de controlar o fluxo de entrada e saida nas diferentes unidades, a fim de se conseguir a velocidade de resfriamento desejadas; tudo isto est a dirigido para a principal unidade que e o tanque de t ê mpera. A figura 7 d a uma id e ia geral do fluxo da a gua em todo o sistema.

O tanque de t ê mpera por a gua tem uma superf i cie de refrigera ç ão composta por v a rios bicos, que projetam a a gua em grande quantidade e a alta press ã o em toda a superf i cie da mesa do cilindro

simultaneamente, assim fazendo um resfriamento uniforme. No caso dos cilindros terem um furo central, há um dispositivo especial que resfria as paredes do furo durante o resfriamento da mesa.

Câmara de Recozimento

É um poço com paredes isoladas termicamente com a finalidade de controlar a velocidade de resfriamento dos cilindros no ar.

Tanque Sub-Zero

É um tanque termicamente isolado com a capacidade de acomodar dois cilindros para o tratamento sub-zero. As condições criogênicas são conseguidas usando gelo seco. Existe a previsão do uso de nitrogênio líquido com o intuito de melhorar a qualidade do tratamento e aumentar a produtividade.

Forno de Revenimento

Existem dois fornos de revenimento, cada um com capacidade de tratar quatro cilindros. Estes fornos são basicamente a banho de óleo e aquecidos por resistências elétricas.

O "layout" das várias unidades, sala de controle e fluxo do material está explicado na figura 8.

5. PROCESSO DE RETÊMPERA DE CILINDRO

O processo principal, que envolve o aquecimento da superfície do cilindro acima da temperatura de austenitização e o resfriamento rápido na água, depende do material e diâmetro do cilindro, dureza e profundidade de dureza desejadas.

Dependendo destes fatores são definidos a têmpera de austenitização, o ciclo de aquecimento e a velocidade de resfriamento.

O completo ciclo de têmpera e o envolvimento das diferentes unidades está explicada na figura 9.

6. DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS NOS CILINDROS APÓS TÊMPERA

Quando um cilindro aquecido é resfriado para endurecimento, ele desenvolve tensões residuais ao longo de suas direções longitudinal, transversal e radial. Estas tensões residuais são geradas por:

- Contração e expansão térmica (tensões térmicas).
- Expansão devido a transformação da austenita em martensita (tensão de transformação).

Estas tensões combinadas normalmente resultam em uma tensão compressiva na superfície da mesa e tensão de tração no interior. A distribuição de tensão final obtida, depende da velocidade de aquecimento, velocidade do resfriamento, profundidade endurecida e do próprio material do cilindro.

Para um cilindro frio, se a velocidade de aquecimento é muito rápida, ocorrerão trincas superficiais devido as tensões térmicas. Portanto, a princípio, um aquecimento rápido deve ser evitado quando os cilindros não são pré-aquecidos. A velocidade de aquecimento pode aumentar com a temperatura do pré-aquecimento.

Com uma velocidade menor de resfriamento a tensão é mais fraca que com uma maior velocidade. Isto está explicada na figura 10 comparando a tensão em corpos de prova similares resfriados a partir da mesma temperatura mas em água e óleo.

Com a intensão de aumentar a camada temperada, há uma tendência a aumentar a magnitude das tensões de tração internas. Se não forem devidamente controladas podem resultar na ruptura do cilindro. Isto acontece porque o gradiente de temperatura, durante o aquecimento diminui entre a superfície e o centro do cilindro. Mas a tensão de tração interna pode ser reduzida ou mesmo trocada para tensão compressiva (a qual é favorável) se o cilindro tem um furo central e este é resfriado simultaneamente com a mesa. Isto é explicado na figura 11.

Na têmpera progressiva, a distribuição de tensões é similar ao do caso IIIa.

Com a modificação dos laminadores a frio para alta velocidade e produção de tiras extra finas, há uma necessidade sempre

crescente de cilindros com dureza superficial e camada endurecida maiores. Ao mesmo tempo o cilindro deveria ter uma magnitude menor de tensão de tração na sua superfície e maior tensão compressiva na superfície. Estudando os diferentes casos na figura acima o mais favorável é o caso I Ib. Portanto o sistema estático de têmpera por indução é considerado a resposta aos usuários de cilindros sob quaisquer condições operacionais.

7. CONCLUSÃO

O equipamento estático de têmpera por indução abriu um novo capítulo no tratamento térmico de cilindros na América Latina. Ao lado da têmpera, sua diversificação para fazer outros tipos de tratamentos térmicos é um imenso apoio para a indústria siderúrgica cujo principal objetivo é produzir aço e reduzir o custo de consumo de cilindros com um mínimo de equipamentos para tratamentos térmicos. Além disto, o equipamento também oferece algumas propriedades únicas aos cilindros temperados, os quais são requeridas pelas laminações modernas mas não são possíveis de obter por outro método de têmpera.

