

# RELATÓRIO FINAL

(Agosto/2004 – Julho/2005)

**TÍTULO:** ESTUDO DOS PARÂMETROS DE TÊMPERA E SUA INFLUÊNCIA  
NA MICROESTRUTURA E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM  
AÇOS-FERRAMENTA.

**PESQUISADOR:** LEANDRO CORRÊA DOS SANTOS

**ORIENTADORA:** Dr<sup>a</sup>. LAURALICE DE CAMPOS FRANCESCHINI CANALE

**INSTITUIÇÃO:** UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS,  
AERONÁUTICA E AUTOMOBILÍSTICA.

## 1) INTRODUÇÃO

Aços-ferramenta são uma importante classe dentro das ligas Fe-C, compreendendo uma ampla faixa de composições, desde aços temperáveis em água (série W), até aços altamente ligados como os aços rápidos. Molibdênio, Tungstênio, Cromo, Vanádio e Manganês são freqüentemente usados como elementos de liga em aços-ferramenta. Esses elementos aumentam a dureza e melhoram as propriedades mecânicas, além de diminuir a formação de trincas devido ao tratamento térmico de revenido. Entretanto, dá-se ênfase às propriedades de dureza à quente, tenacidade, resistência ao desgaste e estabilidade dimensional. Além disso, há ainda a necessidade de se obter resistência à oxidação devido à exposição prolongada às altas temperaturas.[1]

Têmpera é o tratamento térmico mais importante, porque é por intermédio dele, acompanhado pelo revenido, se obtêm estruturas e propriedades que permitem o emprego do aço em peças de maior responsabilidade e em aplicações mais críticas, como as que se encontram na indústria mecânica, automobilística, aeronáutica e outros segmentos industriais.

## 2) OBJETIVO E JUSTIFICATIVAS

Nesta presente pesquisa será estudado o aço-ferramenta para trabalho a quente AISI H13, o qual tem ganhado importância industrial considerável, uma vez que é usado em aplicações de trabalho a quente, tais como:

- Matrizes, insertos e punções de forjamento;
- Facas e navalhas para cisalhamento a quente;
- Moldes para indústria de plásticos e vidros;
- Devido à sua alta versatilidade, é utilizado principalmente no processamento a quente de ligas leves (alumínio, zinco) em processos de extrusão, fundição sob pressão e forjamento;

A característica notável da série H é sua tenacidade. Apesar de sua dureza a quente ser algo inferior aos aços de mais elevado teor de ligas, sua excepcional resistência ao choque torna-os preferíveis na maior parte das aplicações de trabalho a quente, especialmente quando se torna necessário refrigerar as matrizes durante o serviço, com água ou outros meios de resfriamento.

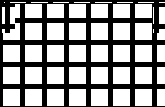
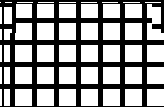

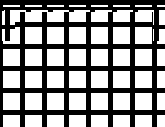
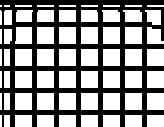
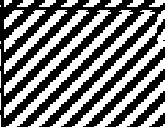
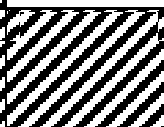
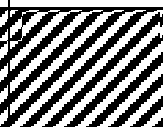
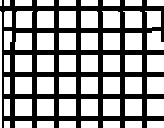
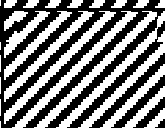
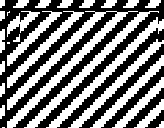
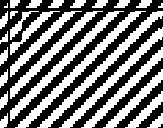
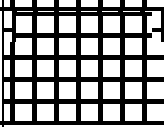
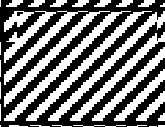
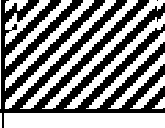
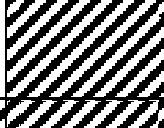
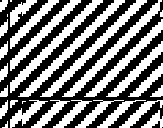
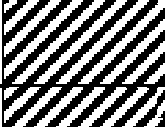




Em função principalmente da presença de elementos de liga em maior quantidade, as propriedades mecânicas dos aços ferramenta são extremamente dependentes dos parâmetros de tratamento térmico [6-7].

Neste trabalho será avaliado a influência da temperatura de austenitização e subzero na microestrutura, e nas propriedades de dureza, tração e impacto do aço H13.

### 3) ATIVIDADES

O cronograma de atividades é apresentado a seguir:

**CRONOGRAMA DE ATIVIDADES (modificado)**

	Agosto / Setembro	Outubro / Novembro	Dezembro / Janeiro	Fevereiro / Março	Abril / Maio	Junho / Julho
Tratamento Térmico das Amostras						
Preparação das amostras para análise microestrutural						
Análise microestrutural por meio de microscopia ótica						
Medição de dureza						
Ensaio mecânico de tração						
Ensaio mecânico de impacto Charpy						
Compilação dos Resultados						
Elaboração do relatório parcial						
Relatório Final						



**Atividades prejudicadas**

**Atividades concluídas**

## 4) RESUMO TEÓRICO

### 4.1) Têmpera [2]

Uma das características mais importantes dos aços como Materiais de Construção Mecânica é a possibilidade de desenvolver combinações ótimas de resistência e tenacidade. A estrutura que permite tais combinações é a estrutura martensítica revenida.

A têmpera consiste em resfriar o aço, após austenitização a uma velocidade suficientemente rápida para evitar as transformações perlíticas e bainíticas na peça em questão. Deste modo, obtém-se a estrutura metaestável martensítica.

Para controle da taxa de resfriamento de modo a temperar o aço utiliza-se diferentes meios de têmpera, com diferentes capacidades de extração de calor. Os meios de têmpera mais comuns são: água, óleo e ar.

