



Universidade de São Paulo
Escola Politécnica

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais

TÊMPERA À CHAMA

EM FERRAMENTAS DE ESTAMPAGEM DE REPUXO
PROFUNDO

Orientador: ***Prof. Dr. HÉLIO GOLDENSTEIN***

Aluno: ***RICARDO MASSAAKI HIDESHIMA***

SUMÁRIO

RESUMO DOS OBJETIVOS	04
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	05
1. INTRODUÇÃO	
1.1 Alcance e aplicação	05
1.2 Métodos utilizados	07
1.2.1 Método progressivo	08
1.3 Gases combustíveis	
1.3.1 Chama Oxi-acetilênica	11
1.3.2 Profundidade de aquecimento	13
1.3.3 Consumo de gás, tempo e velocidade	13
1.3.4 Acetileno	14
1.3.5 Oxigênio	15
1.4 Tipos de Maçaricos	
1.4.1 Maçaricos de gás oxi-combustíveis	17
1.5 Variáveis de operação e controle	
1.5.1 Velocidade de progressão do maçarico	19
1.5.2 Pressão de gás	19
1.5.3 Relação oxigênio/combustível	20
1.5.4 Velocidade da chama	20
1.5.5 Distância do cone interno da chama à peça	20
1.5.6 Temperatura de têmpera	21
1.5.7 Pré-aquecimento	22
1.6 Padrão de profundidade de dureza	
1.6.1 Variação da profundidade de dureza	24
1.6.2 Padrão de dureza de superfície	24
1.6.3 Resumo	25
1.7 Métodos e equipamentos de resfriamento	
1.7.1 Resfriamento após aquecimento progressivo	26
1.8 Meios de resfriamento	
1.8.1 Ar forçado	26
1.8.2 Resfriamento livre	27
1.9 Revenimento das peças temperadas à chama	
1.9.1 Revenimento à chama	27
1.9.2 Revenimento livre	28
1.10 Condição da superfície	28
1.11 Controle dimensional	28
1.12 Seleção do processo	29
1.13 Material a ser temperado	30
1.13.1 Ferros fundidos nodulares	32
1.13.1.1 Normalização de ferros fundidos nodulares	34
1.13.1.2 Alívio de tensões de ferros fundidos nodulares	35
1.14 Problemas da têmpera à chama e suas causas	36

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1	Histórico	39
2.2	Material a ser temperado	
2.2.1	Procedimento de recebimento	40
2.2.2	Etapas de construção	41
2.3	Processo empregado	42
2.4	Equipamento empregado	43
2.5	Variáveis do processo	
2.5.1	Chama	44
2.5.2	Velocidade de progressão	44
2.5.3	Distância do cone interno da chama à peça	46
2.5.4	Resfriamento	46

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1	Notas preliminares	48
3.2	Surgimento de trincas e empenamentos durante ou após a têmpera à chama	
3.2.1	Não houve correto alívio de tensões	49
3.2.2	Não houve correta normalização	50
3.2.3	Procedimento incorreto	50
3.2.4	Verificar falha no projeto	51
3.3	Baixa Dureza	51
3.3.1	Temperatura de aquecimento abaixo da temperatura de austenitização	
3.3.2	Microestrutura fora do especificado	53
3.3.2.1	Descarbonetação	54
3.3.2.2	Microporosidades	55
3.3.3	Sobrepases e superaquecimento	56
3.3.3.1	Sobrepases	56
3.3.3.2	Superaquecimento	62

4. CONCLUSÕES

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

OBJETIVO

Este trabalho de formatura visa fornecer informações sobre têmpera à chama em peças de grandes dimensões. Os estudos foram realizados a partir do grande interesse nos problemas ocorridos na construção das ferramentas de estampagem de repuxo profundo para fabricação de painéis metálicos. Tal interesse foi despertado no decorrer do estágio realizado na General Motors do Brasil (São Caetano do Sul), área do desenvolvimento técnico da ferramentaria, no período de fevereiro a dezembro de 1997.

A maioria dos ensaios foram realizados a fim de solucionar os problemas mais importantes, frequentes ou aqueles que foram surgindo no decorrer do estágio. Alguns problemas de solução complexa, por depender de diversas variáveis como tipo de material e das variáveis do processo, não apresentam uma única solução, não sendo apresentados claramente ou dificilmente encontrados na literatura. Outros problemas mais simples não apresentam soluções ao alcance da realidade brasileira, portanto alguns deles também são apresentados.

Os ensaios são apresentados de forma que, dado um problema, sejam feitas análises e conclusões seguindo a ordem de apresentação dos ensaios realizados.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1 - INTRODUÇÃO

Têmpera à chama é um processo de tratamento térmico em que uma superfície de um material (ferroso) é aquecido acima da zona crítica. Após a estrutura ter sido austenitizada, a região é resfriada rapidamente, transformando a austenita em martensita, mantendo o interior do material na sua estrutura inicial. Em contraste, baixas taxas de resfriamento causam transformações, dependendo das faixas de temperatura, em perlita bainita e martensita, com a estrutura final como combinação das três estruturas. O resultado é um aço relativamente mole e dúctil. Para obter dureza, o aço deve ser resfriado rapidamente tanto quanto não haja transformação das duas primeiras fases e transforme diretamente austenita em martensita ⁽¹⁾.

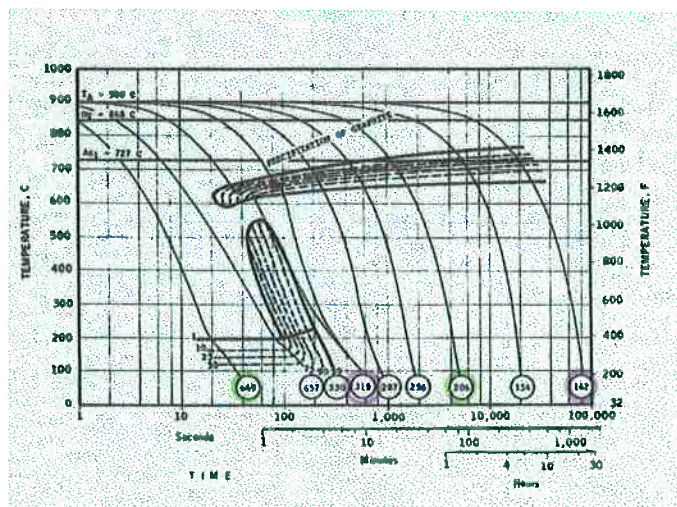


Figura 1: Diagrama TTT do ferro fundido nodular GGG-60 ⁽⁶⁾

O processo emprega o contato direto no material com altas temperaturas da chama ou com alta velocidade de combustão produzida por gases. A peça é então resfriada a uma taxa que produzirá níveis de dureza e outras propriedades desejadas. A alta temperatura da chama é obtida pela combustão de uma mistura de gases combustíveis com oxigênio ou ar, maçaricos são utilizados para queimar a mistura gasosa. Profundidade de dureza de 0,8 a 10mm podem ser obtidos,

dependendo do combustível a ser utilizado, do desenho do bico do maçarico, da duração do aquecimento, da temperabilidade do metal, da taxa de resfriamento e do tipo de resfriamento utilizado ⁽¹⁾.

Têmpera à chama difere da forma convencional de têmpera porque a temperabilidade necessária para obter altos níveis de dureza já está contida no material e neste caso, o que ditará a dureza, além do material, são as variáveis do processo ⁽¹⁾.

1.1 - ALCANCE E APLICAÇÃO

Têmpera à chama é aplicado a uma grande diversidade de peças e metais ferrosos por uma ou mais razões. Este processo é utilizado porque:

- Peças grandes, impraticáveis em fornos e sistemas de resfriamentos convencionais ou economicamente inviáveis ⁽¹⁾.
- Onde somente um pequeno segmento, secção ou área necessitam de tratamento térmico ⁽¹⁾.
- O controle dimensional é impraticável ou difícil no aquecimento ao forno ⁽¹⁾.
- Permite que a peça seja feita de um metal mais barato, desse modo economizando em comparação com outros métodos aceitáveis. O processo dá a metais baratos propriedades de resistência ao desgaste similares aos aços ligados e podendo ser praticados sem nenhuma oxidação ou descarbonetação, desse modo economizando em operações de limpeza ⁽⁵⁾.

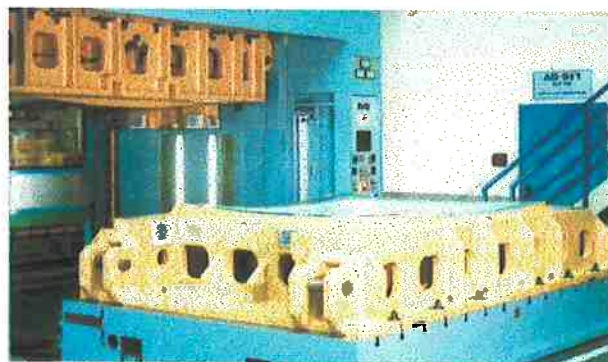
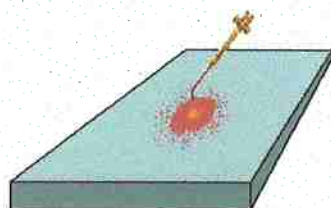


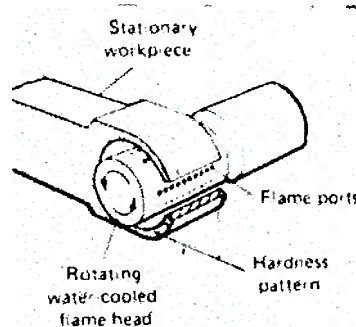
Figura 2: Tamanho médio de uma ferramenta (2 x 4 metros) ⁽⁷⁾

1.2 - MÉTODOS UTILIZADOS

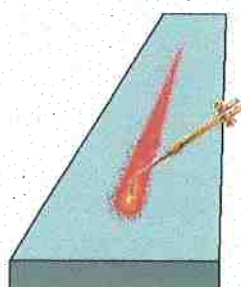
A versatilidade dos equipamentos e uma ampla faixa de condições de aquecimento, obtidos basicamente por queimadores a gás, permitem que a têmpera seja feita por uma variedade de métodos, principalmente:



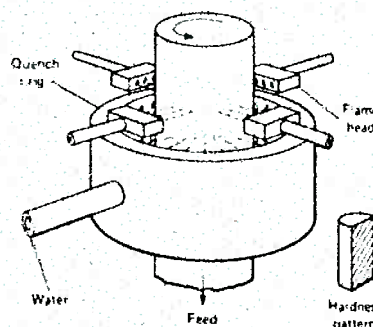
- local ou estacionário;



- rotativo;



- progressivo;



- combinação de progressivo e rotativo

Figura 3: Métodos de têmpera à chama ⁽¹⁾

A seleção do método apropriado depende do formato, tamanho, composição química da peça, área a ser temperada, profundidade de dureza requerida e do número de peças a ser temperada. Em muitos instantes, mais do que um método produzirá o resultado desejado, a escolha ainda dependerá dos custos ⁽¹⁾. No nosso caso aprofundamos mais no processo empregado para têmpera em ferramentas grandes, onde somente o método progressivo é cabível⁽¹⁾.

1.2.1 - MÉTODO PROGRESSIVO:

É utilizado para endurecer grandes áreas. O formato e tamanho da peça, tão bem quanto o volume de oxigênio e gás combustível requerido para aquecer a área específica, são fatores na seleção deste método. Na têmpera progressiva, o maçarico é usualmente de múltiplo orifício, e o resfriamento pode ser integrado com o maçarico facilitando a aplicação. O maçarico aquece progressivamente uma faixa estreita que subseqüentemente é resfriado.

O equipamento necessário para este método consiste em um ou mais maçaricos e meios de resfriamento adaptados num carro móvel que corre sobre uma trajetória definida com uma velocidade também definida. Peças montadas sobre uma mesa móvel ou num torno, podem ser temperadas rapidamente pelo método progressivo. Não existe limite prático no tamanho de peças que podem ser temperadas por este método devido à sua praticidade de se alcançar quaisquer lugares. Grandes áreas podem ser temperadas em mais do que um passe.

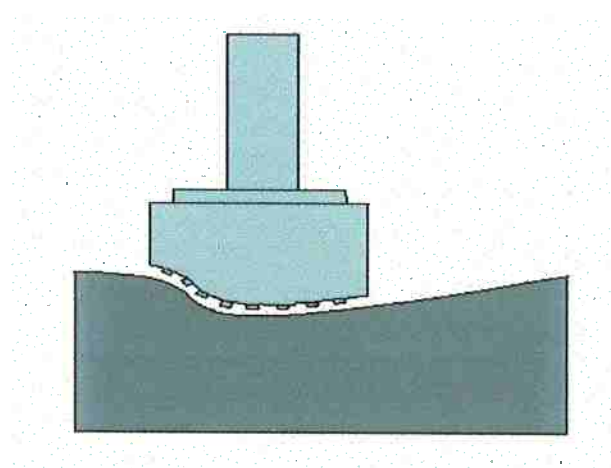


Figura 4: Bico adaptado ao contorno da peça ⁽¹⁾

Quando mais do que um passe é necessário para cobrir uma superfície ou quando uma superfície cilíndrica é temperada progressivamente, tal superfície exibirá bandas de baixa dureza por causa de sobrepasses durante o aquecimento. Estas bandas podem ser minimizadas pelo controle apurado dos sobrepasses. De qualquer forma sobrepasses ocorrem, a possibilidade de tensões térmicas e

trincas devem ser antecipados. Testes devem ser conduzidos para determinar se sobrepases causarão trincas ou outros efeitos nocivos. Superfícies simples curvadas podem ser temperadas progressivamente por meio de bicos com contornos da peça e superfícies mais complexas podem ser temperadas por meio de gabaritos ⁽¹⁾.

A taxa de progressão do maçarico é principalmente governada pela capacidade de aquecimento do maçarico, pela profundidade de dureza requerida, pela composição, formato de trabalho e pelo tipo de esfriamento utilizado. Velocidades de 0,8 a 5 mm/s são típicas com aquecimento por maçaricos de oxiacetileno. Água à temperatura ambiente é utilizado como meio resfriador, apesar de que o ar é utilizado quando é exigido um esfriamento menos severo. Em condições especiais (particularmente para resfriar aços ligados) água morna ou quente ou polímeros especiais podem ser empregados como esfriadores ⁽¹⁾.

1.3 - GÁSES COMBUSTÍVEIS

Diferentes combustíveis são utilizados na têmpera à chama. Na seleção de um gás combustível numa dada aplicação, a taxa de aquecimento e o custo do gás devem ser considerados, além do custo inicial do equipamento e custos de manutenção.

Têmpera à chama não altera a composição química do metal se feito adequadamente. Chamas carburante, neutra e oxidante podem ser utilizadas. Chamas oxidantes tem alta taxa de oxigênio e podem ser prejudiciais por causa que a sua alta temperatura pode causar descarbonetação e superaquecimento. Uma chama carburante pode prevenir alguma descarbonetação mas também pode introduzir certo carbono indesejável na superfície. Para melhores resultados, chamas neutras devem ser utilizadas ⁽¹⁾.

Acetileno queimando no ar, $T_{\text{máx}}$ 815°CChama Carburante, $T_{\text{máx}}$ 3.150°CChama levemente carburante, $T_{\text{máx}}$ 3.200°CChama neutra, $T_{\text{máx}}$ 3.260°CChama Oxidante, $T_{\text{máx}}$ 3.315°C**Figura 5:** Diferentes tipos de chama ⁽⁵⁾

A comparação das taxas de aquecimento dos gases combustíveis podem ser feitas quando as propriedades fundamentais da mistura dos gases com oxigênio são conhecidas. Um parâmetro que relaciona bem com a velocidade de aquecimento é a intensidade de combustão. Este é o produto da velocidade de queima com o poder calorífico da mistura do gás combustível e o oxigênio. Um conhecimento destas duas propriedades permite a seleção do combustível mais conveniente para uma específica velocidade de têmpera e profundidade de dureza. Os combustíveis de grande interesse comercial são classificados em intensidade de combustão na seguinte ordem: ACETILENO, MAPP(metil-acetileno-propadieno), PROPANO e METANO .

O tempo necessário de aquecimento é outro importante critério para julgar a qualidade de aquecimento de um gás combustível.