S Y N O P S I S

The paper presents the concepts and application of heat treatment of forged steel rolls by medium frequency static induction heating. This method is compared with the more common ones (viz. progressive induction and conventional). The equipment recently purchased by USIMINAS is also discussed along with comments about its flexibility on heat treatment of rolls.

TABELA

ÍTEM	CONVENCIONAL	PROGRESSIVO BAIXA FREQUÊNCIA	ESTÁTICO MÉDIA FREQUÊNCIA
1. Fonte de Aquecimento.	- Chama direta ou forno fechado.	- Indutor de 60 Hz.	- Indutor de 1000 Hz.
2. Transferência de calor	- Por condução	- Por indução (skin effect)	- Por indução e condução
3. Perda por formação de carepa e descarbonetação superficial	- Alta. Como uma alternativa o forno deverá ter atmosfera controlada.	- Não existe.	- Máximo de 0,2 mm de profundidade na mesa. Não afeta a camada temperada
4. Controle da temperatura	- O controle de temperatura é muito difícil	- Controle muito difícil, visto que a zona de medição de temperatura muda constantemente.	- Controle fácil, pois há tempo suficiente para tomar medidas corretivas.
5. Gradiente de temperatura da parte interna do cilindro.	- Difícil controlar	- A velocidade de alimentação é restrita pelo seu próprio mecanismo, logo o gradiente de temperatura é limitado.	- É fácil de controlar
6. Velocidade de resfriamento	- Possível controlar	- A distância da unidade de jateamento de água e o volume de água são limitados a fim de evitar respingos e formação de vapor no contato com a superfície	- Controlada pelo grande volume de água a alta pressão. Dependendo da temperabilidade do material uma velocidade alta ou baixa de resfriamento pode ser programada

TABELA - SEQUÊNCIA

ÍTEM	CONVENCIONAL	PROGRESSIVO BAIXA FREQUÊNCIA	ESTÁTICO MÉDIA FREQUÊNCIA
7. Propriedades do cilindro temperado:			
. Tamanho de grão de austenita	- Existe a possibilidade de grãos grosseiros	- Obtêm-se grãos finos	- Obtêm-se grãos finos e a têmpera é feita a partir da austenita mais estável
. Uniformidade de dureza na superfície da mesa e profundidade de têmpera		- Algumas vezes é obtida uma distribuição de dureza desuniforme. Variação de dureza até 4 Hs é comum	- Uniformidade de dureza. Variação máxima 2 Hs
. Foscabilidade	- Não há dados disponíveis	- Difícil controlar a rugosidade	- Fácil controle
. Austenita retida	- Homogêneo no comprimento da mesa	- Aumenta de uma extremidade à outra	- Homogênea no comprimento da mesa
8. Pré-aquecimento	- Não oferece nenhuma vantagem	- Não é possível utilizar o calor durante o ciclo de endurecimento	- É usado. Como resultado aumenta a produtividade e reduz o consumo de energia elétrica.
9. Custo corrente	- Não há dados disponíveis	- 0,9	- 1,0
10. Possibilidade de estrago, no caso de falta de fornecimento de energia	- Baixa	- Alta	- Baixa