A têmpera em meio líquido ocorre em três estágios:

- Formação de filme contínuo de vapor sobre a peça, o qual apresenta baixa condução de calor. Para reduzir a duração deste primeiro estágio dissolve-se pequena quantidade de sal na água.
- Formação de bolhas de vapor discretas sobre a peça. Para evitar-se a permanência de bolhas sobre os mesmos pontos por tempo longos, causando pontos resfriados mais lentamente (pontos moles), é importante a agitação da peça.
- Resfriamento por condução e convecção. A peça já atingiu superficialmente temperatura insuficiente para vaporizar o meio de têmpera. O ideal é que o terceiro estágio seja lento, pois já não há risco de ocorrerem as transformações ferrítica-perlítica ou bainítica e deste modo obtém-se menos tensões na têmpera.

Quando o aço é aquecido para austenitização, há nucleação e crescimento de grãos de austenita.

Quanto maior a temperatura em que este fenômeno ocorre e quanto mais tempo se mantém nesta temperatura, tanto maior será o diâmetro médio dos grãos austeníticos. Como a nucleação de ferrita e perlita ocorre principalmente em heterogeneidades, sendo os contornos de grão austeníticos as principais na maioria dos aços, o aumento do tamanho de grão dificulta a nucleação, aumentando, portanto, a temperabilidade. Entretanto, este mecanismo causa diminuição da resistência ao impacto das estruturas formadas.

Em princípio, todos os elementos de liga aumentam a temperabilidade, retardando a transformação ferrítica e perlítica.

#### 4.1.1) Tratamento Térmico de Sub-Zero

Consiste no tratamento térmico onde a peça é exposta a temperaturas por volta de  $-100^{\circ}\text{C}$ . Este tipo de tratamento é realizado visando estabilidade dimensional, e diminuição da quantidade de austenita retida.[9]

#### 4.2) Revenido [2]

A martensita como temperada é extremamente dura e frágil. Peças deixadas nesta condição de alto tensionamento interno correm grande risco de trincar, exceto quando têm teor de carbono extremamente baixo.

Para atingir-se valores adequados de resistência e tenacidade deve-se logo após a têmpera, proceder ao revenido. Este tratamento consiste em aquecer uniformemente até uma temperatura abaixo da crítica, mantendo o aço nesta temperatura por tempo suficiente para equalização de temperatura e obtenção das propriedades desejadas.

Sendo a martensita uma estrutura metaestável, o aquecimento facilita a busca do equilíbrio. Além disso, o revenido funciona como uma operação de alívio de tensões.

Revenido duplo – Aços-ferramenta são, em geral, revenidos duas vezes. O primeiro revenido deve se iniciar com a peça ainda morna ( $60^{\circ}\text{C}$ - $90^{\circ}\text{C}$ ). Durante este revenido, ocorre alívio de tensões, revenimento de martensita e precipitação de carbonetos, diminuindo o teor de carbono da austenita retida, (Em geral, aços com mais de 0,55%C temperados, apresentam austenita retida), a qual tempera durante o resfriamento do primeiro revenido, formando mais martensita. É necessário então um segundo revenido para esta martensita. Este tratamento de duplo revenido é muito eficiente na estabilização dimensional de ferramentas.

#### 4.3) Influência dos Elementos de Liga [2]

##### 4.3.1) Nos Carbonetos

A influência dos carbonetos nas propriedades mecânicas será função da forma com que se apresentam e também do tamanho médio das partículas.

Todos os carbonetos encontrados no aço são duros e quebradiços, de modo que suas composições específicas têm pouco efeito nas propriedades de tração.

A fase carboneto é pouco modificada por Ni, Si e Al. Outros elementos como Mn, Cr, Mo, W, V, Nb e Ti são formadores de carbonetos e tendem a se localizar no carboneto quando o carbono existe em quantidade suficiente para haver a combinação entre eles.

##### 4.3.2) Na Têmpera

Os elementos de liga podem influenciar nas propriedades dos aços temperados de 3 maneiras:

- Alterando as temperaturas de início e fim da transformação martensítica;

- Aumentando a dureza da martensita;
- Alterando a temperabilidade.

Observa-se que o efeito de endurecimento aparece quando a quantidade de carbono no aço é baixa e a têmpera é feita rapidamente. Também todos os elementos de liga dissolvidos na austenita (exceto cobalto) retardam a transformação perlítica, aumentando a temperabilidade.

#### **4.3.3) No Revenido**

Os elementos de liga, geralmente, aumentam ligeiramente a dureza dos aços com baixo e médio teor de carbono no revenimento. Estes elementos dissolvem-se preferencialmente no ferro, em vez de formarem carbonetos. Estes elementos dissolvem-se preferencialmente no ferro, em vez de formarem carbonetos. Para elementos de liga formadores de carbonetos, há o “endurecimento secundário” a partir de certa quantidade de elemento (4% para Cr, 2% para Mo, 6% V, etc.). Também a temperatura de austenitização do aço antes da têmpera influi na dureza do revenimento, pois quanto maior a temperatura, maior é a dissolução dos carbonetos na austenita e conseqüentemente na martensita, o que provoca um aumento da dureza.