A taxa de oxigênio é muito importante para se obter máxima eficiência de aquecimento de um combustível. No entanto taxa de oxigênio/combustível não devem ser confundidos com taxas de consumo do oxigênio e combustível, a qual varia com velocidade da chama, tamanho do orifício e tempo de aquecimento. Estequiometricamente, acetileno requer $2\frac{1}{2}$ moles de oxigênio por mol de gás para completa combustão, MAPP requer 4 moles e Propano requer 5 moles. Com acetileno, no entanto, uma taxa de somente 1 a 1,5 volumes de oxigênio é provido diretamente, com a sobra sendo puxada diretamente da atmosfera circundante. Nem MAPP nem Propano tem suficiente aquecimento na têmpera à chama.

Sistemas de suprimento por tubulação de gases combustíveis e de oxigênio reduzem custos, mas a grande importância é a eliminação dos cilindros e das perdas residuais nas trocas dos cilindros. Sistemas de suprimento também permitem maior constância do gás à pressão constante. Uma desvantagem do acetileno é que não pode ser suprido por sistemas de tubulação, desse modo requerem a presença de cilindros ⁽¹⁾.

Tabela 1: Gases combustíveis utilizados para têmpera à chama ⁽¹⁾

Gases	Temperatura da chama (°C)	
	com oxigênio	com ar
Acetileno	3105	2325
GLP	2540	1985
Metano	2705	1875
Propano	2635	1925
MAPP	2927	1760

1.3.1 – CHAMA OXI-ACETILÊNICA

Sempre que acontece uma reação química entre gases com aparecimento de luz e calor, a zona em que se processa esta reação é denominada chama. Os fatores que controlam a chama dentro de um mesmo maçarico são o tamanho e forma longitudinal do orifício. As pressões do acetileno e oxigênio são as quantidades relativas nas misturas destes dois gases que se queimam no bico do maçarico.

Quando há queima completa do acetileno no ar, o oxigênio do ar combina-se com o acetileno formando o gás carbônico e o vapor de água ($2 \text{ C}_2\text{H}_2 + 5 \text{ O}_2 = 4 \text{ CO}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O} + \text{calor}$). Como se pode verificar, para haver a queima completa de acetileno, são necessários 2,5 volumes de oxigênio para 1 volume de acetileno.

No ar atmosférico há quatro vezes mais nitrogênio do que oxigênio e ainda outros gases em pequenos percentuais. Desde que estes gases não entrem na reação, apenas serão aquecidos por ela, o que causará diminuição da temperatura da chama.

Se houvesse oxigênio puro num volume duas vezes e meia maior, ideal, obter-se-ia uma chama de temperatura mais elevada, porém este tipo de chama é comercialmente inviável. O tipo de chama que se emprega é a que se alimenta com um volume de oxigênio para cada volume de acetileno, deixando os outros 1,5 volumes para serem fornecidos pelo próprio ar atmosférico que envolve a chama.

A chama é produzida por duas reações: a reação primária e secundária. A reação primária é a de maior temperatura e é representada na chama pelo cone interno. É a reação que se processa com gases fornecidos pelos cilindros de oxigênio e acetileno. A reação secundária é a representada pela parte externa da chama, também conhecida como envoltório; é a reação do monóxido de carbono resultante da reação primária com o hidrogênio, também resultante da reação primária na presença do oxigênio do ar.

Os tipos de chama oxi-acetilênica variam em consequência das proporções de oxigênio e acetileno ⁽⁵⁾.



Regiões	Nome	Chama neutra	Chama oxidante	Chama redutora
	Cone (dardo)	Branco (azulado)	Branco	Branco intenso
	Véu (penacho)	Quase incolor	Roxo alaranjado	Branco quase incolor
	Envoltório (franja)	Azul alaranjado	Roxo alaranjado	Laranja azulado

Figura 6: Cores das regiões dos diversos tipos de chama ⁽⁵⁾

1.3.2 - PROFUNDIDADE DE AQUECIMENTO

Padrões de dureza pouco profundo (menos que 3,2 mm), podem ser obtidos somente com combustíveis oxi-gás. As altas temperaturas obtidas com combustíveis oxi-gás, permitem a rápida transferência de calor necessária para um efetivo aquecimento localizado. Cuidados são necessários para que se evite superaquecimento. Padrões de dureza profundas permitem o uso de outros combustíveis oxi-gás ou ar-gás. Combustíveis ar-gás com suas baixas taxas de aquecimento, minimizam ou eliminam superaquecimento mas geralmente não fornece desejados níveis de dureza. Por esta razão, têmpera à chama com ar-gás quase não são utilizados, além do que podem causar excessiva distorção do metal. Desta maneira a profundidade de dureza é controlado pela taxa de resfriamento, conseqüentemente pela taxa de aquecimento ⁽¹⁾.

1.3.3 - CONSUMO DE GÁS, TEMPO E VELOCIDADE.

O consumo de gás varia com a largura da faixa de têmpera desejada, aumento ou diminuição de profundidade de dureza, determinam o quanto de gás a ser utilizado. Partes grandes aumentam o consumo de gás devido ao seu efeito de massa. Para levar vantagem da máxima temperatura da chama, a distância do fim do cone interno da chama à superfície de trabalho deve ser de 1,6 mm.

A velocidade de progressão do maçarico sobre a peça varia com a largura da faixa a ser temperada e da capacidade do maçarico. No método progressivo a velocidade de progressão varia de 0,8 a 5 mm/s na maioria das aplicações, no entanto partes finas (pequenas espessuras) podem requerer 42 mm/s ou mais a fim de se evitar superaquecimento ou queima do metal. Por causa do intenso calor envolvido, a necessidade de um controle preciso destas variáveis não podem ser desprezados.

As curvas de tempo, temperatura e profundidade dos gases combustíveis do método progressivo foram obtidos analiticamente considerando o fluxo de calor na peça. A intensidade de calor e configuração da peça foram escolhidos para ser representativo no método progressivo. Nestes termos, a variável tempo

pode ser relacionado com a taxa de progressão se a largura da zona temperada for conhecida. Por exemplo, uma zona de chama de 25 mm passará sobre uma região em 15 segundos quando a taxa de progressão é de 1,7 mm/s. Esta largura da zona da chama indica a probabilidade de um maçarico multi-chama e se a intensidade de aquecimento é tanto quanto superior às das curvas, sem dúvida ocorrerá danos à superfície da peça. Consequentemente, uma maior taxa de progressão deve ser utilizada, por exemplo 2,5 mm/s., temperando uma região por 10 segundos, a profundidade será de 2,5 mm. A rápida diminuição da temperatura é devido ao efeito de massa, que, na prática, deveria ser aumentada pelo uso de resfriamento com spray de água ou com outro meio de esfriamento ⁽¹⁾.

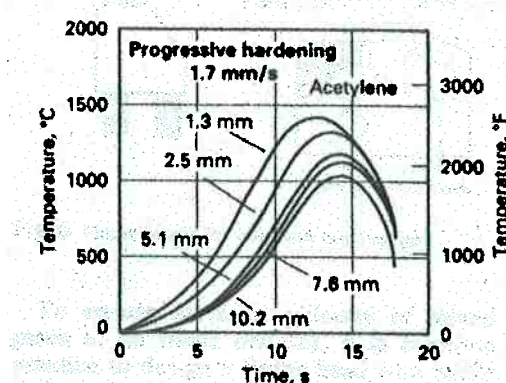


Figura 7: Relação entre Tempo-Temperatura-Profundidade de dureza ⁽¹⁾

1.3.4 - ACETILENO:

A razão da escolha do acetileno como gás combustível, advém do fato de ser o gás que, em combustão na presença de oxigênio, produz a chama considerada como a de mais alta temperatura e de maior concentração de todos gases combustíveis.

Comparando a reação química de combustão nos diversos gases combustíveis com a do acetileno, encontra-se menor capacidade de transferência de calor para os gases que exigem mais tempo de aquecimento e, consequentemente, maior consumo de oxigênio, este fato torna a operação de

aquecimento mais crítica, embora outros gases combustíveis tenham custo inferior⁽⁵⁾.

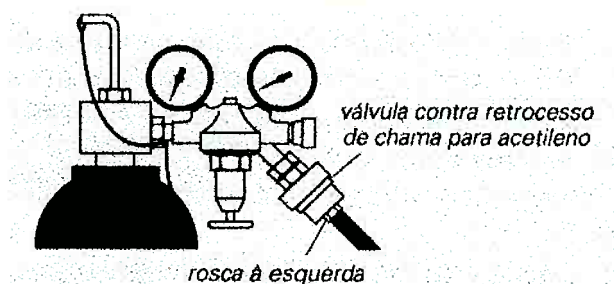


Figura 8: Tanque de acetileno ⁽⁵⁾

O acetileno (C_2H_2), composto gasoso de carbono e hidrogênio, é um gás incolor e sem cheiro quando puro. Entretanto tem na sua forma convencional um cheiro característico, semelhante ao alho, devido a impurezas tais como: fosfina, arsina, sulfeto de hidrogênio e amônia. Sua composição química, C_2H_2 , é mais simples dos compostos orgânicos, sendo 7,47% de hidrogênio e 92,24% de carbono em peso. Devido a ser um gás mais leve do que o ar, o acetileno eleva-se na atmosfera, obrigando a construir sistemas de exaustão nos tetos, para evitar o acúmulo de gás que tende a se situar na parte superior dos locais onde é utilizado. A oxidação do acetileno, ou seja, a sua combinação com o oxigênio, pode produzir chama com temperatura da ordem de $3100^{\circ}C$. O acetileno é um gás cuja combinação, facilmente controlável com o oxigênio, produz chamas de variadas temperaturas. Estas temperaturas, além da reação combustível/oxigênio, da pressão dos gases, do conteúdo de vapor de água no acetileno e ainda da temperatura ambiente ⁽⁵⁾.

1.3.5- OXIGÊNIO

O oxigênio é utilizado como gás corburente na chama oxi-acetilênica. É um gás incolor, inodoro e insípido. Ao contrário do acetileno, é um gás que se encontra na atmosfera, seu processo produtivo consiste em separá-lo dos demais componentes da atmosfera ⁽⁵⁾.

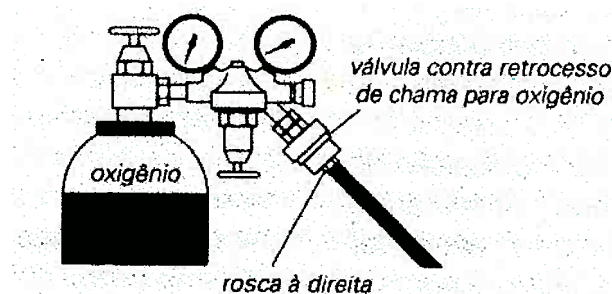


Figura 9: Tanque de oxigênio ⁽⁵⁾

A afinidade do oxigênio com os hidrocarbonetos, de uma forma geral, faz surgir o perigo da combustão espontânea. Por isto deve se evitar o contato com óleos e graxas. Justamente devido a este fato, impede que na têmpera à chama, se impede a utilização de óleos como meio de resfriamento ⁽⁵⁾.

1.4 - TIPOS DE MAÇARICOS

O processo de têmpera à chama por gases oxicomcombustíveis é um dos processos mais antigos. O aquecimento se dá por meio de uma chama proveniente de uma mistura de gases. Esses gases passam por um dispositivo cuja função é dosá-los na proporção exata para a combustão. O dispositivo chamado maçarico, deve ainda possibilitar que se produzam diferentes tipo de misturas necessárias para obter tipo de chamas de acordo com os diferentes tipos de materiais. Para que a têmpera ocorra é necessário que a mistura produza uma quantidade de calor, a fim de aquecer o material a uma maior taxa possível, assim proporcionando uma taxa de resfriamento que se caracterize como um tratamento térmico de têmpera.

O aquecimento se dá por queima ou reação de combustão. É uma reação química de oxidação, na qual se desenvolve uma grande quantidade de calor; esse calor é transferido ao material que , em consequência, se aquece ⁽⁵⁾.

O maçarico é o aparelho onde são misturados os gases responsáveis pelos diversos tipos de chama: neutra, oxidante e redutora. O bom resultado de uma têmpera à chama, além da habilidade do operador, se deve grandemente à escolha e performance do maçarico.

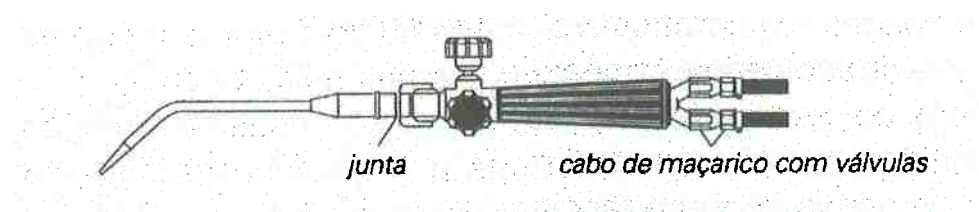


Figura 10: Maçarico de solda ⁽⁵⁾

A principal característica de um bom maçarico é descarregar uma mistura cuidadosamente dosada dos dois gases, de modo que a quantidade somada de gases resultantes e misturados esteja de acordo com o tipo de chama desejada. Deve também ser leve e de construção balanceada, a fim de não cansar a mão do soldador, quando em trabalho. Ao mesmo tempo, o bico deve ser feito de material adequado para conduzir e dirigir uma chama de alta temperatura durante todo o tempo de trabalho, sem que o equipamento apresente desgaste excessivo ⁽⁵⁾.

1.4.1 - MAÇARICOS DE GÁS OXIGÊNIO-COMBUSTÍVEIS

A combustão dos gases combustível-oxigênio desenvolvem temperaturas de chama superior aos que materiais refratários podem suportar. Portanto o maçarico é desenhado de modo que a chama não entre em contato com o bico do maçarico.

Geralmente o maçarico consiste de um tubo ou uma concha com um ou mais orifícios. O número e arranjo dos orifícios dependem da área requerida para cobertura de aquecimento. Maçarico de gases oxigênio são mostrados na figura a seguir.

O maçarico multi-chamas ou de diversos orifícios tem uma aplicação limitada e são usualmente designados para peças específicas. Para garantir velocidades idênticas de todos orifícios, é comum a prática do desenho do maçarico com gicanas garantindo uma uniformidade do fluxo dos gases.

Maçaricos multi-chamas são resfriadas por água porque, de outra maneira, as altas temperaturas desenvolvidas pelas chamas podem causar uma rápida deterioração ⁽¹⁾.

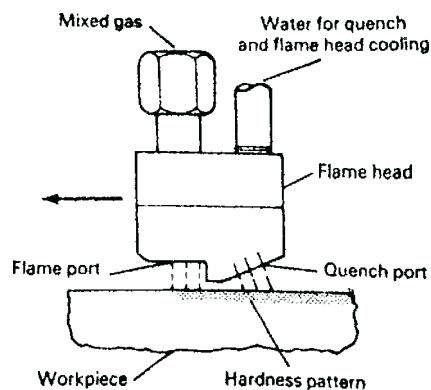


Figura 11: Exemplo geral de um maçarico com um resfriador adaptado ⁽¹⁾

Os maçaricos para têmpera à chama são implementados por válvulas de pressão, reguladores de pressão, itens de proteção e segurança ⁽¹⁾.

1.5 - VARIÁVEIS DE OPERAÇÃO E CONTROLE

O sucesso da maioria dos métodos de têmpera à chama dependem grandemente da experiência do operador. Isto é especialmente verdade quando o volume de trabalho é pequeno, muito variado ou que não justifique o custo de um equipamento automático ⁽¹⁾.

As principais variáveis de operação são:

- Distância do cone interno da chama ou do bico do maçarico com a superfície a ser temperada;
- Velocidade da chama e taxas parciais do combustível-oxigênio;
- Taxa de progressão do maçarico;
- Tipo, volume e ângulo de resfriamento.

Estas variáveis devem ser minuciosamente controladas para garantir a duplicação da desejada dureza superficial e profundidade de dureza. Isto é altamente desejável para desenvolver um específico procedimento para cada tipo

de peça a ser temperada. O procedimento é desenvolvido por testes preliminares em modelos com a mesma secção transversal da peça a ser temperada ⁽¹⁾.