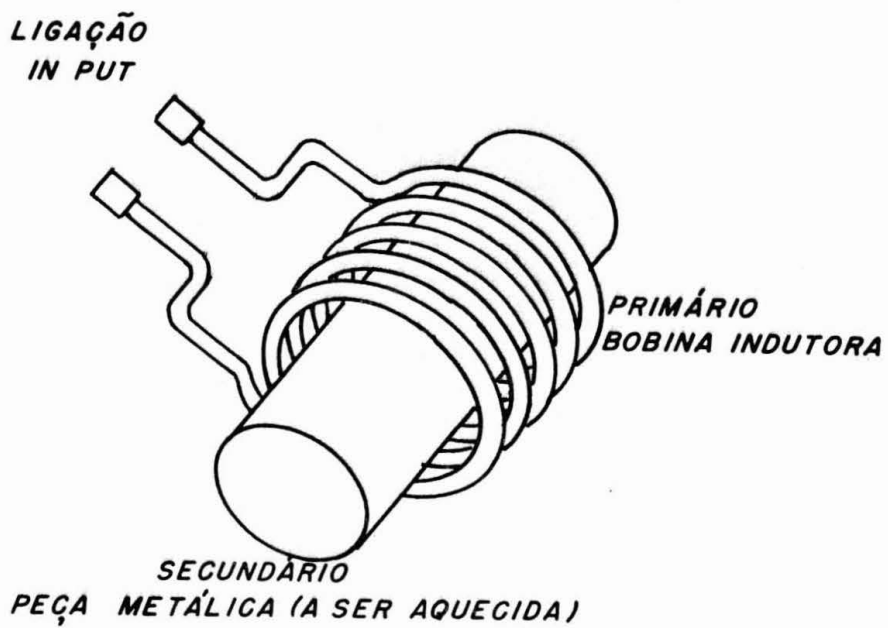


FIGURA 1 (a) PRINCÍPIO DE AQUECIMENTO POR INDUÇÃO

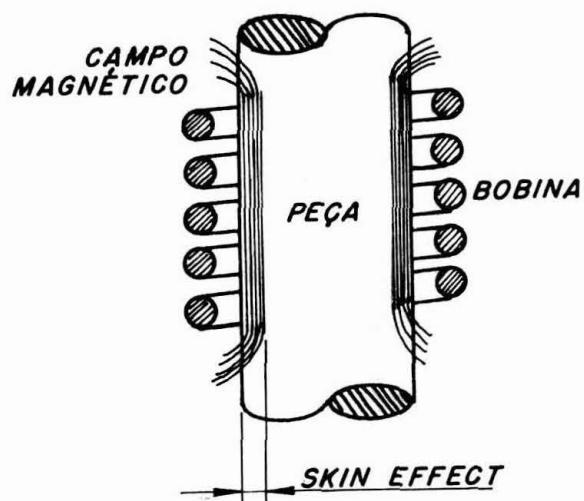


FIGURA 1 (b) - PENETRAÇÃO DE "EDDY CURRENT"
NA PEÇA.

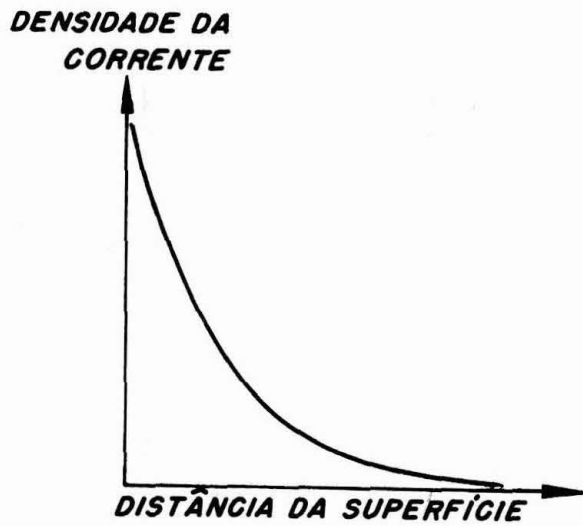


FIGURA 2- DISTRIBUIÇÃO DE DENSIDADE DE "EDDY CURRENT" NA SEÇÃO TRANSVERSAL DA PEÇA.