Elemento	Solubilidade sólida		Influência sobre a Austenita	Influência exercida através dos carbonetos		Principais funções
	No ferro $\gamma$	No ferro $\alpha$		Tendência formadora de carbonetos	Ação durante o revenido	
<b>Si</b>	2% $\pm$ (9% com 0,35% C)	18,5% (não muito alterada pelo C)	Aumenta a endurecibilidade moderadamente	Negativa (grafitiza)	Sustenta a dureza por solução sólida	1 – Desoxidante 2 - Elemento de liga para chapas elétricas e magnéticas 3 - Aumenta a endurecibilidade de aços contendo elementos não grafitizantes 4 - Aumenta a resistência de aços de baixo teor em liga 5 – Aumenta a resistência à oxidação
<b>Mn</b>	Sem limites	3%	Aumenta a endurecibilidade moderadamente	Maior que o Fe Menor que o Cr	Muito pequena nos teores normais	1 – Contrabalança a fragilidade a quente pelo endurecimento ao S 2 – Aumenta a endurecibilidade economicamente
<b>Cr</b>	12,8% $\pm$ (20% com 0,5% C)	Sem limites	Aumenta a endurecibilidade moderadamente	Maior que o Mn Menor que o W	Moderada Resiste à diminuição de dureza	1 – Aumenta a resistência à corrosão e à oxidação 2 – Aumenta a endurecibilidade 3 – Melhora a resistência a altas temperaturas 4 – Resiste ao desgaste (com alo C)
<b>Mo</b>	3% $\pm$ (8% com 0,3% C)	37,5%	Aumenta a endurecibilidade fortemente (Mo > Cr)	Forte: maior que o Cr	Opõe-se à diminuição de dureza criando a dureza secundária	1 – Eleva a temperatura de crescimento de grão de austenita 2 – Produz maior profundidade de endurecimento 3 – Contrabalança a tendência à fragilidade de revenido 4 – Eleva a dureza a quente, a resistência a quente e a fluência 5 – Melhora a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis 6 – Forma partículas resistentes à abrasão
<b>V</b>	1% $\pm$ (4% com 0,20% C)	Sem limites	Aumenta muito fortemente a endurecibilidade no estado dissolvido	Muito forte (V < Ti ou Cb)	Máxima para endurecimento secundário	1 – Eleva a temperatura de crescimento de grão de austenita (promove refino do grão) 2 – Aumenta a endurecibilidade (quando dissolvido) 3 – Resiste ao revenido e causa acentuado endurecimento secundário

**Tabela 1 - Efeitos específicos dos elementos de liga do aço-ferramenta H13. [3]**

#### **4.4) Aços para Trabalho a Quente [2], [5]**

Em diversos casos podem-se utilizar aços de baixa liga para matrizes de forjamento a quente. Entretanto, geralmente, emprega-se para trabalho a quente, aços de média ou alta liga, na maior parte das vezes com teores de carbono baixos (0,25 – 0,60%).

São propriedades necessárias a aços para trabalho a quente:

- Resistência à deformação na temperatura de uso;
- Resistência ao impacto;

- Resistência à “Lavagem” (Erosão);
- Resistência à deformação no T. Térmico;
- Usinabilidade;
- Resistência a trincas a quente (Heat Cracking)

Para o tratamento térmico de têmpera recomenda-se aquecimento em forno de atmosfera controlada ou em banho de sal (com preaquecimento) ou em meio de empacotamento neutro. Além disso, recomenda-se revenidos múltiplos (no mínimo duplo) para obtenção do máximo em resistência ao impacto.

#### **4.5) Ensaio Mecânico de Dureza**

Para o engenheiro mecânico, dureza é definida como a resistência à penetração de um material duro no outro. Entretanto, existem outras definições além desta apresentada devido à existência de vários tipos de medida para esta propriedade mecânica.

O ensaio de dureza corretamente escolhido e interpretado é uma ferramenta excelente e barata para o controle indireto das propriedades mecânicas, a baixíssimo custo, comparado com as opções existentes. [2]

O tipo de ensaio feito nesta presente pesquisa foi a microdureza por penetração. Muitas das aplicações da dureza Vickers estão voltadas para o ensaio de microdureza.

É produzida uma pequena impressão microscópica no material, empregando uma carga menor que 1 kgf, com penetrador de diamante. A carga pode chegar a até 10 gf e a superfície do corpo de prova também deve ser plana. Sua preparação deve ser feita metalograficamente, em vista da pequena carga a ser aplicada. Polimento eletrolítico deve ser usado preferencialmente para evitar encruamento do metal na superfície, que afetaria o resultado. [5]

O mostrador do equipamento utilizado apresenta as medidas tanto em HV como em HRc.

#### **4.7) Ensaio Mecânico de Impacto Charpy**

O ensaio de impacto é um dos primeiros e até hoje um dos ensaios mais empregados para o estudo de fratura frágil nos metais. Trata-se de um ensaio dinâmico que mede a tendência de um metal de se comportar de uma maneira frágil. O corpo de prova é padronizado e provido de um entalhe para localizar sua ruptura e produzir um estado triaxial de tensões, quando ele é submetido a uma flexão, produzida por um martelo pendular. A energia que o corpo absorve, para se deformar e romper, é medida e lida na própria máquina. Pela medida da área da secção entalhada do corpo de prova, pode-se então obter a energia absorvida por unidade de área, que também é útil. Quanto menor for a energia absorvida, mais frágil será o comportamento do material àquela solicitação dinâmica. [5]



#### 4.6) Ensaio Mecânico de Tração

A aplicação de uma força num corpo sólido promove uma deformação do material na direção do esforço e o ensaio de tração consiste em submeter um material a um esforço que tende a esticá-lo ou alongá-lo. O corpo de prova é fixado numa máquina de ensaio que aplica esforços crescentes na sua direção axial, sendo medidas as deformações correspondentes. Os esforços ou cargas são medidos na própria máquina de ensaio e o corpo de prova é levado até sua ruptura.

Com esse tipo de ensaio, pode-se afirmar que praticamente as deformações promovidas no material são uniformemente distribuídas em todo o seu corpo. A uniformidade da deformação permite ainda obter medições precisas da variação dessa deformação em função da tensão aplicada. Essa uniformidade termina no momento em que é atingida a carga máxima suportada pelo material, quando começa a aparecer o fenômeno da estricção ou diminuição da secção do corpo de prova, nos caso de metais com certa ductilidade. A ruptura se dá na região estrita do material. [5]

### 5) MATERIAIS E MÉTODOS

O aço utilizado foi cedido pela BÖHLER AÇOS ESPECIAIS, e tem composição química especificada na tabela abaixo em % em peso.

Esse aço é correspondente ao BÖHLER W302 e DIN 1.2344 e é fornecido no estado recozido com dureza de 229HB.