Tabela 2: Resultados de habilidade do operador ⁽¹⁾

Operador	Velocidade de chama m/s	Taxa oxig.:comb.	Veloc. de progressão mm/s	Dureza de superfície HRC	Dureza a 3,8 mm HRC
1	95	3.6:1	3.4	61	30
2	99	3.1:1	2.5	50	41
3	137	3.1:1	1.7	57	50
4	124	4.2:1	1.9	55	38
5	156	3.3:1	2.5	60	52

1.5.1 - VELOCIDADE DE PROGRESSÃO DO MAÇARICO:

Velocidade de progressão ou duração de aquecimento, deveria ser mantido constante para resultados uniformes. No método progressivo, a chama aquece gradualmente a peça na frente do maçarico e às vezes este efeito deve ser compensado pelo aumento gradual da velocidade de progressão. Durante o início de um passe, quando o método progressivo está sendo utilizado, o maçarico deve ser manipulado de forma a garantir que o começo da área a ser temperada alcance a temperatura e profundidade de aquecimento ⁽¹⁾.

1.5.2 - PRESSÃO DE GÁS

A pressão dos gases oxigênio-combustível devem ser controlados por uma uniforme saída de calor. Bicos de maçaricos planos são algumas vezes menos eficientes quando utilizados em superfícies circulares ou irregulares por causa da distância do cone interno da chama não ser constante à peça. Superaquecimento podem causar trincas ⁽¹⁾.

1.5.3 - RELAÇÃO OXIGÊNIO COMBUSTÍVEL

É um fator chave na determinação da temperatura da chama. Por exemplo, o propano produz temperaturas da chama de 2700°C à relação de 5 para 1 (5:1), 2540°C para 4:1 e 2370°C para 3:1 ⁽¹⁾.

1.5.4 - VELOCIDADE DA CHAMA

É a mais importante variável porque quando balanceada com outras variáveis, é o principal determinante da profundidade de dureza.

Na têmpera à chama de ferro fundido, onde altas temperaturas são indesejáveis, o uso de baixas velocidades da chama é uma distinta vantagem. Nesta consideração, tanto MAPP como propano são facilmente controláveis e são efetivos em uma grande faixa de velocidade da chama. A habilidade para controlar uma grande faixa de velocidade da chama, não somente provem flexibilidade mas também bons resultados no controle de padrão de calor ⁽¹⁾.

1.5.5 - DISTÂNCIA DO CONE INTERNO DA CHAMA À PEÇA

É uma fator chave que pode alterar, além das variáveis apresentadas anteriormente, pode variar o padrão de profundidade de dureza adquirida na peça. A uma dada distância temos uma velocidade da chama. Concluindo, quanto menor a velocidade da chama, maior a profundidade de aquecimento, conseqüentemente, maior profundidade de dureza. A figura abaixo mostra algumas relações entre distância do cone interno da chama à peça com a profundidade de dureza, utilizando diferentes gases.

A relação entre esta distância e a profundidade de dureza de três gases utilizados são mostrados na figura seguinte. Em geral, a distância do MAPP é igual ou próxima do acetileno. Alguns dizem que tal distância aumenta conforme a velocidade da chama aumenta ⁽¹⁾.

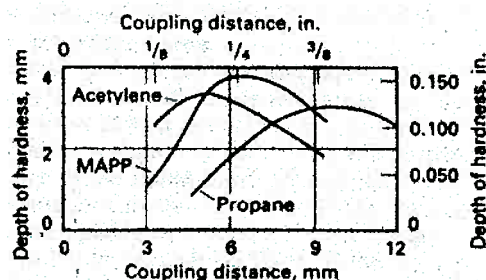


Figura 12: Relação entre distância do cone interno da chama à peça e profundidade de dureza ⁽¹⁾.

1.5.6 - TEMPERATURAS DE TÊMPERA

Podem ser julgados por operadores competentes, mas para inexperientes o metal aquecido parecerá mais frio por causa da luminosidade da queima dos gases, consequentemente tenderá ao superaquecimento, ao menos que o operador seja equipado com óculos especiais que distingam as cores do metal e da chama. Pirômetros ópticos são muitas vezes utilizados para julgar mais precisamente as temperaturas desenvolvidas. Pirômetros de rápida resposta são utilizados extensivamente para controle de temperatura e tempo de aquecimento⁽¹⁾.

Brilliant White	--	1500
White Heat	--	1400
Yellow-White	--	1300
Orange-Yellow	--	1200
Orange-Red	--	1100
Bright Cherry-Red	--	1000
Cherry-Red	--	900
Dull Cherry-Red	--	800
Dark Red	--	700
Red in Sunlight	--	580
Red in Daylight	--	525
Faint Red in Twilight	--	474
Faint Red in Dark	--	400

Figura 13: Tabela comparativa entre temperatura (°C) e cor do metal ⁽⁵⁾.

Exames metalúrgicos são o melhor método de estabilização das condições experimentais. Regiões superaquecidas podem aparecer com bicos individuais, mas com bicos de maçaricos adequados e com boas escolhas de técnicas este efeito é minimizado e não detetável rapidamente pelo exame metalográfico ⁽¹⁾.

1.5.7 - PRÉ-AQUECIMENTO

Na têmpera à chama peças de grande secções, a dificuldade em obter a dureza na superfície e a uma certa profundidade, muitas vezes podem ser obtidos por pré-aquecimento. Quando a força disponível ou poder de calor é limitado, a profundidade de dureza pode ser aumentada pelo pré-aquecimento. Os valores de dureza apresentadas na figura seguinte mostram o efeito do pré-aquecimento no desenvolvimento da profundidade de penetração de dureza numa engrenagem ⁽¹⁾.

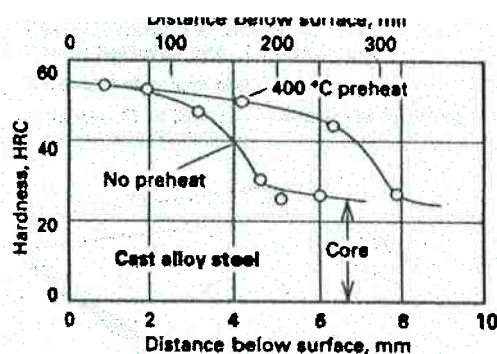


Figura 14: Relação entre temperatura de aquecimento e dureza ⁽¹⁾

A têmpera à chama de aços pré temperados, requer cuidados de aquecimento para se evitar trincas. O pré-aquecimento pode ser aconselhável para minimizar trincas nestes aços. Ferro fundidos temperáveis são também susceptíveis à trincas. Em uma dada aplicação, ferramentas de ferro fundido tinham que ser pré-aquecidos a 480°C prevenindo a ruptura dos raios causada pela não uniformidade de expansão durante o aquecimento.

Em outra dada aplicação, a dificuldade do tratamento térmico da parte interna dos dentes de uma engrenagem foi superado pela têmpera circular. O componente tinha uma distribuição irregular de massa, causando uma grande distorção quando o tratamento térmico foi feita pela têmpera à chama. O caso de

trinca nos dentes também ocorreu. O problema foi resolvido com pré-aquecimento localizado na parte de maior massa ⁽¹⁾.

1.6 - PADRÃO DE PROFUNDIDADE DE DUREZA

Em alguns instantes, o procedimento de têmpera à chama resulta numa maior profundidade de dureza do que desejada. A figura seguinte, por exemplo, mostra uma peça temperada à chama após 4 segundos de aquecimento a 870°C com chama de oxiacetileno produzindo uma profundidade de dureza de 5,1 mm. Se excessivo, esta profundidade de dureza pode ser reduzido pela redução do tempo de aquecimento com a mesma temperatura. No entanto, com uma redução no tempo de aquecimento a 3,2 segundos a 870°C, a profundidade de dureza será de 2,5 mm. Por causa do menor período de tempo o custo do processo de têmpera também é reduzido ⁽¹⁾.

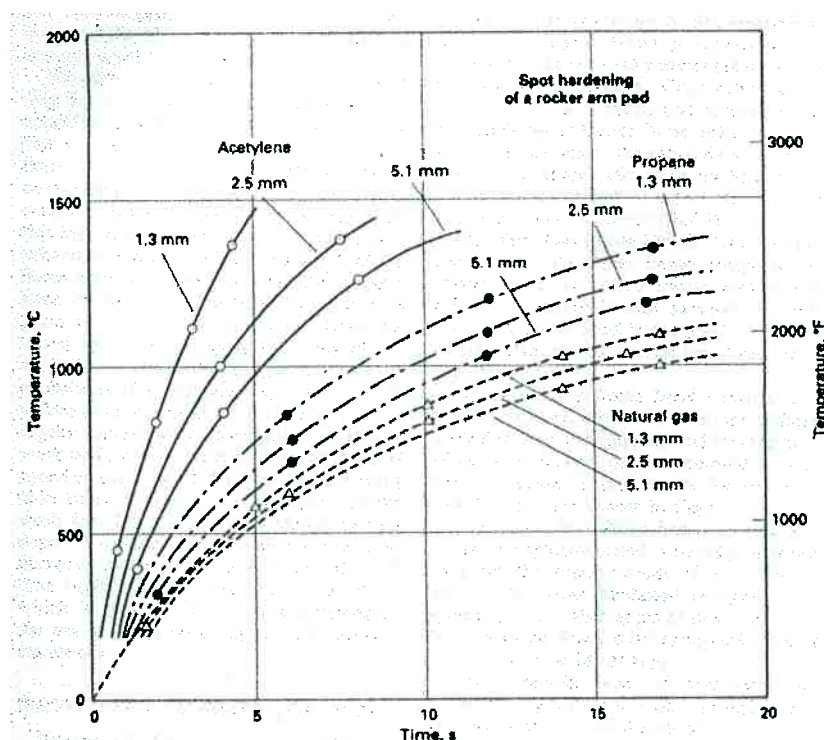


Figura 15: Relação entre Tempo-Temperatura-Profundidade de dureza ⁽¹⁾

Numa têmpera progressiva com uma taxa de progressão de 1,7 mm/s, uma profundidade de dureza de 5,1 mm será produzida quando o tempo de aquecimento é de 12 segundos a 870°C, conforme mostrada na figura 5c. O bico do maçarico contém 2 orifícios que produzem uma zona de aquecimento de 20 mm. Se a taxa de progressão é aumentada de 20%, 2,0 mm/s, o tempo de aquecimento é proporcionalmente reduzido à 10 segundos. Este resultará numa profundidade de dureza de 2,5 mm ⁽¹⁾.

1.6.1 - VARIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE DUREZA

Pode ocorrer em aços de mesma composição nominal mas através de diferentes tipos de aquecimento. Taxas de aquecimentos mais lentos, para alcançar uma mesma temperatura, causam um maior avanço da temperatura para o interior da peça, podendo se obter maior profundidade de dureza ⁽¹⁾.

1.6.2 - PADRÃO DE DUREZA DE SUPERFÍCIE

O padrão de dureza de alguma porção de uma superfície temperada à chama pode ser determinada por uma leve lixada com uma lima fina. A porção temperada da superfície será menos afetada do que a área não temperada. Este procedimento também pode ser empregado para indicar regiões de baixa dureza quando toda a superfície foi temperada. Outro procedimento para determinar o padrão de dureza da superfície é espalhar a área com uma solução de 10% de ácido nítrico. As áreas temperadas ficarão mais escuras do que as não temperadas.

Estes procedimentos também são aplicáveis às secções transversais de áreas temperadas para uma indicação de profundidade de calor. Eles também são úteis para testes preliminares na performance da têmpera à chama ⁽¹⁾.

1.6.3 – RESUMO

O caso de dureza na têmpera à chama é uma função do teor de carbono do aço podendo alcançar até 65 HRC. Aços de médio carbono com 0,4 ~ 0,5% de carbono são ideais para têmpera à chama. Mas aço com teores acima de 1,5 % de carbono também pode ser temperado com cuidados especiais. Normalmente, a profundidade de dureza varia de 1,3 a 6,4 mm. Grandes secções, como rolamentos e ferramentas de grande porte, podem ter profundidade de dureza acima de 13 mm. Aços com manganês aumentam a profundidade de dureza diminuindo a taxa de resfriamento crítica, contribuindo com profundidade de dureza.

Quando profundidade de dureza são requeridos acima das capacidades de aços carbono com 0,6 a 0,9 % de carbono, elevadas taxas de manganês de 0,80 a 1,10 % , 1,00 a 1,30 % e 1,10 a 1,40 % podem ser utilizados eficientemente. Resistência ao desgaste, em muitos casos, não é o unico critério de projeto. A camada temperada deve ser profunda o bastante não somente para prover a requerida resistência ao desgaste da peça, mas também, para contribuir para suportar um forte carregamento de contacto. Este caso deve apresentar se totalmete martensítico de modo a apresentar resistência suficiente. No entanto, o aumento da temperabilidade pode conduzir a problemas de trincas, ainda mais com um resfriamento com água ⁽¹⁾.

1.7 - MÉTODOS E EQUIPAMENTOS DE RESFRIAMENTO

A propriedade de aplicação de um aceitável método de resfriamento é tão importante quanto aquecimento. O resfriamento deve remover o aquecimento a uma taxa que produzirá uma desejada estrutura e auxiliará no controle da profundidade de dureza.

O método e tipo de resfriamento varia com o método de têmpera á chama. Na têmpera localizada, resfriamento por imersão geralmente é utilizado, mas resfriamento por spray também pode ser utilizado ⁽¹⁾.

1.7.1 - RESFRIAMENTO APÓS AQUECIMENTO PROGRESSIVO

Peças aquecidas pelo método progressivo são usualmente resfriadas por um spray integrado no maçarico. No entanto para aços com alta temperabilidade ou quando é desejável ajustar ou variar a distância entre a zona aquecida e o resfriamento, um spray separado, às vezes, pode ser utilizado. O spray deve liberar a um ângulo do maçarico a fim de prevenir interferência com o aquecimento e deve prover cobertura total da zona aquecida ⁽¹⁾.

1.8 - MEIOS DE RESFRIAMENTO

Com a utilização do spray, integrado no maçarico ou em separado, água ou solução de polímeros são utilizados como meios de resfriamento. Resfriamento com óleo não devem ser empregados, pois além do contacto com oxigênio pode contaminar o equipamento utilizado. Conforme a têmpera convencional, a liga contida no aço determina o tipo de resfriamento que deve ser utilizado. O resfriamento pode ser água, uma solução de sais, polímeros ou ar.

Pela redução de pressão do resfriamento, a taxa de resfriamento do spray pode ser reduzido. Aumentando a distância da última porção aquecida na peça e o resfriamento, permite que a massa entre o aquecimento e o resfriamento extraia o calor e deste modo, reduza a severidade de esfriamento.

A distância de resfriamento é outro fator chave que o operador deve considerar por causa que o resfriamento deve direcionar se na área aquecida a fim de que outras estruturas indesejáveis se formem ⁽¹⁾.

1.8.1 - AR-FORÇADO

No método progressivo, ar forçado é frequentemente utilizado para resfriar aços que normalmente são resfriados com óleo. A água não é utilizada imediatamente após aquecimento por causa que o rápido resfriamento pode causar danos superficiais ⁽¹⁾.

1.8.2 - RESFRIAMENTO LIVRE

Durante qualquer tipo de têmpera à chama a massa da parte inferior da camada aquecida auxilia o resfriamento. Durante a têmpera à chama, a combinação de um rápido aquecimento e o gradiente de temperatura entre a superfície e o interior da peça resulta num subsequente resfriamento livre que é equivalente a um resfriamento em óleo ⁽¹⁾.

1.9 - REVENIMENTO DAS PARTES TEMPERADAS À CHAMA

É usualmente desejável revenir peças que tem sido temperadas à chama. A necessidade de revenir é a mesma de tratamentos térmicos convencionais. Peças temperadas à chama respondem ao tratamento de revenimento da mesma maneira que outra forma de revenimento. No entanto, da mesma forma que na têmpera à chama ocorre devido à impraticabilidade nos fornos, o revenimento à chama é praticado ⁽¹⁾.

1.9.1 - REVENIMENTO À CHAMA

Peças grandes são usualmente temperadas pelo método progressivo e podem ser revenidas imediatamente pelo reaquecimento da superfície temperada com um maçarico localizado a uma curta distância atrás do resfriamento. O reaquecimento ou revenimento à chama deve ser desenhado corretamente considerando o tamanho e número de orifícios para fornecer a desejada temperatura e gradiente de temperatura na zona temperada pela velocidade de progressão do método progressivo.

Ajustes finais podem ser feitos pela variação do fluxo dos gases através do maçarico e pelo ajuste da distância entre o maçarico e a superfície da peça. O maçarico do revenimento deve ter baixa saída de calor por causa que o rápido aquecimento da zona temperada pode causar trincas porque, para revenimento, a temperatura deve ser mais baixa e o controle de temperatura é mais crítico ⁽¹⁾.