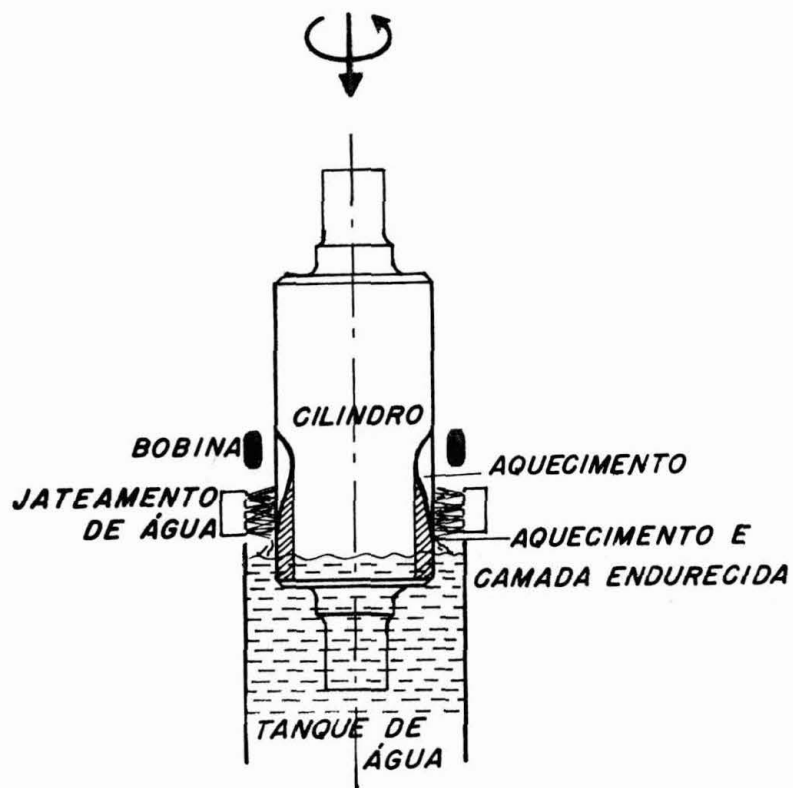


FIGURA 3 - SISTEMA DE ENDURECIMENTO DE CILINDROS POR INDUÇÃO PROGRESSIVA

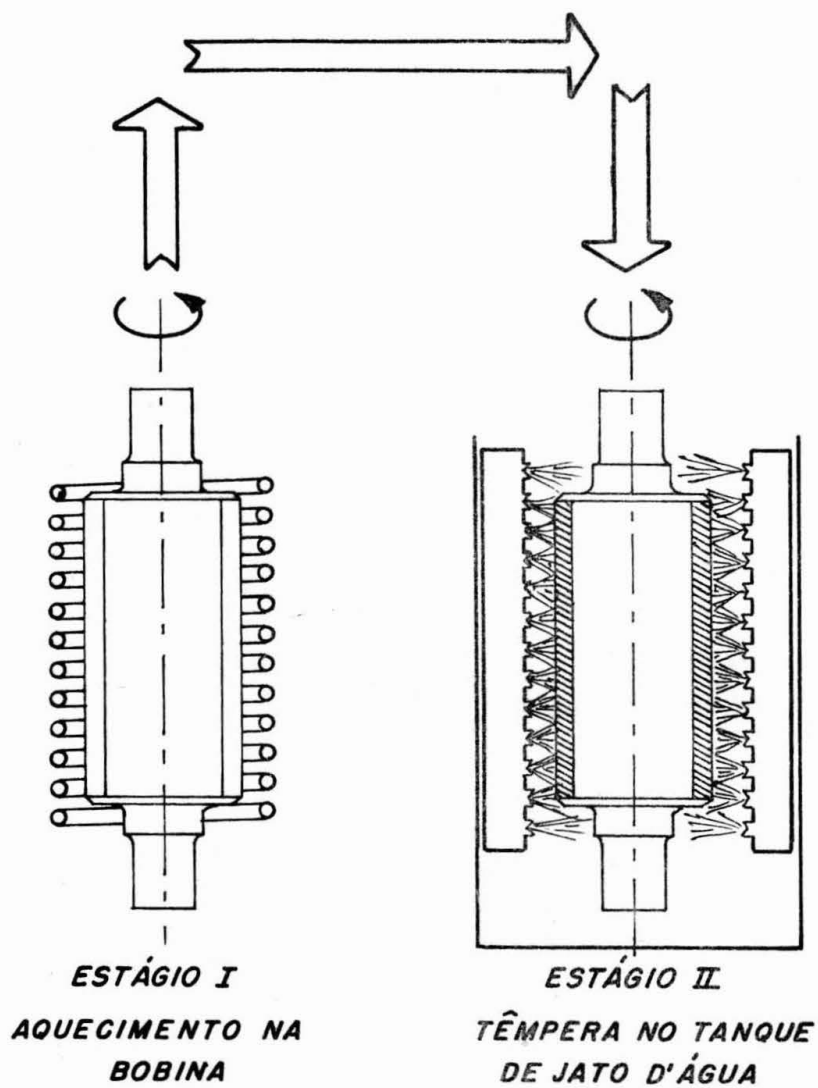


FIGURA 4— SISTEMA DE ENDURECIMENTO DE