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,32	0,92	0,50	5,18	1.40	0.86

**Tabela 2 - Resultados da análise química do aço H13 fornecido, em % em peso.**

De uma única barra desse material foram confeccionados corpos de prova para ensaio de tração e impacto, com as dimensões especificadas por norma [10]. Os corpos de prova foram divididos em quatro (4) lotes de amostras denominadas de 1, 2, 3 e 4 e, então, submetidos ao tratamento térmico.

#### 5.1) Tratamento térmico

A microestrutura e, como consequência, as propriedades mecânicas, são bastante variáveis com os parâmetros de tratamento térmico. Assim, foram utilizadas 3 diferentes temperaturas de austenitização: 960°C, 1030°C e 1100°C.

Para o tratamento térmico foram utilizados basicamente 2 processos: 1) aquecimento e resfriamento em banho de sal; e 2) aquecimento e resfriamento em forno a vácuo. A etapa de revenimento utilizou os mesmos equipamentos para todas as amostras – forno de aquecimento por resistência elétrica e de atmosfera protetora com nitrogênio – e os mesmos parâmetros de processo (tempo e temperatura).

Principais parâmetros do tratamento térmico:

## 1 - Austenitização

- **960°C - Identificação “tipo 1”**

Resfriamento em banho de sal fundido, 540°C, 10 minutos e, em seguida, resfriamento ao ar até a temperatura ambiente.

Primeiro revenimento em banho de sal fundido, 540°C, com o tempo de 02 horas. Em seguida, resfriamento ao ar.

- **1030°C - Identificação “tipo 2”**

Resfriamento em banho de sal fundido, 540°C, 10 minutos e, em seguida, resfriamento ao ar até a temperatura ambiente.

Primeiro revenimento em banho de sal fundido, 540°C, com o tempo de 02 horas. Em seguida, resfriamento ao ar.

- **1030°C - Identificação “tipo 3”**

Resfriamento em banho de sal fundido, 540°C, 10 minutos e, em seguida, resfriamento ao ar até a temperatura ambiente.

Atingida a temperatura ambiente, as amostras continuaram sendo resfriadas até temperatura negativa de, aproximadamente, 100°C, permanecendo nesta temperatura em torno de 15 minutos (tratamento térmico de subzero).

Essas amostras não foram submetidas ao Primeiro Revenimento.

- **1100°C - Identificação “tipo 4”**

Forno a Vácuo por 45 minutos.

Resfriamento com nitrogênio, pressão 2 Bar.

Primeiro revenimento, 540°C, com o tempo de 02 horas. Em seguida, resfriamento ao ar.

## 2 – Segundo Revenimento

Todas as amostras foram submetidas ao segundo revenimento à temperatura de 600°C, por tempo de 2 horas.

A Tabela abaixo resume todos os principais parâmetros de tratamento térmico utilizados para as amostras.

	1	2	3	4
<b>Equipamento</b>	Banho de Sal	Banho de Sal	Banho de Sal	Vácuo
<b>Austenitização e Tempo</b>	960° C	1030° C	1030° C	1100° C
	10´	10´	10´	45´
<b>Resfriamento</b>	Sal – 540° C – Ar	Sal – 540° C – Ar	Sal – 540° C – Ar	N2 – 2 Bar
<b>Revenimento 1</b>	540°C – 2h	540°C – 2h	540°C – 2h	540°C – 2h
<b>Sub-Zero</b>	Não	Não	15´ - +-90°C	Não
<b>Revenimento 2</b>	600°C – 2h	600°C – 2h	600°C – 2h	600°C – 2h

Tabela 3 - Parâmetros de tratamento térmico

## 5.2) Microestruturas e Durezas

As superfícies das amostras foram preparadas segundo técnicas convencionais de preparação metalográfica para o exame da microestrutura por microscopia óptica.

O método utilizado para o ataque químico das amostras será descrito a seguir:

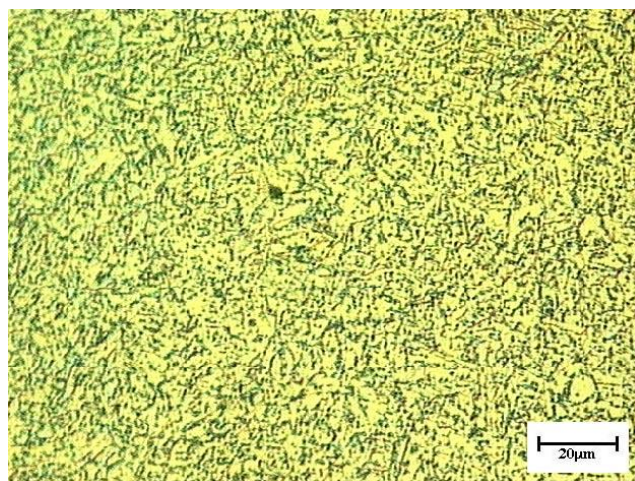
1. Para a observação da martensita revenida obtida, atacou-se as amostras com Nital 2%.
2. Para a observação dos carbonetos, em contrapartida ao relatório parcial, atacou-se as amostras utilizando-se um ataque químico eletrolítico de uma solução de Ácido Oxálico 10% e corrente elétrica constante de 0,5 [A]. O tempo necessário à revelação da microestrutura para as amostras dos tipos 1, 2 e 3 foi de 90 [s] e para a amostra do tipo 4, 120 [s].
3. Pretendia-se, também, a observação dos tamanhos de grão austenítico pré-têmpera. Muitos tipos ataque tem sido desenvolvidos para este propósito, porém este método é feito com muita dificuldade. Um dos ataques químicos que encontra maior sucesso é composto por uma solução de Ácido Pícrico e outros reagentes. Os resultados obtidos são razoáveis, mas nem sempre a qualidade do ataque é adequada para análise de imagem e é, geralmente, acompanhada de corrosão por pites [11]. Além disso, a severidade do ataque é proporcional à temperatura em que é realizado. Os resultados obtidos não foram satisfatórios para a observação e determinação do tamanho do grão para todas as amostras.