1.9.2 - REVENIMENTO LIVRE

Em grandes peças temperadas a uma profundidade de 6,4 mm ou mais, o calor residual presente após esfriamento pode ser suficiente para efetuar satisfatoriamente alívio de tensões da têmpera e um subsequente revenimento pode ser desnecessário. Combustível ar-gás, devido a sua baixa taxa de aquecimento, promove o desenvolvimento de calor requerido para um revenimento livre.

Quando o calor residual não pode ser utilizado e é desejável que se elimine o revenimento separado, o uso de um aço baixo carbono é sugerido se possível. Para este propósito, pré-aquecimento pode ser acompanhado, se desejável. A escolha depende da disponibilidade do equipamento e dos custos envolvidos. A exata temperatura de reaquecimento varia, dependendo do tamanho e configuração da peça e a medida do alívio de tensão e revenimento desejado. Em cada aplicação, o exato procedimento pode ser estabelecido na base da tentativa como passo preliminar ⁽¹⁾.

1.10 - CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE

Para aços trabalhados ou fundidos, a condição da superfície é detrimental para o sucesso da têmpera à chama, em geral, a superfície interfere no aquecimento e resfriamento, causando superaquecimento localizado, início de trincas ou resultando na presença de regiões de baixa dureza ⁽¹⁾.

1.11 - CONTROLE DIMENSIONAL

Por causa da possibilidade de aquecer áreas seletivamente, a têmpera à chama em muitas aplicações, necessita de um grande controle de estabilidade dimensional, diferente do aquecimento e resfriamento em fornos. A magnitude das mudanças dimensionais que ocorrem na têmpera à chama é influenciado pelos

seguintes fatores como tamanho e formato da peça, área aquecida, profundidade de aquecimento, temperabilidade e meio de resfriamento ⁽¹⁾.

1.12 - SELEÇÃO DO PROCESSO

Têmpera à chama é basicamente adaptável ao endurecimento de superfícies e para o endurecimento de áreas selecionadas. Muitas vezes especificações de construção apresentam tratamento térmico para toda a peça, mas muitas vezes isto não é necessário. Pás de escavadeiras, rolamentos e engrenagens são exemplos onde somente há necessidade de se temperar as áreas de trabalho. Matrizes, muitas vezes, requerem têmpera somente ao longo das linhas de conformação.

Análises cuidadosas são necessárias, a escolha do processo aparentemente econômica, pode não corresponder a resultados satisfatórios como baixa dureza e distorções, aumentando o custo total de todo o processo de fabricação de uma dada peça.

Na seleção da têmpera à chama, muitas considerações devem ser dadas para o método de aplicação da chama na peça e a escolha da mistura dos gases. Os equipamentos diferem significamente no desenho dos sistemas de controle e queima da mistura dos gases.

As características de aquecimento da mistura de combustão determinam grandemente a profundidade da têmpera e a zona afetada de aquecimento. Padrões rasos de dureza (menos de 3,2 mm) podem ser obtidos com misturas de oxigênio/combustível por causa da alta temperatura da chama produzindo uma rápida transferência de calor. Padrão de dureza mais profunda podem permitir a utilização de outras misturas como ar/combustível, o aquecimento é localizado, mas maiores cuidados são necessários no controle de taxa de aquecimento para se evitar superaquecimento da superfície durante o desenvolvimento do aquecimento profundo ⁽¹⁾.

1.13 - MATERIAL A SER TEMPERADO

O uso de têmpera à chama é limitado a têmpera de aços (fundido ou trabalhado) e ferros fundidos. Durezas típicas por alguns destes materiais com seus respectivos meios de resfriamento estão apresentados na tabela ⁽²⁾.

Tabela 3: Resposta dos aços e ferros fundidos na têmpera à chama ⁽²⁾.

Material	Dureza (HRC) conforme resfriamento		
	Ar	Óleo	Água
Aço carbono			
1010-1020	50-60	58-62	62-65
1108-1120	50-60	50-60	62-65
1025-1035	...	...	33-50
1040-1050	...	52-58	55-60
1055-1075	50-60	58-62	60-63
1080-1095	55-62	58-62	62-65
1125-1137	...	...	45-55
1138-1144	45-55	52-57	55-62
1146-1151	50-55	55-60	58-64
Aços ligados			
1340-1345	45-55	52-57	55-62
3140-3145	50-60	55-60	60-64
3310	55-60	58-62	63-65
3350	55-60	58-62	63-65
4063	55-60	61-63	63-65
4130-4135	...	50-55	55-60
4140-4145	52-56	52-56	55-60
4147-4150	58-62	58-62	62-65
4337-4340	53-57	53-57	60-63
4347	56-60	56-60	62-65
4615-4620	58-62	62-65	64-66
4640	52-56	52-56	60-63
52100	55-60	55-60	62-64
6150	...	52-60	55-60
8615-8620	...	58-62	62-65
8630-8640	48-53	52-57	58-62
8642-8660	55-63	55-63	62-64
Aço Inoxidável Martensíticos			
410, 416	41-44	41-44	...
414, 431	42-47	42-47	...
420	49-56	49-56	...
440	55-59	55-59	...
Ferro Fundido			
Classe 30	...	43-48	43-48
Classe 40	...	48-52	48-52
Classe 45010	...	35-43	35-45
50007, 53004, 60003	...	52-56	55-60
Classe 80002	52-56	56-59	56-61
Classe 60-45-15	...	...	35-45
Classe 80-60-03	...	52-56	55-60

O máximo de dureza não é o único critério utilizado na escolha da têmpera à chama como tratamento térmico. A escolha das propriedades do aço são essenciais para minimizar distorções.

Alguns temperadores à chama sentem a importância de um alívio de tensões de todos aços ligados e outros aços com mais de 0,40% de carbono a temperatura de 175 a 245°C, dependendo das especificações dos clientes. Estas temperaturas, apesar de serem baixas, diminuem a dureza, mas também removem tensões internas e resgatam a tenacidade e ductilidade.

O aquecimento seletivo tem a desvantagem de desenvolver tensões residuais internas na superfície. Como uma área da superfície do metal é aquecida enquanto o resto permanece frio, o metal quente expande, se há restrição suficiente o metal aquecido ficará tensionado. Com um resfriamento este metal tensionado se reduzirá. Como resfria a temperatura ambiente, muitas vezes se estabilizará no seu estado de tencionamento, o que pode ser o bastante para trincar a peça. Quando uma peça está para ser temperada à chama, o responsável deveria trabalhar juntamente com o projetista para manter o nível de dureza e o carbono necessário, quanto mais baixo possível, a fim de se encontrar os requerimentos necessários. O teor de carbono é o fator mais importante para se determinar o nível de dureza que podem ser obtidos nos aços pela têmpera à chama. Ele também controla a tendência da peça à trincas e a tendência da formação de tensões residuais internas.

Para melhores resultados, aços temperados à chama deviam ser laminados, normalizados, resfriados à ar forçado ou resfriados e revenidos. Estes tratamentos resultam em microestruturas conduzivas à rápida e completa austenitização e têmpera completa. Na seleção dos aços para têmpera à chama, é importante que os passos necessários sejam levados a garantir que as áreas temperadas estejam livres de decarbonetação.

Quando a máxima resistência à fadiga é necessária, a superfície temperada deve conter tensões residuais de compressão. Em profundidade de dureza menores que 1,9 mm, normalmente apresenta tensões residuais de tração, é recomendado que a profundidade de dureza seja de no mínimo 2,7 mm para assegurar que as tensões residuais sejam de compressão. Esta profundidade é particularmente apropriada para construtores não equipados com equipamentos

de medição de tensões residuais. Além do mais, a microestrutura deve ter 90% de martensita, sem ferrita vizível com aumento de 500 vezes ⁽²⁾.

1.13.1 - FERROS FUNDIDOS NODULARES

Ferros fundidos cinzentos, nodulares e perlíticos que tem carbono combinado por volta de 0,35 a 0,80%, podem ser temperados à chama e responderão da mesma forma que os aços.



Figura 16: Micrografia do GGG-60, com 80% de perlita (aumento 160x, ataque nital) ⁽¹¹⁾

Ferros fundidos com menos de 0,35% de carbono combinado não responderão rapidamente à tempera à chama por causa da inabilidade da austenita em dissolver grafita durante o extremamente rápido aquecimento que ocorre na têmpera à chama. A têmpera à chama desses ferros fundidos produz uma dureza típica de aproximadamente 40 HRC. Ferros fundidos nodulares, em que todo carbono está na forma grafítica, não é aconselhável para têmpera por esta razão ⁽²⁾.

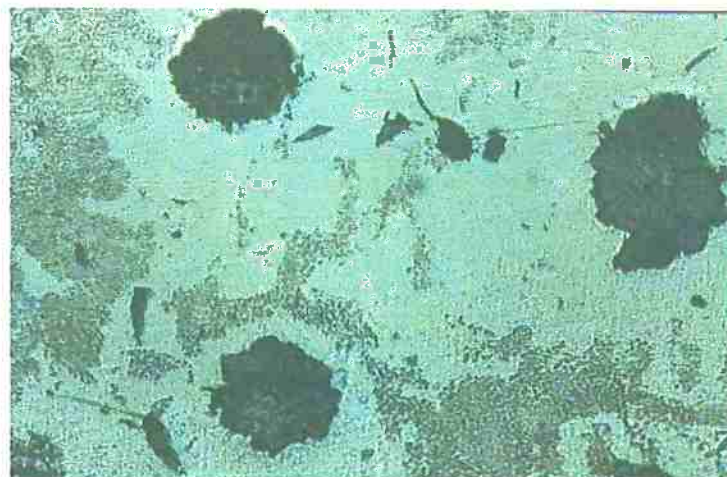


Figura 17: Micrografia do GGG-60, 20% perlítico (ataque nital, aumento 160x)⁽¹¹⁾

Ferros fundidos tendo mais do que 0,80% de carbono combinado são difíceis de se temperar por causa da sua inerente fragilidade e susceptibilidade à trincas quando aquecido e esfriado rapidamente. O baixo ponto de fusão do ferro fundido e a presença de grafita na microestrutura faz o ferro fundido ser susceptível à queima ou eventuais fusões localizadas durante a têmpera à chama. Desta maneira, extremo cuidado deve ser levado para reduzir a taxa de aquecimento quando o ferro fundido é temperado, utilizando o equipamento designado especialmente para têmpera à chama de aços. Por exemplo, a distância do cone interno da chama e a peça pode ser aumentado, ou a velocidade da chama pode ser diminuída. O uso de bicos de maçaricos com menores orifícios também podem ser utilizados.

Talvez o mais significativo fator na resposta dos ferros fundidos para têmpera à chama é a microestrutura. Ferros sem livre ferrita na microestrutura respondem instantaneamente no aquecimento à chama e requerem muito pouco tempo à temperatura de austenitização no momento em que é temperado. Com uma moderada quantidade de ferrita, a resposta pode ser satisfatória, mas com uma matriz ferrítica, típicos de ferros com grande ductilidade, requerem muitos minutos a 870°C para ser temperado com subsequente resfriamento. Uma matriz com perlita fina, rapidamente obtida por normalização, tem uma rápida resposta para têmpera na superfície ⁽²⁾.

1.13.1.1 - NORMALIZAÇÃO DE FERROS FUNDIDOS NODULARES

A normalização pode resultar num considerável aumento de propriedades e pode ser utilizado na produção de fundidos nodulares do tipo 100-70-03 e 120-90-02. A microestrutura obtida por normalização dependerá da composição dos fundidos e na taxa de resfriamento. A taxa de resfriamento depende da massa do fundido, mas também pode ser influenciado pela temperatura e movimento da circulação de ar durante o resfriamento. A normalização geralmente produz uma estrutura homogênea de fina perlita, isso, caso o metal não contenha alto conteúdo de silício e tenha um mínimo de manganês da ordem de 0,3 a 0,5%. Grandes fundidos devem conter elementos de liga como níquel, molibidênio e manganês adicional para desenvolvimento de uma estrutura toda perlítica após normalização. Fundidos leves feito de ferro ligado podem ser martensíticos após a normalização.

A temperatura de normalização é usualmente entre 870 a 940°C. O tempo de permanência padrão é de 1 hora por polegada da maior secção ou mínimo de 1 hora pode ser satisfatório, mas tempos curtos muitas vezes podem ser utilizados sem sucesso. Na tabela(4) seguinte apresentamos algumas temperaturas e tempo de permanência recomendados para a normalização de nodulares não ligados ⁽²⁾:

Tabela 4: Tempo e temperaturas de normalização ⁽²⁾

Secção	Temperatura	Tempo
mm	°C	horas
abaixo de 13	870	1
13 a 25	940	1
acima de 25	940	1

Estas temperaturas e tempos variam com a composição, especialmente com teores de silício e cromo. Elementos de liga tem uma função importante em fundidos nodulares na normalização. Moderadas adições aumentam a temperabilidade suficientemente ao mesmo tempo que a microestrutura de perlita fina pode ser obtida em normalização de fundidos com secções acima de 150 mm, considerando uma taxa de resfriamento adequada. Níquel ou cobre são preferidos como elementos de liga porque eles aumentam a resistência do fundido em toda

secção não formando carbetos. Molibdênio, em combinação com níquel, é efetivo no aumento de resistência e dureza.

A normalização normalmente é seguida por um revenimento para se obter dureza e alívio de tensões residuais que se desenvolvem durante o resfriamento. quando várias partes de um fundido, com diferentes secções resfriam a taxas diferentes. O efeito do revenimento na dureza e propriedades mecânicas dependem da composição do fundido e do nível de dureza obtido na normalização. Em geral, estruturas perlíticas, que resultam da normalização, amolecem menos que estruturas martensíticas obtidas por resfriamento líquido. O revenimento após normalização é também utilizado para se obter alta tenacidade, resistência ao impacto. Este, consiste do reaquecimento a temperaturas de 425 a 650°C e mantendo esta temperatura por um tempo de 1 hora por polegada da maior secção. Estas temperaturas variam com a dureza final desejada. A figura seguinte mostra o efeito da temperatura de revenimento pela dureza do fundido normalizado ⁽²⁾.

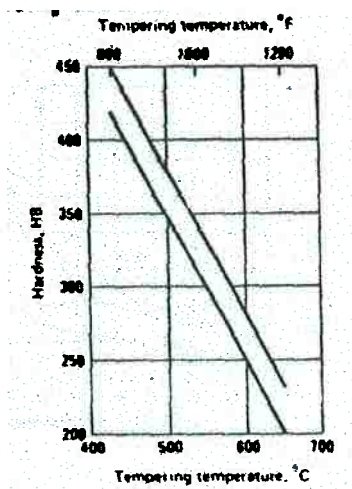


Figura 18: Temperatura de revenimento por 1 hora ⁽²⁾

1.13.1.2 - ALÍVIO DE TENSÕES DE FERROS FUNDIDOS NODULARES

Quando tratados termicamente, ferros fundidos nodulares de complexidade considerável podem ser aliviados de tensões residuais a temperaturas de 510 a 675°C. Temperaturas menores podem ser satisfatórias para muitas aplicações,

temperaturas maiores que esta faixa, eliminarão virtualmente todas tensões residuais, mas também causarão reduções na dureza e propriedades mecânicas.

A tempo requerido dependerá da temperatura utilizada, da complexidade do fundido e do completo alívio de tensões desejado, mas 1 hora por polegada da maior secção é uma boa prática.

O resfriamento deve ser uniforme para se evitar reintrodução de tensões. Os fundidos devem ser resfriados no forno até 290°C, depois, podendo ser resfriados ao ar ⁽²⁾.

1.14 - PROBLEMAS DA TÊMPERA À CHAMA E SUAS CAUSAS

A seguir, estão listados os problemas mais comuns envolvendo a têmpera à chama, encontrados na literatura (ref.: 1):

1.14.1 - SUPERAQUECIMENTO

- Medição incorreta do controle por pirômetro, mede temperaturas maiores;
- Ciclo de aquecimento muito longo;
- Maçaricos muito fracos para o processo;
- Número excessivo de orifícios no bico do maçarico;
- Oxigênio excessivo na chama;
- Pressão excessiva do gás combustível;
- Padrão impróprio do bico do maçarico.