CILINDROS POR INDUÇÃO ESTÁTICA

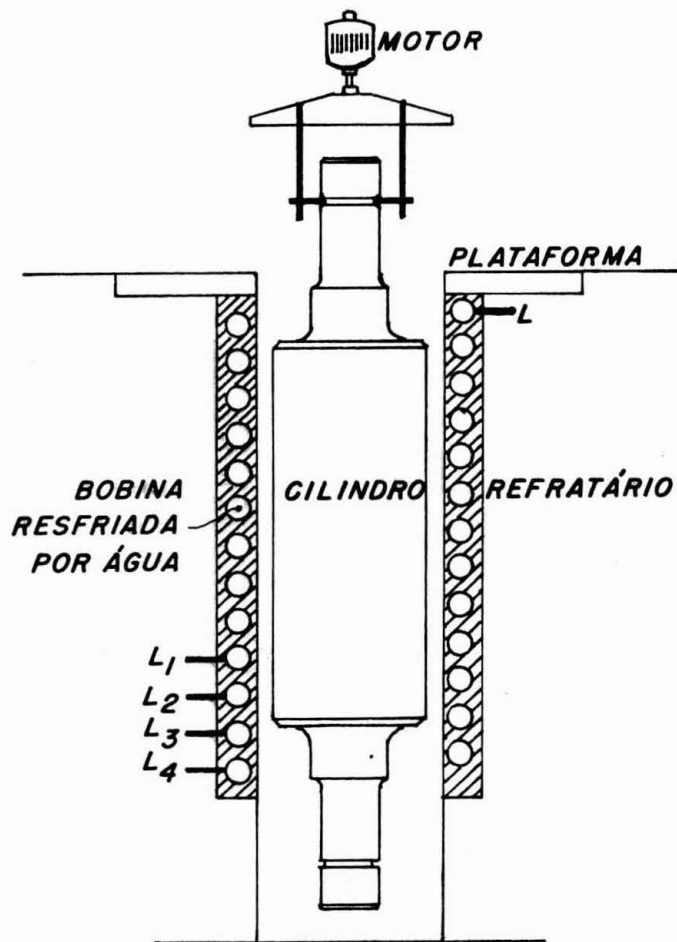
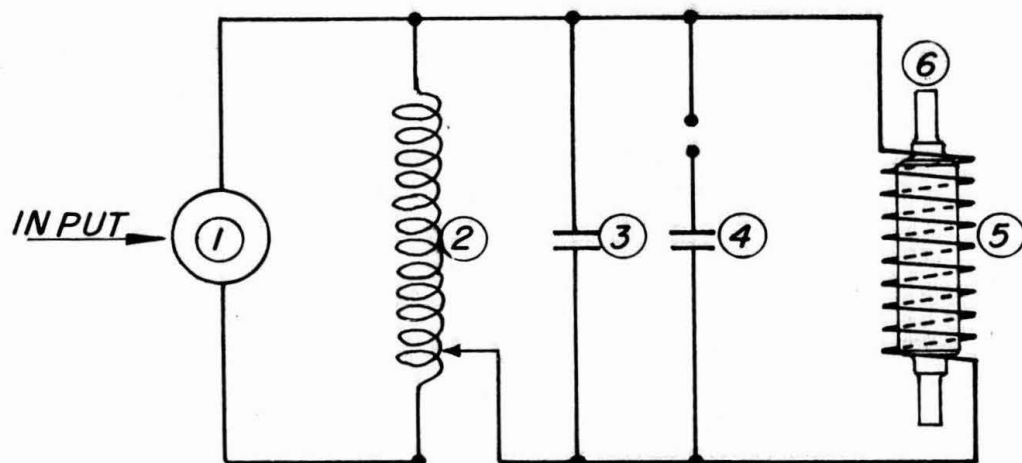


FIGURA 5- FORNO DE AQUECIMENTO



- (1)-GERADOR DE MÉDIA FREQUENCIA
- (2)-TRANSFORMADOR