A dureza em HRc foi obtida através do ensaio de microdureza utilizando o microdurômetro da BUEHLER. Este equipamento fornece os resultados em termos de dureza Vickers convertendo automaticamente para Rockwell C.

## 6) RESULTADOS e DISCUSSÃO

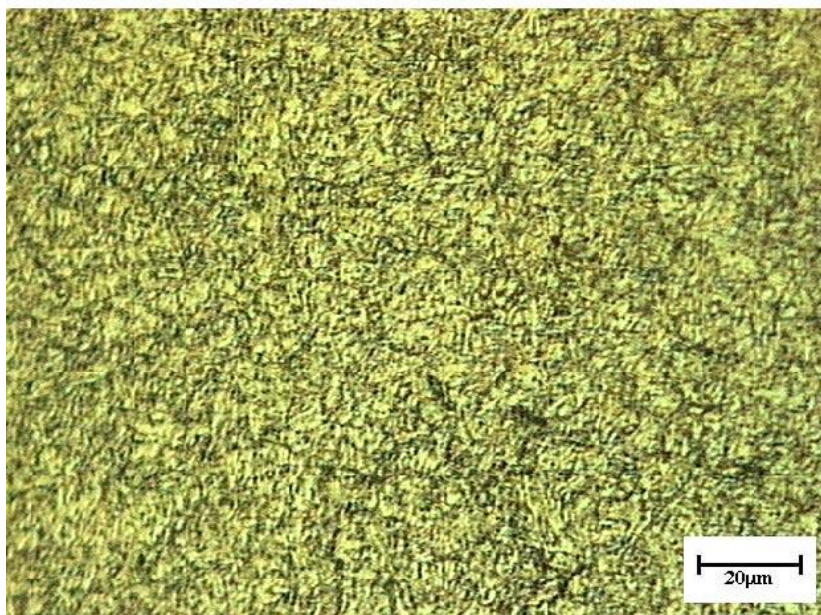
Em todas as amostras observou-se a presença da martensita revenida como era esperado.

A figura 1 ilustra a microestrutura do aço AISI H13 no estado recozido, anterior aos tratamentos térmicos.



**Figura 1 – Microestrutura do aço AISI H13 mostrando microestrutura esferoidizada. Ataque Nital 2%. 500x**

As figuras de 2 a 4 mostram as microestruturas obtidas após os tratamentos térmicos, evidenciando, em todos os casos, microestrutura composta de martensita revenida.



**Figura 2 – Amostra “tipo 1” do aço AISI H13. Ataque Nital 2%. 500x.**



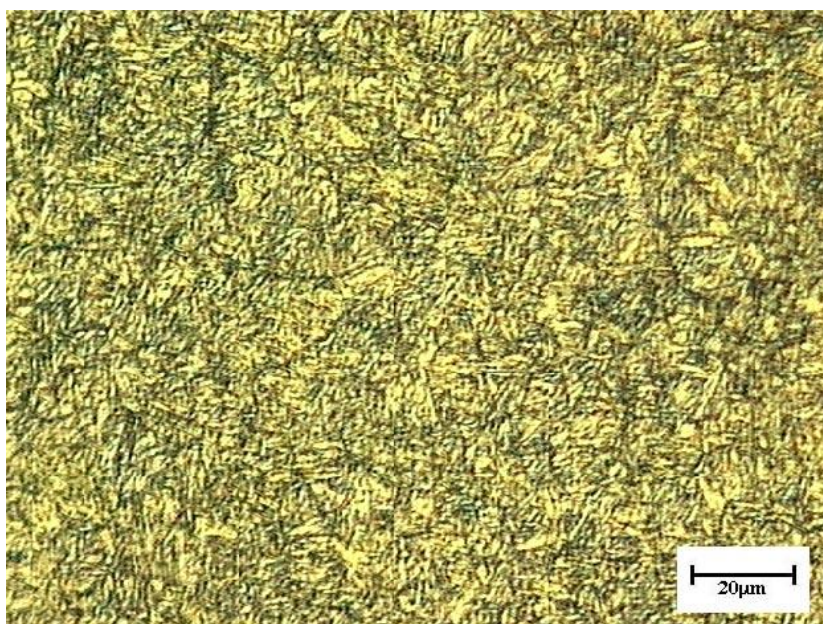


Figura 3 – Amostra “tipo 2” do aço AISI H13. Ataque Nital 2%. 500x.