1.14.2 - DUREZA ABAIXO DO MÍNIMO REQUERIDO

- Medição incorreta do controle por pirômetro, mede temperaturas menores;
- Ciclo de aquecimento muito curto;
- Severidade de resfriamento muito baixo;
- Atraso do resfriamento após aquecimento;
- Peça não resfriada corretamente;

- Material com temperabilidade muito baixa para o meio de resfriamento;
- Superfície descarbonetada.

1.14.3 - MANCHAS E TÊMPERA IRREGULAR

- Aquecimento não uniforme;
- Tempo de aquecimento e resfriamento muito longo;
- Meio de resfriamento insuficientemente agitado;
- Água ao invés de resfriamento com óleo;
- Oxidação em serviço;
- Meio de resfriamento impróprio;
- Superfície descarbonetada.

1.14.4 - DISTORÇÃO

- Formato da peça ou relação da porção a ser temperada com o resto da secção mal adaptada;
- Microestrutura inconveniente;
- Ciclo de aquecimento muito longo;
- Aquecimento não uniforme;
- Excessiva taxa de resfriamento;
- Material com temperabilidade excessiva.

1.14.5 - PROFUNDIDADE DE DUREZA RASA

- Material de baixa temperabilidade;
- Excessiva taxa de fluxo dos gases, checar se a chama é oxidante;
- Alta velocidade dos gases;
- Medição incorreta do controle por pirômetro, mede temperaturas maiores;
- Ciclo curto de aquecimento ou excessiva velocidade de progressão;

- Severidade do resfriamento muito baixa;
- Atraso do resfriamento após aquecimento.

1.14.6 - EXCESSIVA PROFUNDIDADE DE DUREZA

- Baixa taxa de fluxo dos gases, checar se a chama é redutora;
- Excessivo gás combustível na chama;
- Medição incorreta do controle por pirômetro, mede temperaturas maiores;
- Velocidade da chama muito baixa.

1.14.7 - EXCESSIVA OXIDAÇÃO SUPERFICIAL

- Ciclo de aquecimento muito longo;
- Taxa de fluxo dos gases muito baixa;
- Velocidade da chama muito baixa;
- Atraso do resfriamento após aquecimento;
- Arranjo impróprio do maçarico sobre a superfície a ser temperada.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 - HISTÓRICO

O processo, Têmpera à Chama, é aplicado em ferramentas de estampagem de repuxo profundo para fabricação de painéis metálicos automobilísticos. No caso em questão, tem como única finalidade de aumentar a resistência ao desgaste nas ferramentas, mantendo as propriedades no seu interior. O processo somente é aplicado nos raios negativos, onde se tem maior contato e maior abrasividade durante a conformação de uma chapa metálica .

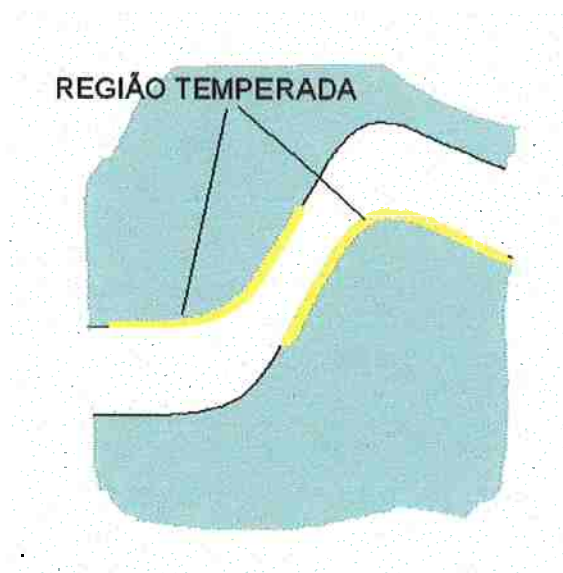


Figura 19: Locais necessários para têmpera à chama

2.2 - MATERIAL A SER TEMPERADO

Geralmente, todas as ferramentas de repuxo profundo são construídas de ferro fundido nodular. Tal material fornece características razoáveis em relação ao seu baixo custo. No entanto, confere excelente ductilidade e usinabilidade dependendo de sua microestrutura. Portanto, não somente o baixo custo como suas propriedades justificam sua utilização .

O ferro fundido utilizado é o GGG-60 (norma DIN), 60-45-15 (norma ASTM), tendo a seguinte composição:

Tabela 4: composição química do GGG-60 ⁽¹⁰⁾

C	Mn	P	S	Si	Mg	Cu
3,40~3,70	0,50~0,60	0,10 máx.	0,03 máx	2,20~2,50	0,05~0,07	0,60~0,80

Sua temperatura de austenitização é de 815°C .

2.2.1 - PROCEDIMENTO DE RECEBIMENTO

O material, além da composição química estar conforme a norma GGG-60, tem que ter um mínimo de 80% de perlita na sua microestrutura. Conforme visto anteriormente, item 1.15.1.1, esta microestrutura garante boas propriedades como ductilidade, usinabilidade e principalmente ótima resposta à têmpera à chama. Tal microestrutura é obtida por um tratamento de normalização. Consiste em aquecer o material a cerca de 900°C, mantendo-o por 1 hora por polegada da maior seção da peça seguido de um resfriamento adequado.

Após a normalização é necessário um tratamento de alívio de tensões. Nos resfriamentos tanto após a fundição como na normalização, devido também à complexidade da ferramenta, o resfriamento não é uniforme, havendo grande acúmulo de tensões residuais, podendo posteriormente haver ocorrência de trincas e empenamentos. O recozimento de alívio de tensões, como é chamado, consiste num aquecimento no forno, a partir de 300°C, com uma taxa de aquecimento de 50°C por hora. Mantendo-o num patamar de 560 a 600°C por uma hora mais uma hora por polegada da maior seção da peça, ou no máximo de 4 horas. Resfriar juntamente ao forno a uma taxa de 40°C por hora até 290°C .

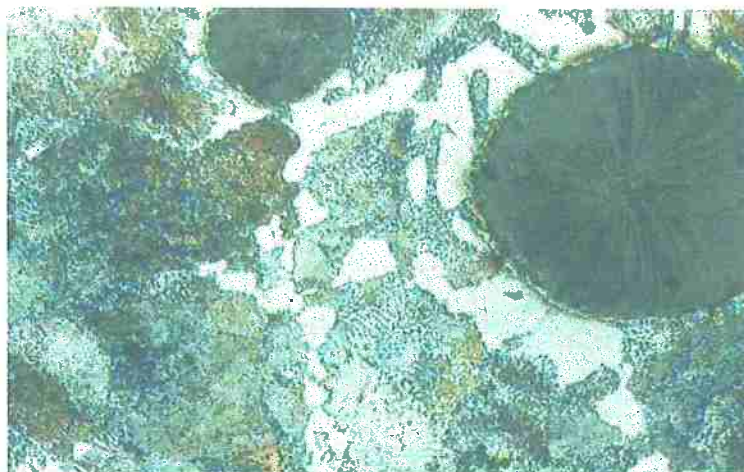


Figura 20: Microestrutura de fornecimento, 80% perlítico (ataque nital, aumento de 160x).

2.2.2 - ETAPAS DE CONSTRUÇÃO

Após o recebimento, com a microestrutura especificada, são realizadas várias etapas de usinagem e de montagem dos componentes na ferramenta. A ferramenta é encaminhada para ajustes em prensas, analisando a qualidade da peça estampada. A têmpera à chama somente é realizada após a ferramenta ser aprovada para a linha de produção. Após a têmpera, é realizado um último polimento, com intuito de dar bom acabamento e detectar possíveis falhas ocorridas durante a têmpera à chama.



Figura 21: Usinagem ⁽⁸⁾



Figura 18: Try-out, etapa de ajustes ⁽⁸⁾

2.3 - PROCESSO EMPREGADO

São vários motivos que justificam a têmpera à chama como tratamento térmico de têmpera:

- Baixíssimo custo comparado com outros processos;
- Devido às suas dimensões, são Impraticáveis ou economicamente inviáveis nos tratamentos em fornos. Existem fornos de grandes dimensões nas empresas de tratamentos térmicos, porém é inviável a perda de tempo e custos de transporte durante a construção;

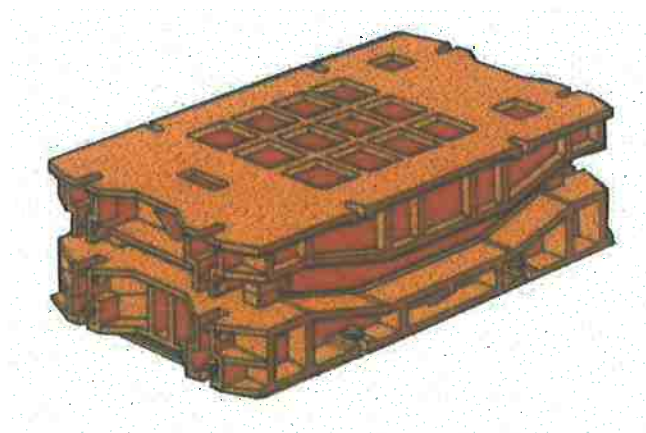


Figura 23: As ferramentas medem em média 2 x 4 metros ⁽⁷⁾

- A têmpera à chama, no caso, somente é necessária nos raios negativos da área de trabalho da ferramenta. No tratamento em fornos poderiam ocorrer distorções;

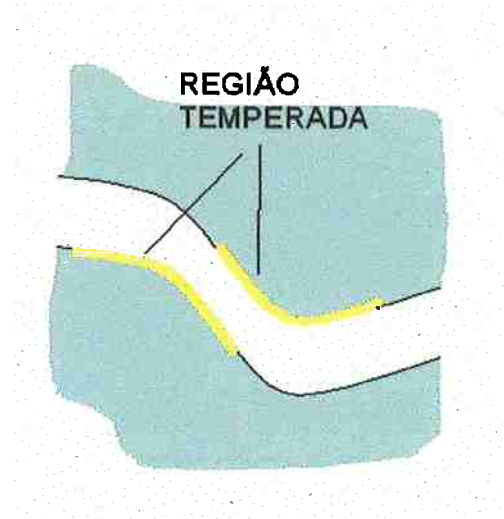


Figura 24: Regiões necessárias de têmpera

- Fácil locomoção do equipamento, o processo pode ser empregado em qualquer local da fábrica;
- Apesar da média temperabilidade do ferro fundido nodular, pode ser utilizado resfriamento ao ar, onde o resfriamento em meio líquido seria prejudicial para a ferramenta.

2.4 - EQUIPAMENTO EMPREGADO

- Maçaricos de solda modelos W-55 e W-30 (modelos mais empregados para solda e para tal finalidade);

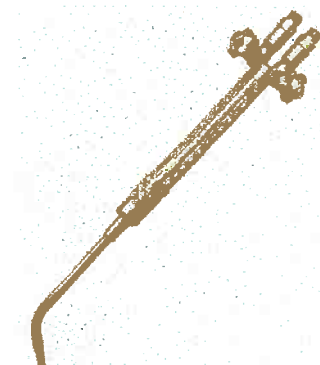


Figura 25: Modelo do maçarico de solda mais utilizado p/ têmpera à chama ⁽⁹⁾

- Cilindro de gás oxigênio;
- Reguladores de pressão.
- Cilindro de gás acetileno;

2.5 - VARIÁVEIS DO PROCESSO

2.5.1 - CHAMA

Nos experimentos foi utilizada a chama neutra, é a chama resultante da mistura de acetileno com oxigênio, com um pequeno excesso de oxigênio. Esta chama pode atingir uma temperatura de 3100°C . Apresenta em seu visual duas zonas bem distintas: o cone e o envoltório. Uma outra característica deste tipo de chama é o som sibilante emitido pelo bico .



Figura 26: Chama neutra utilizado no processo⁽⁵⁾

2.5.2 - VELOCIDADE DE PROGRESSÃO

Velocidade de progressão é a velocidade na qual se conduz o maçarico sobre o metal durante o processo de têmpera. Objetivando aquecer o material na temperatura de austenitização, cerca de 850°C (ferro fundido nodular), a velocidade de progressão varia de acordo com a intensidade de aquecimento da chama. Isto é, menores taxas de aquecimento da chama necessitam de menor velocidade de progressão para aquecer o material a uma temperatura definida. Por isto, é de extrema importância definir corretamente a velocidade de progressão a partir da intensidade de aquecimento e temperatura de aquecimento

do metal. Velocidades não compatíveis com o aquecimento podem queimar o metal, ou de modo inverso, não aquecer o metal a temperatura desejada.

Na prática, a velocidade de progressão é definida pelo operador a partir da temperatura em que o metal se encontra. É uma aferição visual, pela cor do metal aquecido, que depende muito da prática do operador.

Pelo tipo da chama, pressão dos gases e temperatura de austenitização, foi definido pelo operador uma velocidade de progressão de aproximadamente 5 mm/s. Tal velocidade foi definida numa peça, à temperatura ambiente, onde somente um simples passe foi requerido.

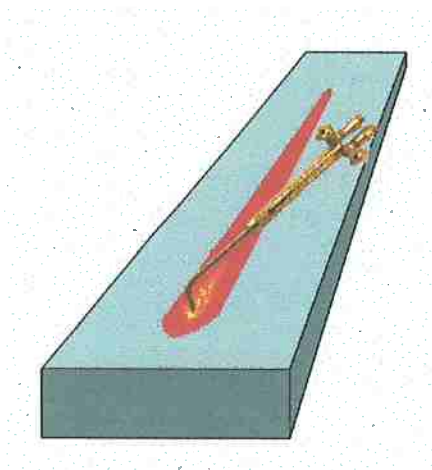


Figura 27: Velocidade de progressão num único e simples passe

Em casos reais, como por exemplo para têmpera à chama em ferramentas de repuxo, pode existir uma grande quantidade de regiões muito próximas que necessitam da têmpera. Isto é, quando têmperas próximas e consecutivas são realizadas, acúmulos de calor são inevitáveis, portanto, para uma mesma taxa de aquecimento, quanto maior calor já existente no metal, maiores velocidades de progressão são suficientes para se alcançar a temperatura de austenitização.

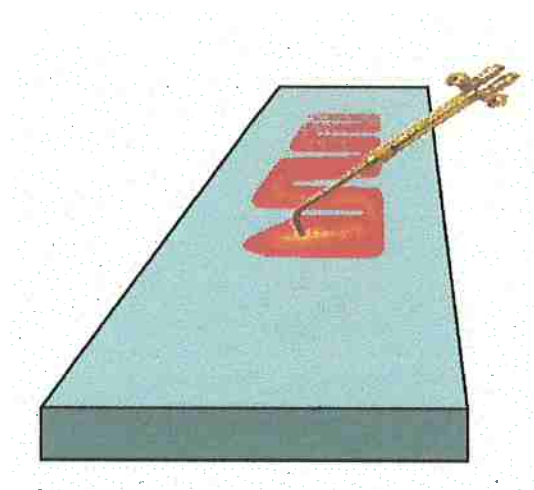


Figura 28: Velocidade de progressão em casos reais

2.5.3 - DISTÂNCIA DO CONE INTERNO DA CHAMA À PEÇA

No nosso caso, a distância foi mantida durante o processo em aproximadamente 3 a 4 mm.

2.5.4 - RESFRIAMENTO

Apesar do ferro fundido nodular (GGG-60) ser de média temperabilidade e temperável por água na têmpera convencional ⁽¹⁾, ele é resfriado ao ar na têmpera à chama, obtendo uma profundidade de dureza de cerca de 2 mm de profundidade (suficiente para tal propósito). Apesar de se obter melhores resultados com resfriamento à água ou óleo, isto é impraticável nas ferramentas, pois apresentam estruturas complexas de difícil escoamento do líquido causando oxidações dentre outros problemas. Além do que, na têmpera à chama não é viável a utilização de óleos devido ao problema da fácil combustão junto ao gás acetileno.



Figura 29: Complexidade de uma ferramenta.

3 - PARTE EXPERIMENTAL

3.1 - NOTAS PRELIMINARES.

A maioria dos ensaios foram realizados a fim de solucionar os problemas mais importantes, frequentes ou que foram surgindo no decorrer do estágio. Alguns problemas, de solução complexa e, do fato de depender de diversas variáveis como tipo de material e das variáveis do processo, não apresentam uma única solução, portanto, não são apresentados claramente ou dificilmente encontrados na literatura. Outros problemas mais simples, apesar de alguns estarem apresentados na parte teórica (ítem 1.14), não apresentam soluções ao alcance da realidade brasileira, portanto alguns deles também são apresentados.