- (3)-CONDENSADOR (FIXO)
- (4)-CONDENSADOR (VARIÁVEL)
- (5)-BOBINA
- (6)-CILINDRO

FIGURA 6 - SISTEMA DE AQUECIMENTO

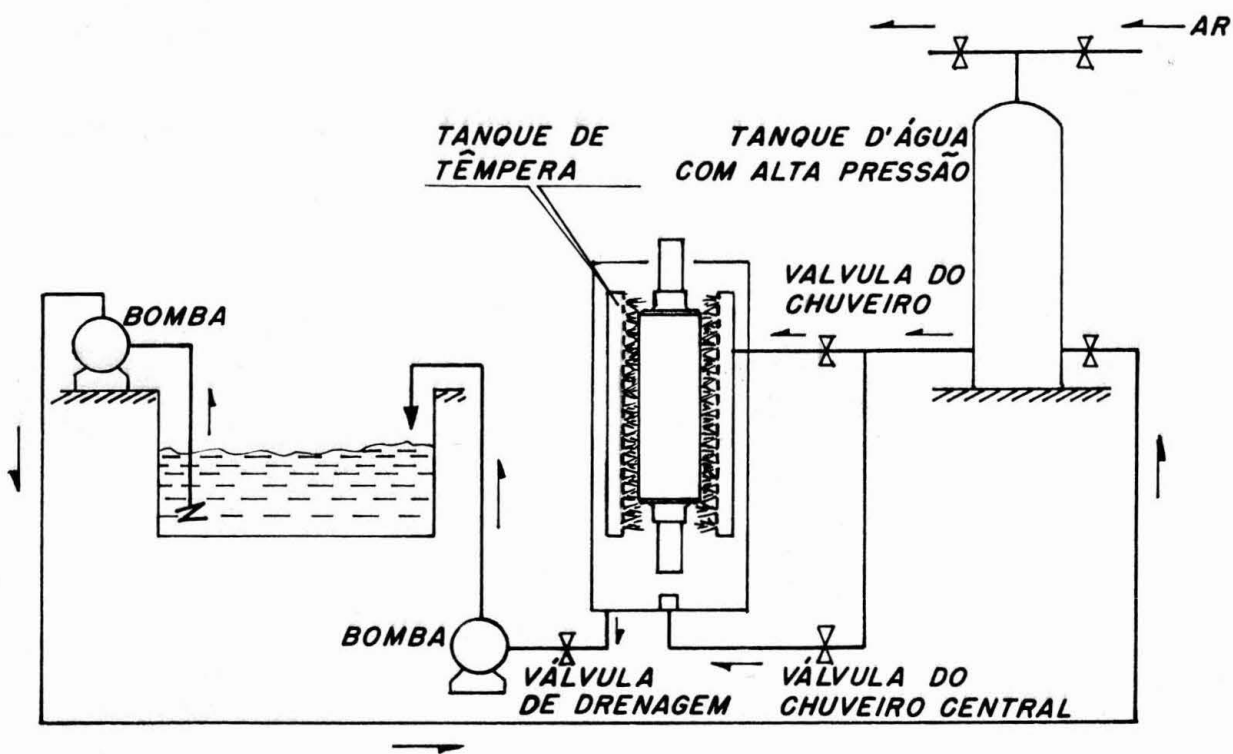
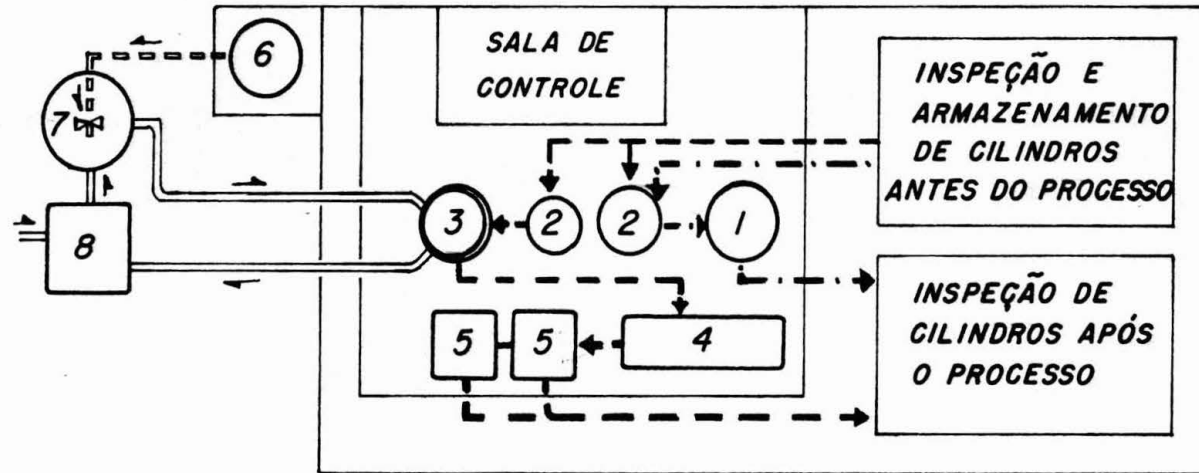