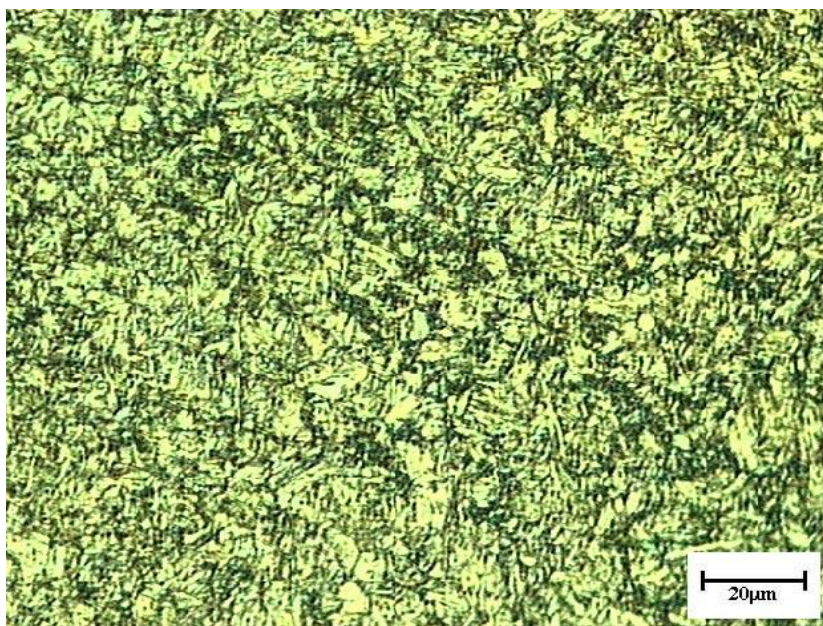
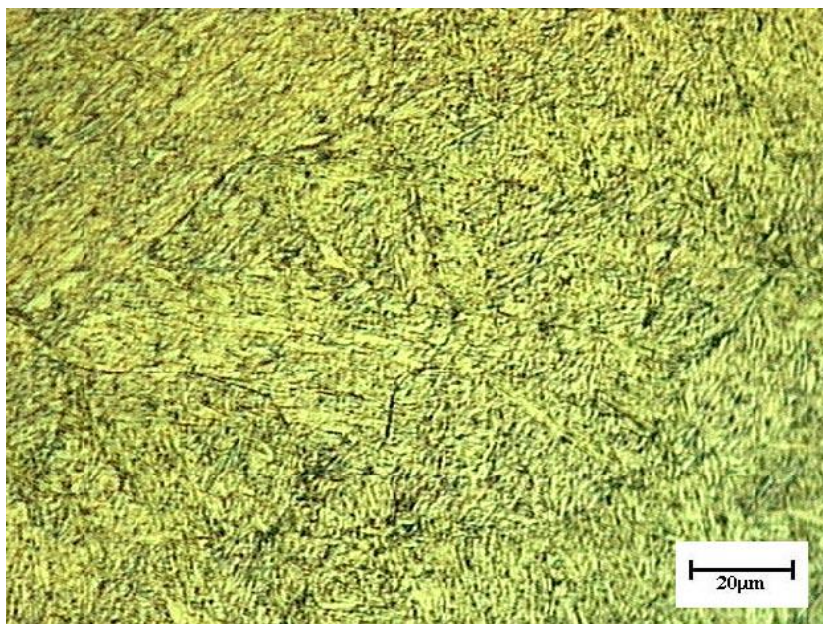


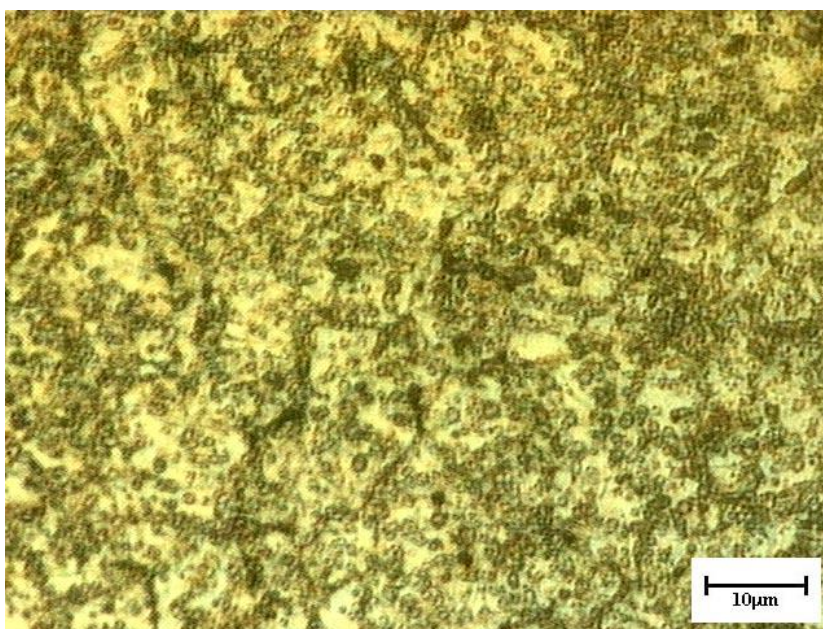
Figura 4 – Amostra “tipo 3” do aço AISI H13. Ataque Nital 2%. 500x.





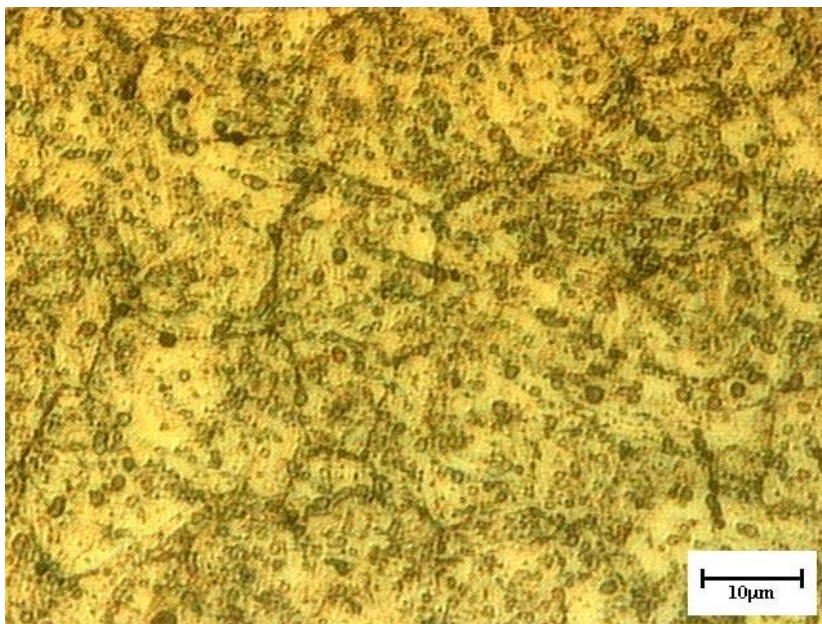
**Figura 5 – Amostra “tipo 4” do aço AISI H13. Ataque Nital 2% . 500x**

As figuras de 6 a 9 mostram os carbonetos esfeiroidizados revelados pelo ataque eletrolítico em solução 10% de Ácido Oxálico.