Os ensaios são apresentados de forma que, dado um problema, sejam feitas análises e conclusões seguindo a ordem de apresentação dos ensaios realizados.

3.2 - SURGIMENTO DE TRINCAS E EMPENAMENTOS DURANTE OU APÓS A TÊMPERA À CHAMA

3.2.1 - NÃO HOUE CORRETO ALÍVIO DE TENSÕES

Reavaliar o procedimento de recebimento:

Verificar se houve correto alívio de tensões, procedimento na revisão bibliográfica (item 1.13.1.2), Existem muitas tensões residuais originárias tanto da fundição como normalização. Tais trincas podem surgir em regiões adjacentes aos passe de têmpera. Dificilmente estas trincas poderiam aparecer no meio do passe de têmpera pois o processo, causa tensões residuais de compressão na superfície, impedindo o surgimento destas trincas. Mas, nas regiões adjacentes aos passes de têmpera, podem haver acúmulo de tensões residuais de tração que, com ou sem auxílio das tensões térmicas provenientes do processo, podem auxiliar na formação e propagação destas trincas.

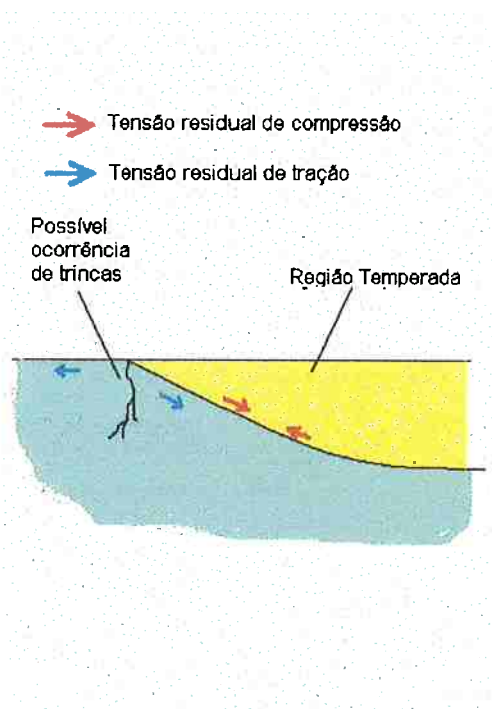


Figura 30: Locais prováveis de trincas

3.2.2 – NÃO HOUVE CORRETA NORMALIZAÇÃO

Reavaliar a microestrutura:

Conforme visto anteriormente na parte teórica (item 1.15), estruturas praticamente perlítica, o metal é altamente susceptível à trincas devido ao processo de têmpera à chama: rápido aquecimento e rápido resfriamento ⁽²⁾.

3.2.3 – PROCEDIMENTO INCORRETO

Reavaliar o processo:

Conforme visto anteriormente, o superaquecimento devido ao excesso de raios que necessitam de têmpera e também devido às falhas do processo como baixa taxa de aquecimento, podem causar trincas no material. Tais trincas, tanto nas regiões dos passes como nas regiões adjacentes aos passes, formadas devido ao grande acúmulo de tensões térmicas devido ao superaquecimento, com ou sem auxílio de provável existência de tensões residuais pré existentes.



Figura 31: Conforme a peça estampada, sua ferramenta fica altamente susceptível às trincas térmicas e desgaste excessivo (baixa dureza), devido ao superaquecimento causado no processo de têmpera à chama ⁽⁷⁾

3.2.4 – VERIFICAR FALHA NO PROJETO

Ferramentas de dimensões onde o comprimento é muito maior que a largura, durante o aquecimento poderá ocorrer empenamentos visíveis devido às tensões térmicas introduzidas no processo de têmpera à chama, principalmente com um superaquecimento. Portanto, tal ferramenta deve ser estruturada mecanicamente, maior resistência longitudinal, a fim de se evitar os empenamentos.



Figura 31: Ferramenta susceptível à empenamentos

3.2 – BAIXA DUREZA

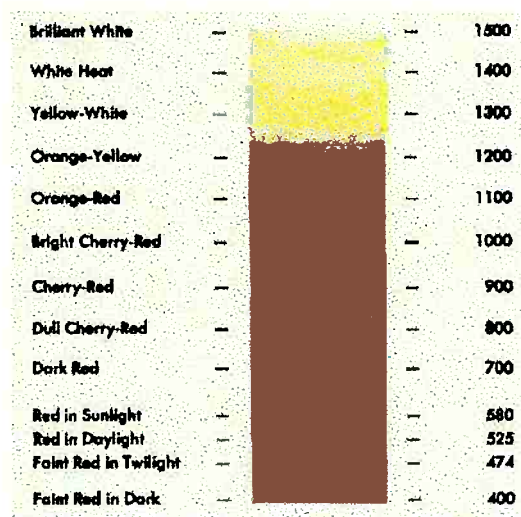
3.2.1- TEMPERATURA DE AQUECIMENTO ABAIXO DA TEMPERATURA DE AUSTENITIZAÇÃO:

Reavaliar as variáveis do processo:

- Diminuir a velocidade de progressão;
- Aumentar a velocidade de aquecimento;
 - Aumentando a velocidade dos gases;
 - Variando a distância do cone interno da chama à peça

Reavaliar as habilidades do operador:

- Providenciar tabelas comparativas de cor e temperatura do material conforme mostrado a seguir:



Brilliant White	---	1500
White Heat	---	1400
Yellow-White	---	1300
Orange-Yellow	---	1200
Orange-Red	---	1100
Bright Cherry-Red	---	1000
Cherry-Red	---	900
Dull Cherry-Red	---	800
Dark Red	---	700
Red in Sunlight	---	580
Red in Daylight	---	525
Faint Red in Twilight	---	474
Faint Red in Dark	---	400

Figura 32: Relação entre cor e temperatura (C°) do metal durante aquecimento

- Providenciar gizes térmicos (Tempilsticks).

São diversos gizes, as quais variam de cor a uma determinada temperatura. Por exemplo: caso necessito da temperatura de 850°C, utilizo um giz que mudam de cor à 800°C e outro à 900°C, passando-os na superfície a ser temperada. Durante o processo, garanto a temperatura dentro da faixa quando um giz muda de cor e o outro não.

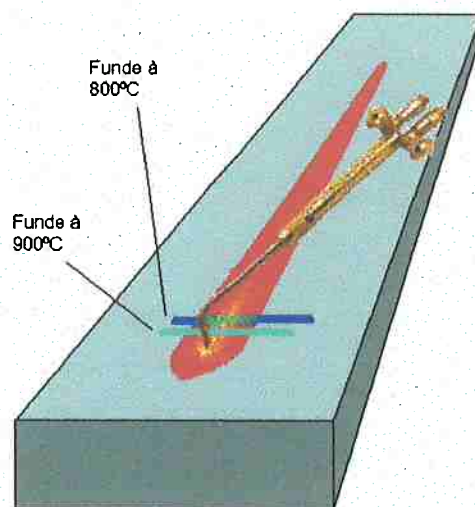


Figura 33: Utilização dos gizes térmicos

Obs.: este procedimento também evita a queima do material.

3.3.2 - MICROESTRUTURA FORA DO ESPECIFICADO

Caso a microestrutura esteja fora do especificado, menor que 80% de perlita, conforme apresentado na revisão bibliográfica (item 1.13.1), não haverá resposta adequada na têmpera à chama devido à pouca permanência na temperatura de austenitização do processo ⁽²⁾.

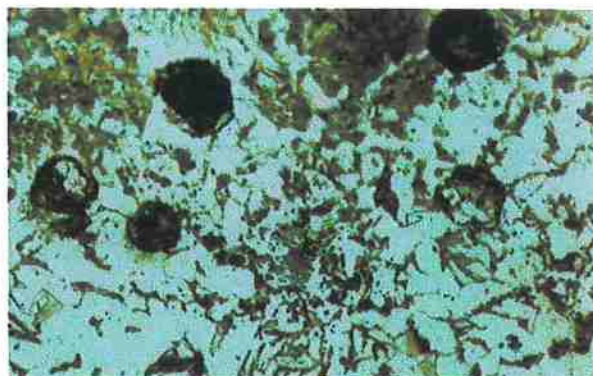


Figura 33: Têmpera em estruturas praticamente ferríticas. (dureza média por volta de 35 HRC)(ataque nital, aumento de 160 x)

Avaliar a microestrutura da peça:

- Verificar se o material foi normalizado corretamente (procedimento apresentado na parte prática (item 1.13.1.1))
- Verificar se houve distorção no modelo de isopor:

O processo de fundição das ferramentas de grande porte é o “Full-Mold” onde o modelo é feito de isopor. Pelas grandes dimensões do modelo, pode sofrer distorções tanto no transporte como na preparação do molde de areia. Apesar da especificação de se manter um sobremetal de 8~10 mm em áreas de trabalho, devido às distorções, pode haver ocorrências de falta de material após as usinagens, estes locais são compensados por soldas.

No entanto, caso haja regiões próximas às superfícies brutas de fundição, acarretarão em dois problemas.

3.3.2.1 - Descarbonetação:

Ocorrem numa faixa de 1 a 2 mm de profundidade da superfície bruta de fundição. São regiões descarbonetadas onde a microestrutura é praticamente ferrítica, prejudicando a têmpera à chama conforme citado anteriormente (microestrutura fora do especificado).

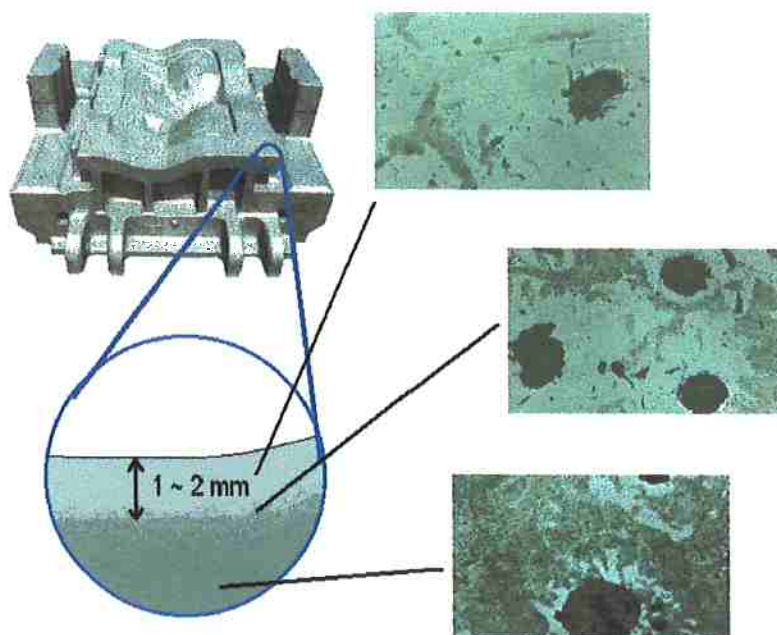


Figura 34: Estrutura bruta de fundição, pode apresentar uma camada de 1 a 2 mm de espessura de microestrutura descarbonetada e com porosidades .

3.3.2.2 - Microporosidades:

Também ocorre próxima à superfície bruta de fundição, podendo além da queda de dureza, haver queima do material durante o processo de têmpera à chama.



Figura 35: O poro também é uma superfície descarbonetada, além de poder causar queima do metal, sofre as mesmas consequências de uma estrutura bruta de fundição.

Como solução pode se aumentar o sobremetal da peça no projeto.

3.3.3 – SOBREPASSES E SUPERAQUECIMENTO

São os problemas mais complexos encontrados na têmpera à chama. O processo em si é de grande versatilidade e de ótima resposta quando se quer uma têmpera localizada. Porém, quando maiores áreas são necessárias, é inevitável que ocorram passes próximos ou sobrepasses. Numa forma simples: um passe de têmpera pode reaver um passe próximo, executado anteriormente. E quando faixas largas são necessárias, pode haver sobrepasses, superaquecendo o metal, não havendo um resfriamento que se caracterize como têmpera.

3.3.3.1 - SOBREPASSES

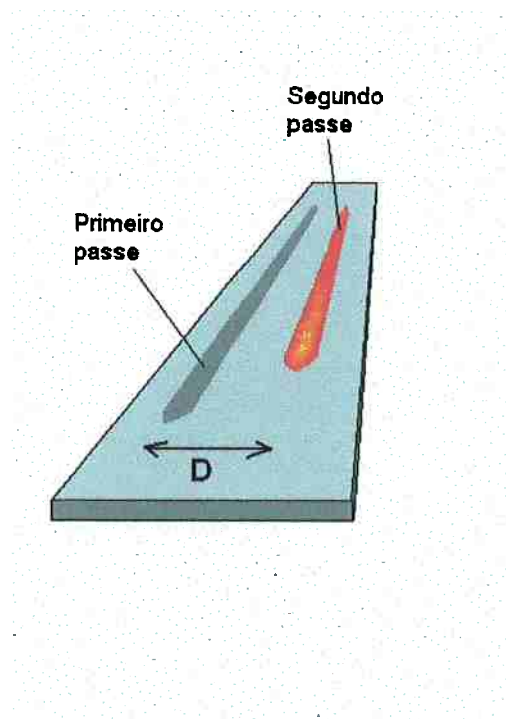


Figura 36: Efeito do segundo passe de têmpera sobre o primeiro

Foram realizados diversos ensaios, a fim de se verificar o valor de "D", para que não haja influência do segundo passe sobre o primeiro.

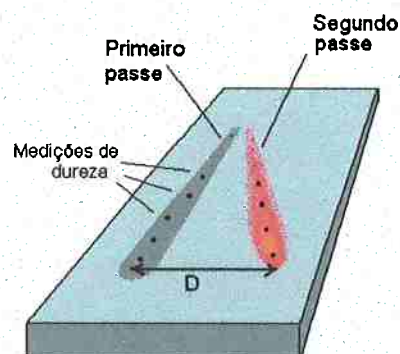
ENSAIOS:

Figura 37: Ensaio realizado em áreas não solicitadas da ferramenta

Foram realizadas várias medidas de dureza, tanto no primeiro passe quanto no segundo passe, conforme ilustrado na figura acima. Os dados coletados e o respectivo gráfico estão dispostos na próxima página.

O ensaio também foi realizado para o maçarico de menor orifício (W-30).