FIGURA 7 - SISTEMA DE TÊMPERA



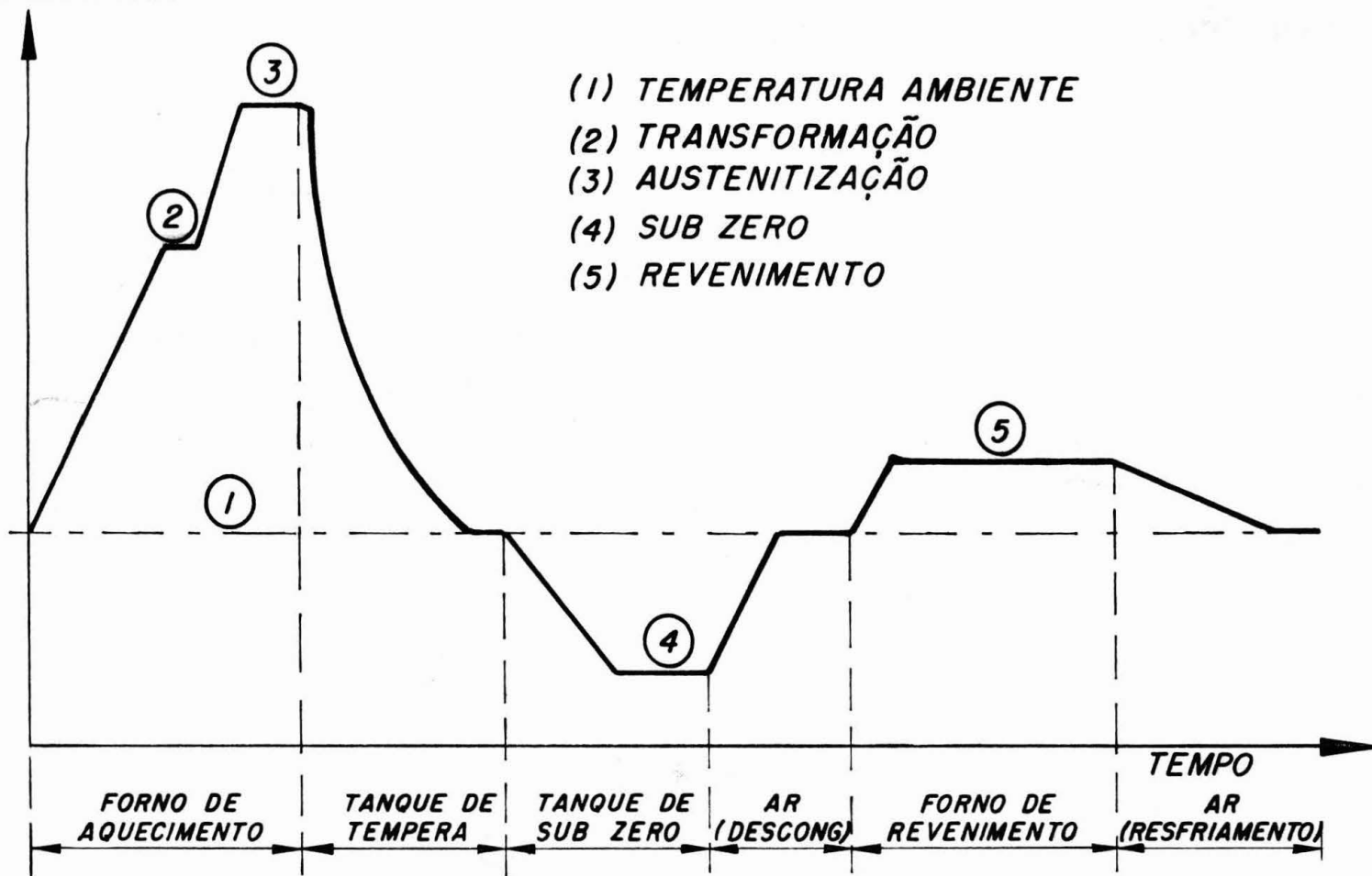
- (1) CÂMARA DE RECOZIMENTO
 (2) FORNO DE AQUECIMENTO
 (3) TANQUE DE TÊMPERA
 (4) TANQUE DE SUB-ZERO