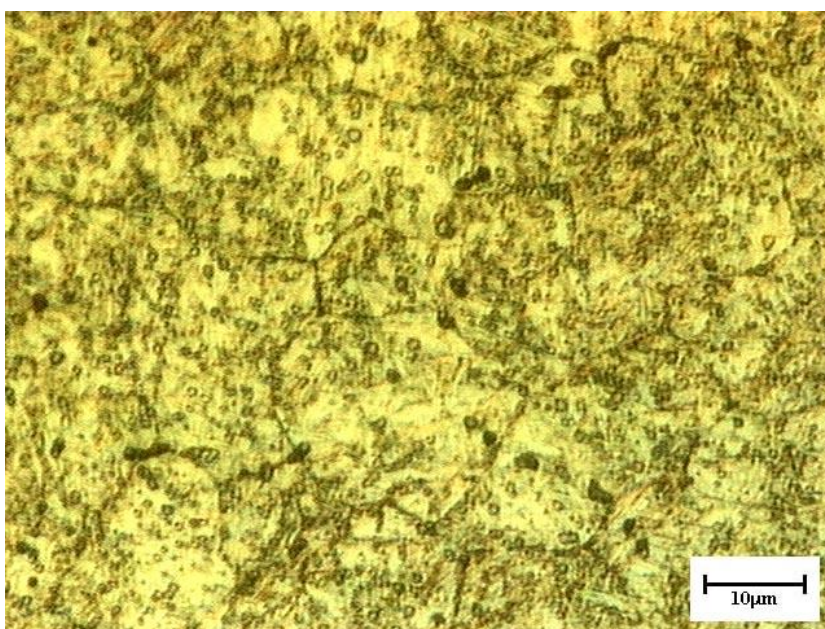


**Figura 6 – Amostra “tipo 1” do aço AISI H13.  
Ataque ác. oxálico 10%. I=0,5[A]. t=90[s].1000x.**

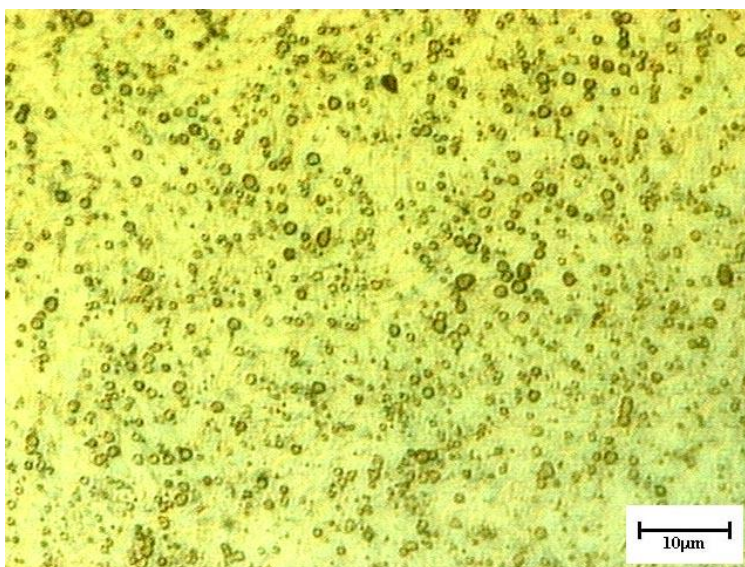




**Figura 7 – Amostra “tipo 2” do aço AISI H13.**  
**Ataque ác. oxálico 10%. I=0,5[A]. t=90[s].1000x.**



**Figura 8 – Amostra “tipo 3” do aço AISI H13.**  
**Ataque ác. oxálico 10%. I=0,5[A]. t=90[s].1000x.**



**Figura 9 – Amostra “tipo 4” do aço AISI H13.**  
**Ataque ác. oxálico 10%. I=0,5[A]. t=120[s].1000x.**

A formação de carbonetos se dá preferencialmente nos contornos de grão austeníticos. Pequenas quantidades de carbonetos não afetam, significativamente, a dureza do material, mas pode diminuir a resistência à fratura dos aços-ferramenta. Se as solicitações de serviço forem altas o suficiente, falência por quebra intergranular pode ocorrer, especialmente em aços de tamanhos de grão austeníticos grosseiros.

Das microestruturas mostradas o que se pode observar foi uma diminuição da quantidade de carbonetos com o aumento da temperatura de austenitização e, embora a definição de contornos não tenha sido suficientemente clara, ao se comparar a fotomicrografia 6, com a 9, pode-se observar uma tendência de aumento do grão, o que traria prejuízos também na resposta aos testes de impacto.

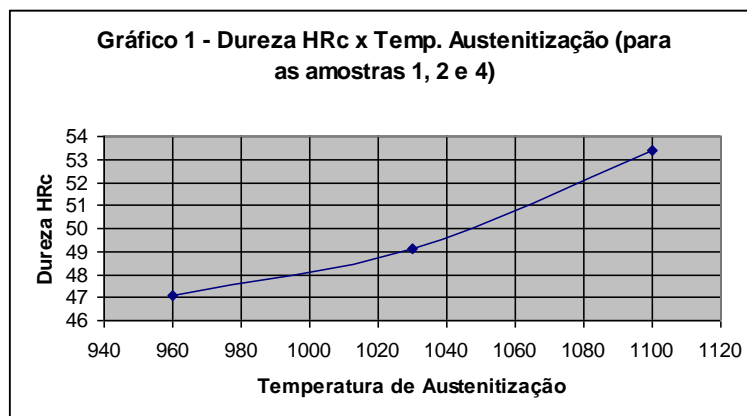
A tabela 4, a seguir, apresenta os valores de dureza das amostras estudadas. O aumento da temperatura de austenitização trouxe um aumento do valor da dureza após tratamento térmico. O que pode ser explicado pela maior dissolução de carbono proveniente dos carbonetos, tornando a martensita que compõe a matriz, mais dura e também aumentando a precipitação secundária durante o revenido.