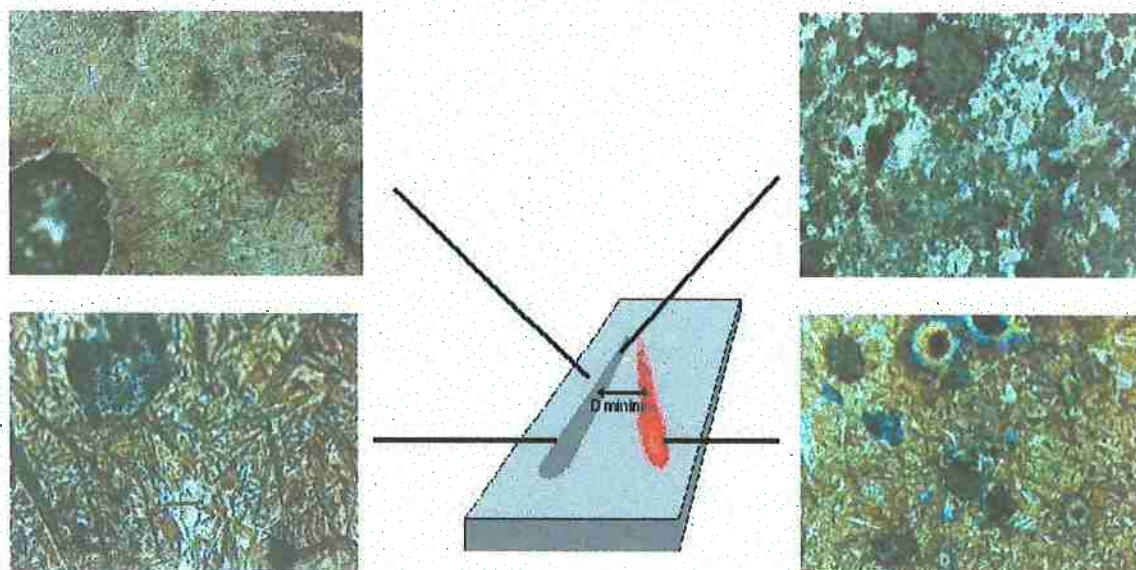
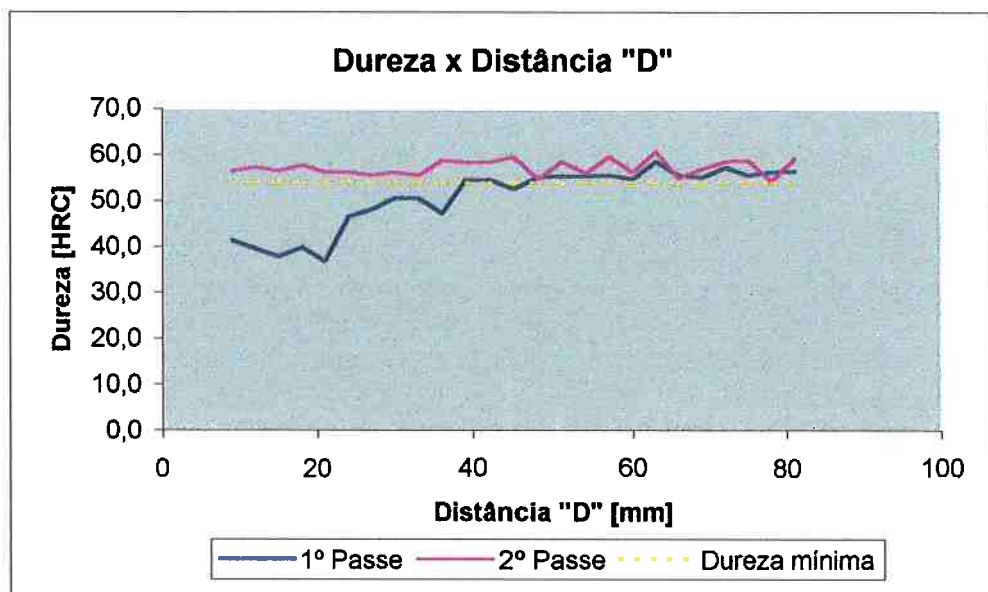
ANÁLISE METALGRÁFICA:

Figura 38: Análise metalográfica do ensaio acima. (ataque nital, aumento 160x)

ANÁLISE DE DUREZA

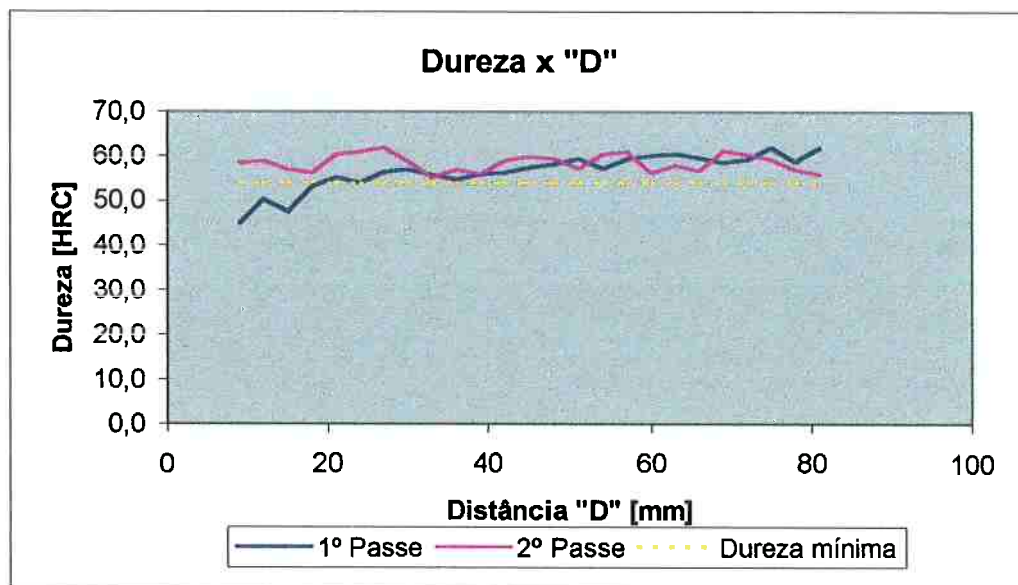
Maçarico W-50

Dureza (HRC)		
Dist. (mm)	1º Passe	2º Passe
9	41,4	56,5
12	39,5	57,3
15	37,9	56,5
18	39,8	57,8
21	36,8	56,2
24	46,5	56,2
27	48,1	55,6
30	50,6	56,2
33	50,5	55,6
36	47,3	58,8
39	54,5	58,3
42	54,6	58,4
45	52,6	59,5
48	55,1	54,8
51	55,4	58,6
54	55,3	56,0
57	55,5	59,6
60	54,8	56,2
63	58,6	60,7
66	55,5	55,0
69	55,1	57,0
72	57,3	58,6
75	55,6	58,8
78	56,2	54,3
81	56,5	59,2



Maçarico W-33

Dureza (HRC)		
Dist. (mm)	1º Passe	2º Passe
9	45,0	58,5
12	50,3	59,0
15	47,6	57,0
18	53,2	56,3
21	55,3	60,4
24	54,0	61,0
27	56,4	62,0
30	57,0	58,9
33	55,9	55,3
36	54,8	57,0
39	56,0	56,0
42	56,3	59,0
45	57,4	59,9
48	58,3	59,4
51	59,4	57,3
54	57,3	60,5
57	59,4	61,0
60	60,2	56,3
63	60,5	58,0
66	59,7	56,8
69	58,6	61,3
72	59,3	60,4
75	62,0	59,3
78	58,9	57,0
81	62,0	56,0



DISCUSSÕES:

A partir dos gráficos é possível constatar que a partir de um valor de “D” não existe influência de um passe sobre outro.

Para o maçarico convencional (W-55), mais utilizado, a distância mínima encontrada é de aproximadamente de 40 milímetros.

Para o maçarico de menor orifício (W-30), a distância mínima encontrada é de cerca de 30 milímetros.

Pela análise metalográfica é possível constatar que a influência do segundo passe sobre o primeiro, é na forma de revenimento. Nas micrografias do primeiro passe são encontradas:

- Martensita revenida, dureza por volta de 45 HRC, para “D” igual a 40 mm;
- Martensita revenida juntamente com perlita e ferrita, 35 ~ 40 HRC, para “D” igual a 10 mm.

BICO MULTI-CHAMAS

A fim de se tentar solucionar a necessidade de se temperar raios próximos ou faixas largas, é encontrado na literatura ⁽¹⁾ a utilização de maçaricos com bico multi-chamas.

No Brasil ainda não se tem tecnologia para fabricá-los. Juntamente com a White Martins e a Ledan, foram testados alguns tipos de maçaricos, normalmente utilizados para pré-aquecimento à chama.

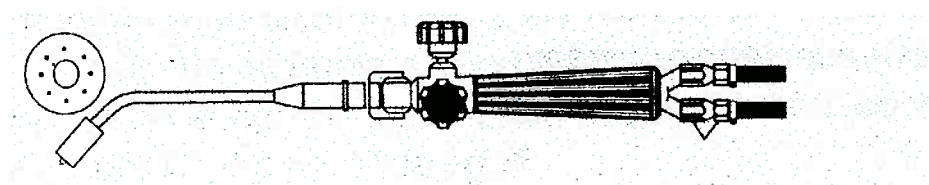


Figura 39: Bico multi-chama utilizado para pré-aquecimento

Os resultados não foram nada satisfatórios. Apesar de abranger uma faixa muito mais larga (cerca de 40 mm), ele não tem capacidade para produzir uma chama de alta taxa de aquecimento. Houve um superaquecimento tão grande que a dureza obtida foi menor do que a dureza do metal antes da têmpera.

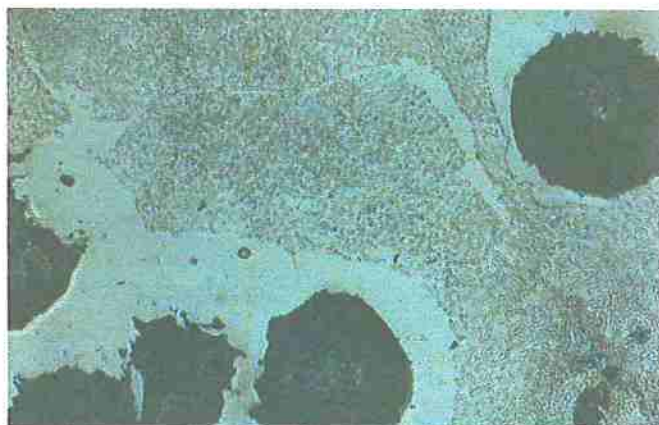


Figura 40: Micrografia do ferro fundido nodular, na tentativa de têmpera com bico multi-chamas (ataque nital, aumento de 160x)

A dureza do metal antes da têmpera era de aproximadamente 250 Hbrinell, após a tentativa da têmpera com o bico multi-chama, a dureza caiu para cerca de 180 Hbrinell. O resfriamento foi lento, o suficiente, para que a microestrutura ficasse quase que totalmente ferrítica, tratamento térmico de ferritização.

A incapacidade da taxa de aquecimento não se deve diretamente ao bico multi-chama, tanto o cilindro de acetileno como o de acetileno não tem capacidade para suprir tanta pressão de gás, pois com maior número de orifícios é necessária uma pressão muito maior para que haja um fluxo de gás que forneça uma taxa de aquecimento suficiente para que a têmpera ocorra.

Outra forma de abranger uma faixa mais larga de têmpera, é conduzir o maçarico na forma de “zigue-zague”:

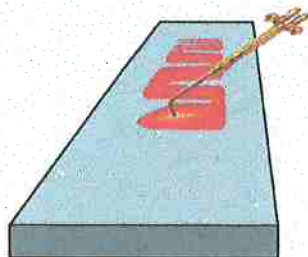


Figura 41: Têmpera em forma de “Zigue-zague” .

Porém, caso realize uma faixa muito larga, terei problemas semelhantes ao do bico multi-chamas. No tópico a seguir, existem maiores detalhes sobre este procedimento.

3.3.3.2 - SUPERAQUECIMENTO

Os ensaios foram realizados com o intuito de se definir uma largura máxima “L” da forma “zigue-zague” para que se obtenha valores de dureza aceitáveis.

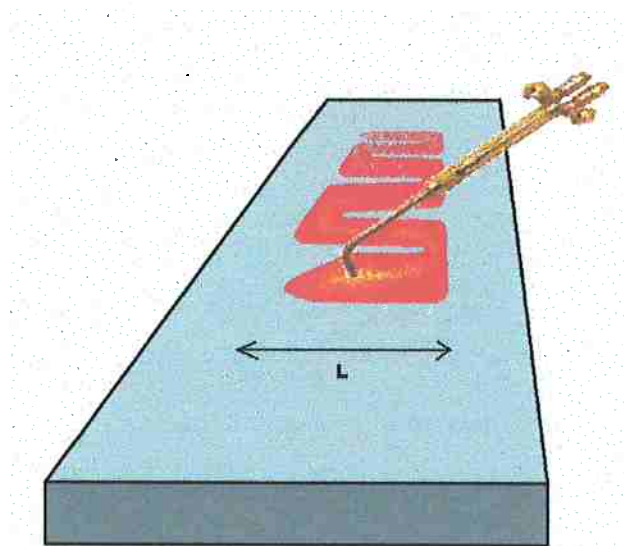


Figura 42: Procedimento dos ensaios realizados na forma “zigue-zague”

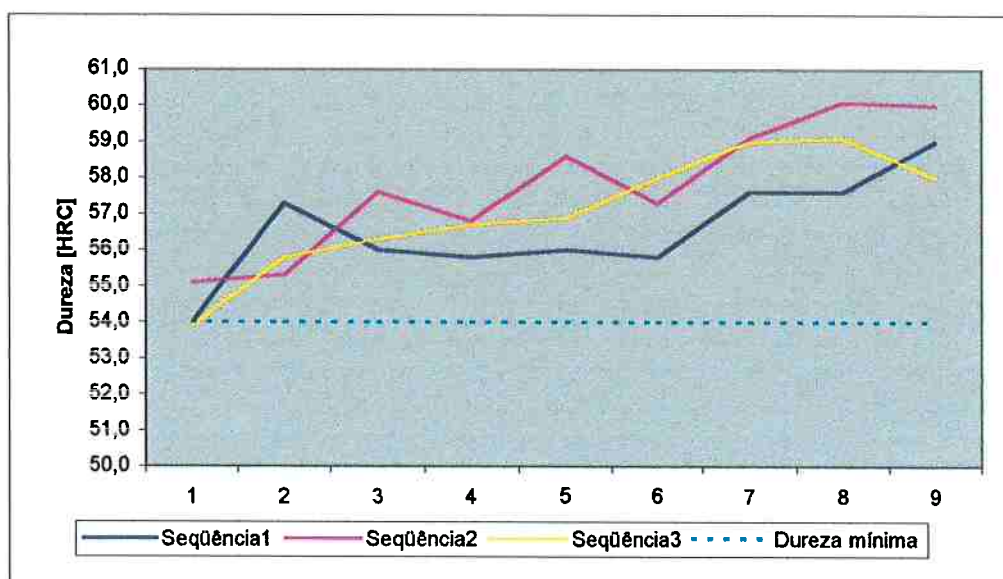
ENSAIOS:

Foram realizados diversos ensaios com valores de “L” diferentes (15, 30, 45 e 60 mm)

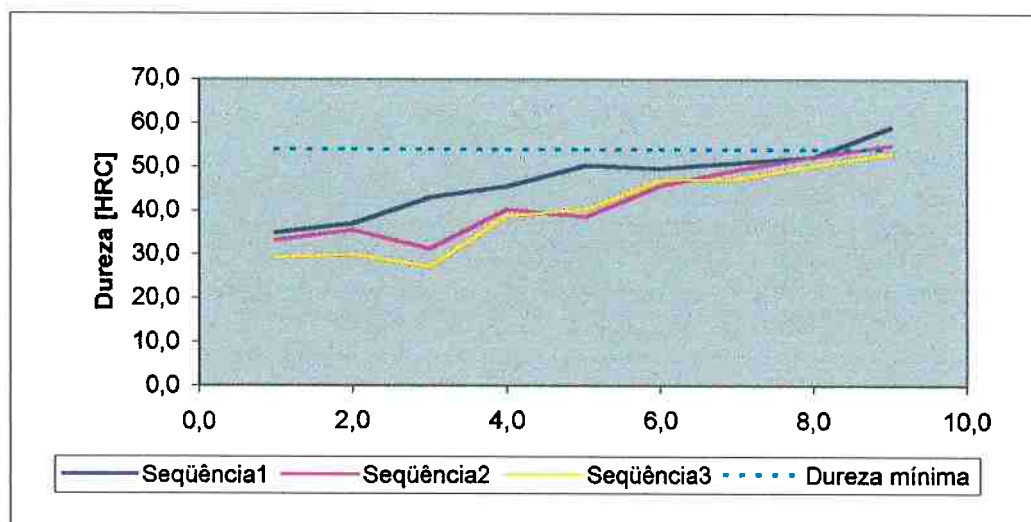
ANÁLISE DE DUREZA:

L = 15 mm

Dureza [HRC]								
Início	Meio							Fim
54,0	57,3	56,0	55,8	56,0	55,8	57,6	57,6	59,0
55,1	55,3	57,6	56,8	58,6	57,3	59,1	60,1	60,0
53,9	55,8	56,3	56,7	56,9	58,0	59,0	59,1	58,0

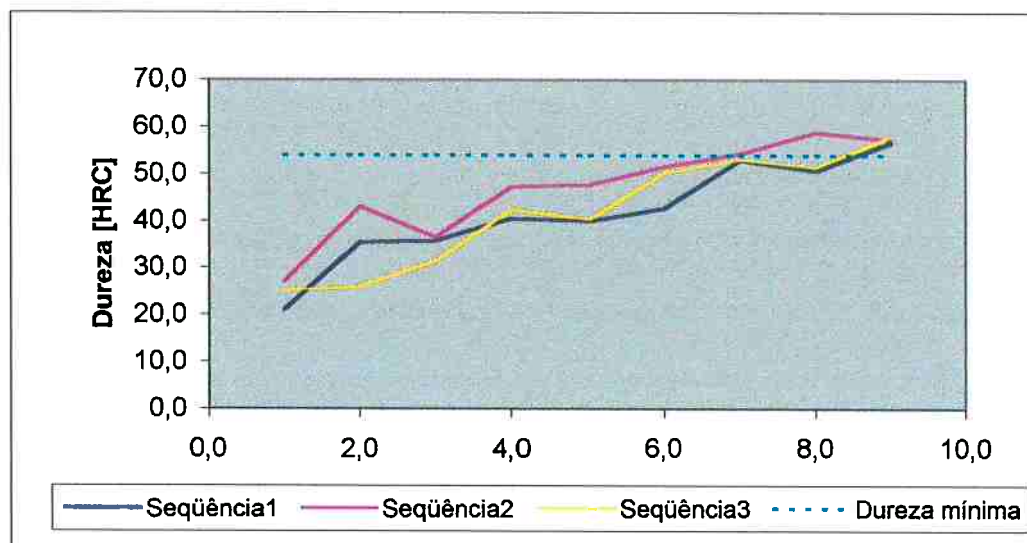
**L = 30 mm**

Dureza [HRC]								
Início	Meio							Fim
35,0	37,0	43,0	45,6	50,3	49,6	51,0	52,3	59,0
33,2	35,6	31,3	40,3	38,6	45,7	49,3	52,4	55,0
29,3	30,0	27,3	38,9	40,3	47,0	47,3	50,3	53,2