- (5) FORNO DE REVENIMENTO
 (6) COMPRESSOR
 (7) TANQUE D'ÁGUA COM ALTA PRESSÃO
 (8) RESERVATÓRIO D'ÁGUA

==== AR
 ——— ÁGUA
 - - - - FLUXO DE TEMPERA
 - - - - FLUXO DE RECOZIMENTO

FIGURA 8 - LAY OUT DO PROCESSO DE TRATAMENTO TÉRMICO

TEMPERATURA



- (1) TEMPERATURA AMBIENTE
- (2) TRANSFORMAÇÃO
- (3) AUSTENITIZAÇÃO
- (4) SUB ZERO
- (5) REVENIMENTO

FIGURA 9 - CICLO DE RETÊMPERA

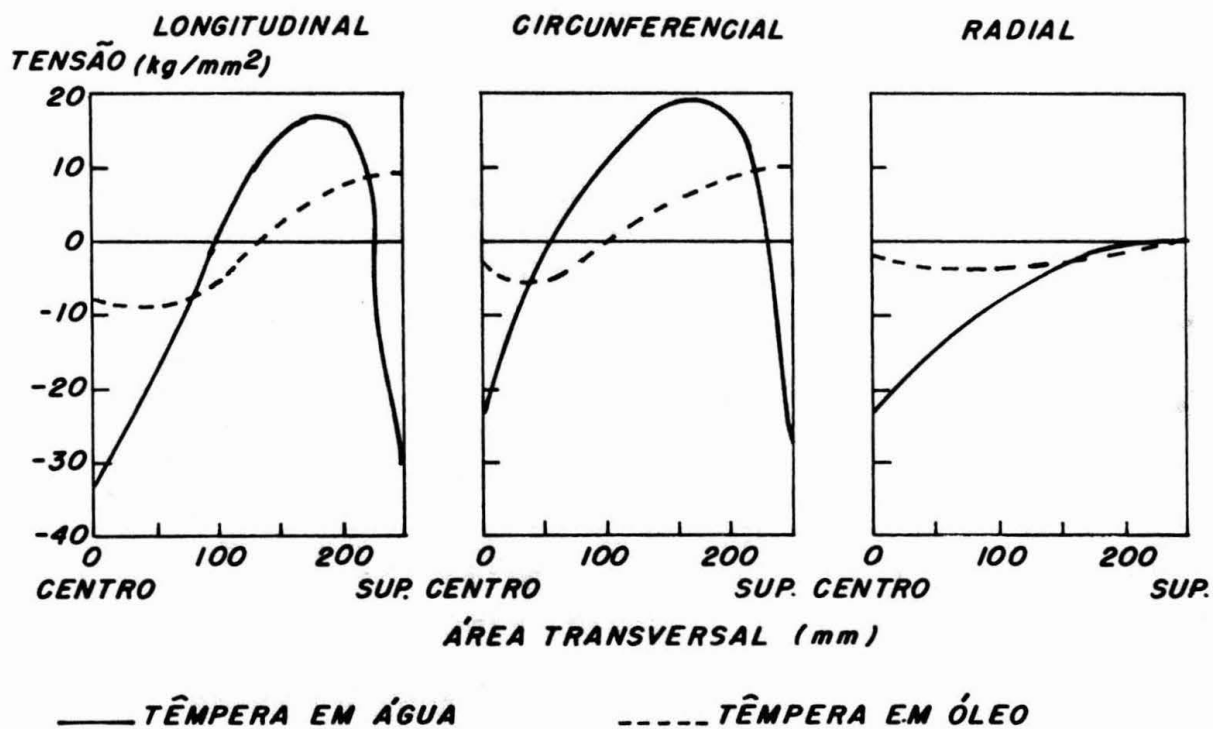


FIGURA 10-EFEITO DA VELOCIDADE DE RESFRIAMENTO NA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

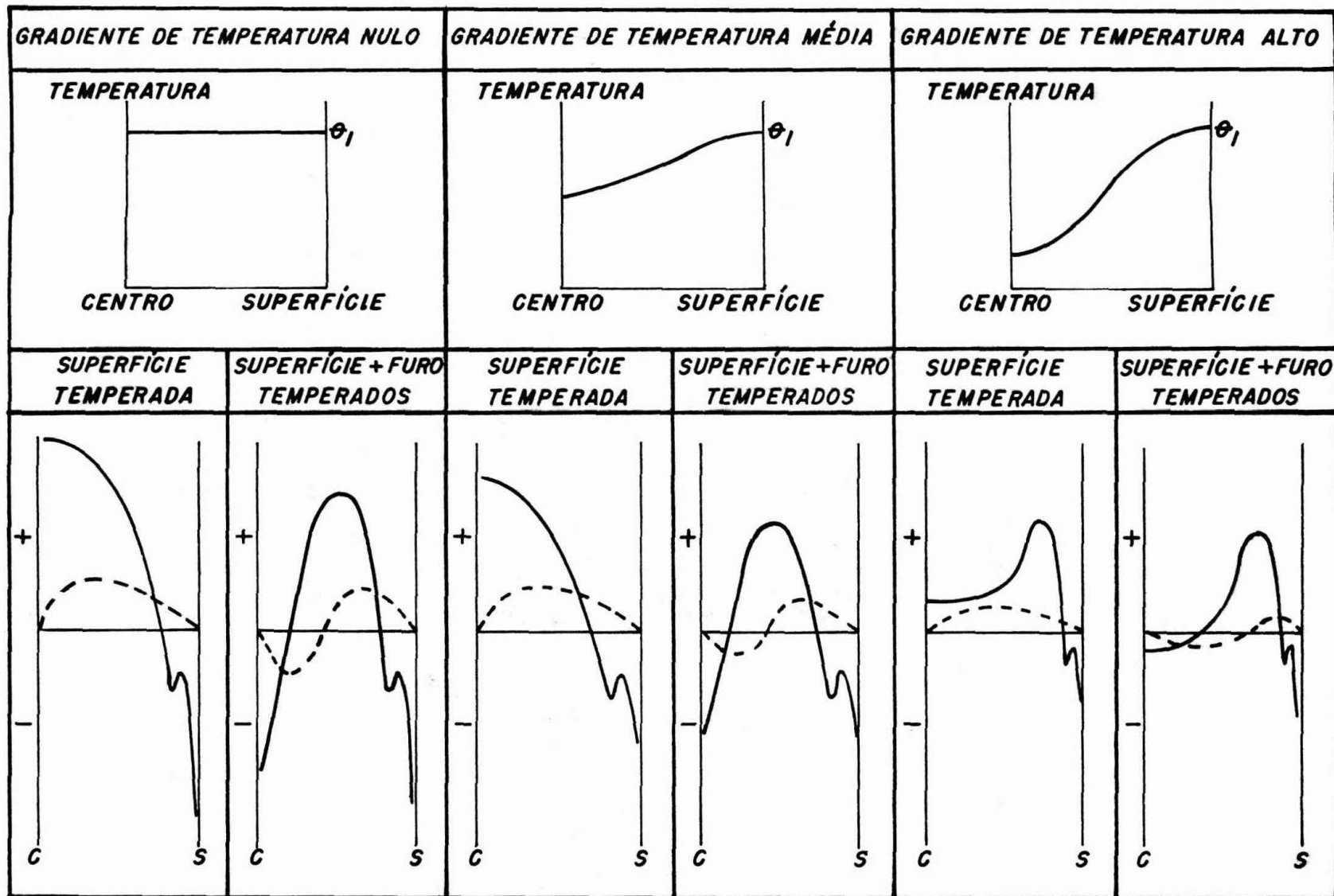


FIGURA II - EFEITO DO GRADIENTE DE TEMPERATURA ANTES DA TÊMPERA E SUPERFÍCIE / SUPERFÍCIE + FURO TEMPERADO NA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES INTERNAS DO CILINDRO