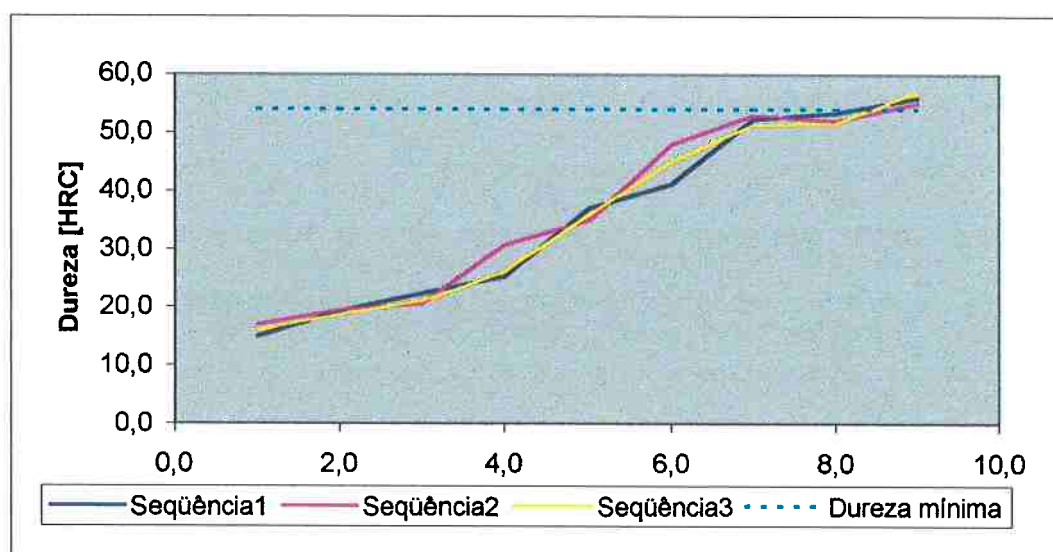


L = 45 mm

Dureza [HRC]								
Início	Meio							Fim
21,0	35,4	35,7	40,5	39,9	42,7	52,9	50,7	56,7
27,1	43,0	36,5	47,2	47,7	51,6	54,3	58,9	57,3
25,2	26,0	31,4	42,3	40,3	50,3	53,0	51,3	58,0

**L = 60 mm**

Dureza [HRC]								
Início	Meio							Fim
15,0	19,3	22,3	25,3	37,0	41,2	52,3	53,4	56,0
17,0	19,5	20,6	30,7	35,0	48,0	53,0	52,0	55,0
16,0	18,7	21,0	26,0	36,0	45,0	51,4	51,6	57,0



ANÁLISE METALOGRÁFICA:

- L = 15 mm:

Ao longo desta faixa, além da constância de dureza, foi encontrada praticamente a mesma estrutura ao longo da faixa temperada:

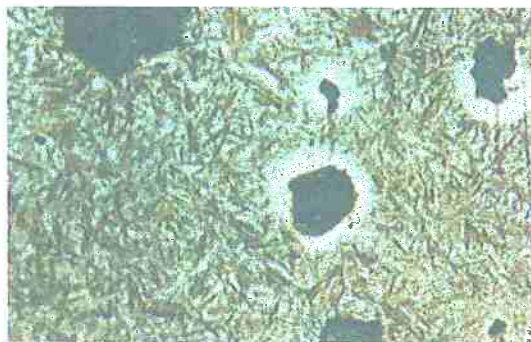


Figura 43: Micrografia para L = 15 mm (ataque nital, aumento de 160x)

Para Valores de “L” maiores que 30 mm, não obtemos uma constância de microestrutura ao longo da faixa temperada.

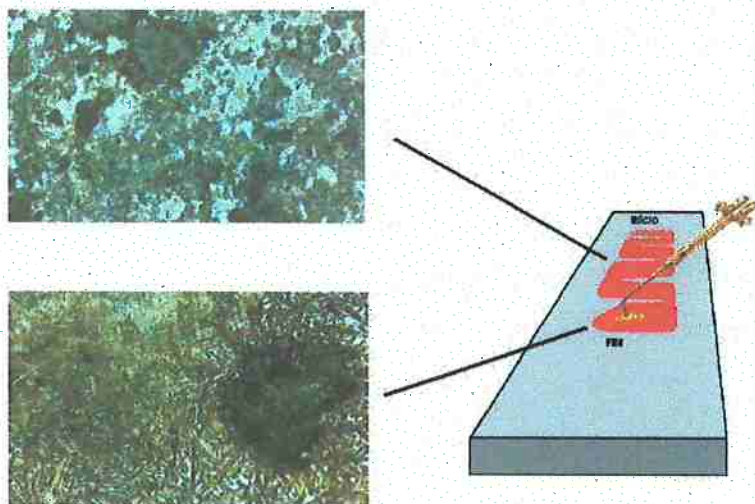


Figura 44: Micrografia de meio e fim, para faixas de têmpera maiores que 30mm.

- L = 30 mm



Figura 45: Micrografia da região inicial de têmpera para faixas de 30 mm (ataque nital, aumento de 160x)

- L = 45 mm

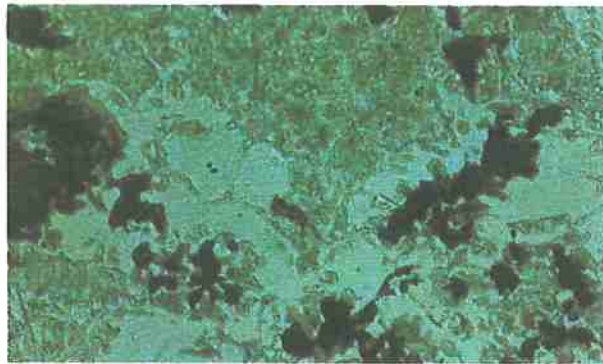


Figura 46: Micrografia da região inicial de têmpera para faixas de 45 mm (ataque nital, aumento de 160x)

- L = 60 mm

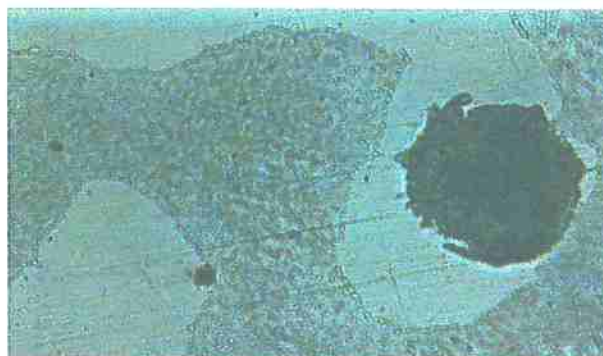


Figura 47: Micrografia da região inicial de têmpera para faixas de 60 mm (ataque nital, aumento de 160x)

DISCUSSÕES:

Pelos ensaios de dureza obtidos, pode se concluir que para valores acima de 30 mm, são notados queda de dureza ao longo da faixa temperada. Portanto para valores de L menores ou iguais a 20 mm, garantem a homogeneidade e padrão de dureza (faixa de 54 ~ 60 HRC).

As análises metalográficas também indicam tais conclusões. Para valores de L, inferiores a 20 mm, existe uma constância de microestrutura de martensita. Para valores maiores que 30 mm, conforme já constatado pelas análises de dureza, ocorre uma mudança na microestrutura, principalmente na região inicial da têmpera.

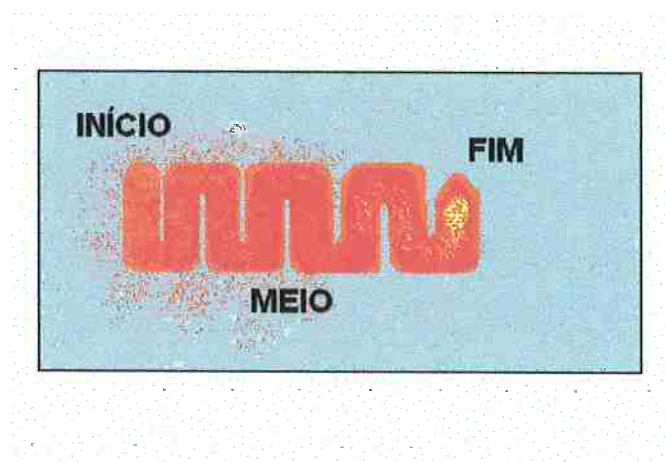


Figura 48: Zigue-zague

Na região inicial, vão ocorrendo acúmulos de calor tanto maior, quanto maior a largura da faixa temperada. Tal superaquecimento causado nas regiões iniciais, tornam o resfriamento muito lento e, conforme microestrutura analisada, este resfriamento pode até caracterizar-se por um tratamento térmico de ferritização, conforme obtido em faixas de 60 mm. Isto pode ser melhor visualizado num ciclo térmico ocorrido em um determinado ponto na região inicial de têmpera.

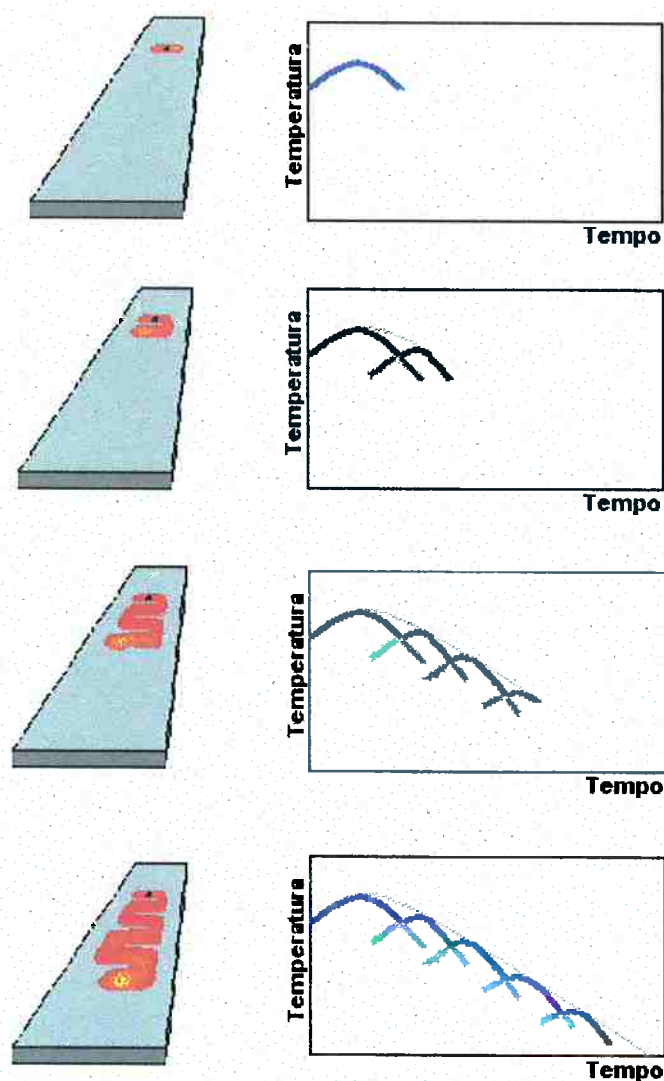


Figura 49: Ciclos térmicos numa região inicial de têmpera.

Quanto maior a largura da faixa a ser temperada, menor será a taxa de resfriamento. Para cada faixa teremos um ciclo térmico conforme ilustrado na próxima figura. Para saber a microestrutura final, basta comparar o ciclo térmico com o diagrama TTT, presente no item 1.

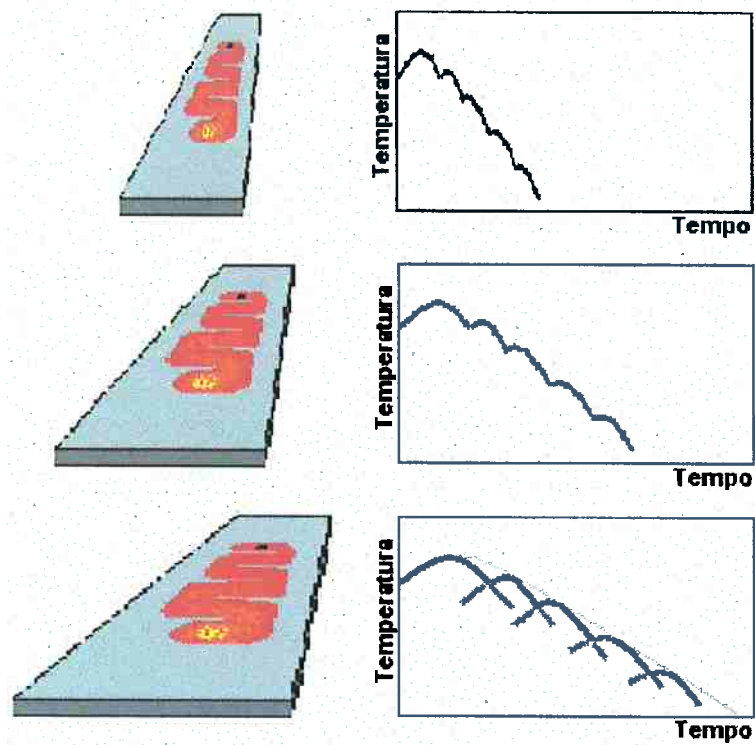


Figura 50: Diferentes ciclos térmicos para diferentes larguras de faixas

4 - CONCLUSÕES:

O processo é de grande utilidade devido à sua versatilidade, aos bons resultados e principalmente pelos baixos custos que ele proporciona.

O processo aparenta grande simplicidade. Porém, existe uma enorme quantidade de variáveis, tanto do processo como do material, que devem ser minuciosamente estudadas.

Tal estudo deve abranger o conhecimento do equipamento, do material a ser temperado, da estrutura da peça e principalmente: das melhores combinações das variáveis do processo a serem aplicadas. Combinações estas, discutidas e ilustradas neste trabalho.

Os problemas mais frequentes, com suas respectivas soluções, também são apresentados. Foi dada uma grande ênfase em dois problemas, sobrepastes e superaquecimento, que devido às suas complexidades são pouco mencionados nas literaturas. Estes problemas não podem ser totalmente solucionados, mas devem ser minimizados ao máximo, a fim de que satisfaça as necessidades que justifiquem a utilização do processo.

Mesmo assim, com todo conhecimento do processo, as ferramentas diferem muito uma das outras, não sendo possível estabelecer uma padronização de todas as variáveis do processo, conseqüentemente tornando imprescindível grande habilidade e experiência do operador.

Apresento como sugestão para próximos trabalhos o estudo das possibilidades de automação do processo via CNC.

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASM International, Metals Handbook vol. 4, Flame Hardening 268 - 284, Ohio 1991;
2. ASM International, Metals Handbook vol.4, Heat Treating of Ductile Iron 545 – 551, Ohio 1991;
3. OHTANI, H. Processing-Conventional Heat Treatings, Materials Science and Technology. vol. 7,147 –181, 1992;
4. SENAI, Coleção Tecnológica, Soldagem, São Paulo, 1997;
5. JEFFERSON, Ted B. The Welding Encyclopedia, Monticello Books, 17 ed., 1974.
6. Diagramas de Curvas TTT; Nickel Alloys.
7. Catálogo de Engenharia de Ferramentas e Matrizes da Schuler, “Tool and Die Engineering”.
8. Catálogo de Prensas SMG, “Hydraulic Prensas for the Automotive Industry”.
9. Catálogo de maçaricos de solda da White Martins.
10. CHIAVERINI, V. “Aços e Ferros Fundidos”, 4ed., ABM,1977.