Embora se esperasse um aumento de dureza nas condições “com subzero” (comparação entre as amostras dos tipos 2 e 3), isso não foi verificado. Possivelmente o duplo revenido trouxe também a transformação de boa parcela da austenita retida, sendo por isso o subzero não necessário nas condições em que o processo de tratamento térmico foi efetuado.



Amostra	Dureza HRC
“tipo 1” – 960°C	47
“tipo 2” – 1030°C	49
“tipo 3” – 1030°C, Sub-Zero	50
“tipo 4” – 1100°C	53

Tabela 4- Dureza HRC



Os resultados do ensaio de impacto são mostrados na tabela 5.

Amostra	Energia (J)*
“tipo 1” – 960°C	6,1
“tipo 2” – 1030°C	9,0
“tipo 3” – 1030°C, Sub-Zero	9,7
“tipo 4” – 1100°C	4,9

Tabela 5 – Resultados do ensaio de impacto. (\*) Valor médio de 5 medidas

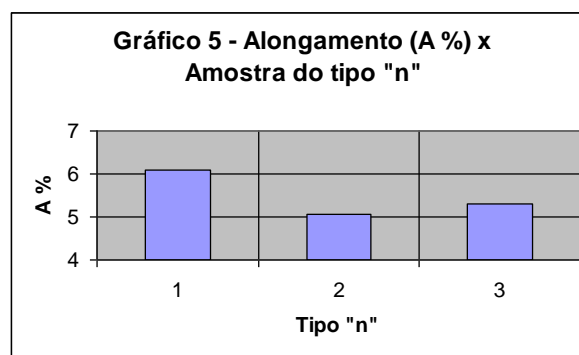
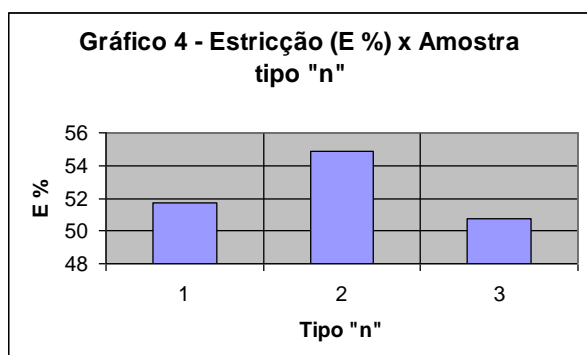
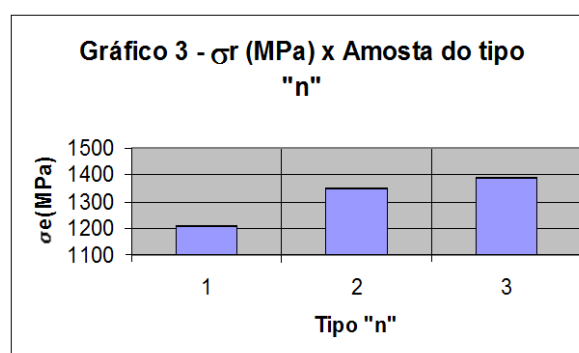
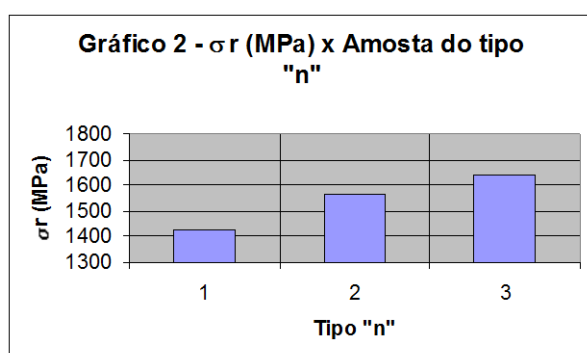
O tratamento subzero não traz modificação no desempenho em impacto uma vez que as amostras tipo 2 e tipo 3 apresentam valores de energia absorvida bastante próximos. O aumento da temperatura de austenitização aumentou a energia absorvida, melhorando as propriedades de impacto, possivelmente pela dissolução de carbonetos, que podem interferir negativamente nessa propriedade. No entanto, para a temperatura de 1100°C, a energia cai ao valor mais baixo do que até então observado. Isso é característico do aumento excessivo do grão, que interfere drasticamente no comportamento de impacto.

A tabela 6 apresenta os resultados do ensaio de tração. Não foi realizado o ensaio das amostras do aço H13 do tipo 4, pois os corpos de prova desta encontravam-se fora das especificações padronizadas. Devido a este fato, não havia como adaptar os corpos de prova na máquina de ensaio de tração, inviabilizando o ensaio.

C.P. Tipo	$\sigma_r$ (MPa)*	$\sigma_e$ (Mpa)*	Estricção (E %)*	Alongamento (A %)*
1	1429,2	1206,8	51	6
2	1565,4	1348,9	51	5
3	1641,5	1391,4	50	5

Tabela 6 – Resultados do ensaio de tração. (\*) Valor médio de 5 medidas.

Para as amostras 1 e 2 vemos que todos os resultados obtidos são proporcionais à temperatura de austenitização à que foram submetidos, a não ser com relação ao alongamento, conforme se pode ver nos gráficos de 2 a 5, o que se poderia realmente esperar, uma vez que o aumento dos valores de tensão de escoamento e tensão máxima provocam a diminuição das propriedades de deformação.



Os resultados mostram que embora alguma variação tenha sido obtida nos ensaios, essa não foi uma propriedade muito afetada pela variação dos parâmetros estudados.

## 7) CONCLUSÃO

A variação da temperatura de austenitização provoca modificações na microestrutura do aço estudado, o que reflete em variações de dureza e propriedades de impacto do aço AISI H13.

À medida que a temperatura de austenitização aumenta há maior dissolução de carbono e elementos de liga que estarão disponibilizados para o endurecimento secundário durante o

revenimento. Nessa etapa o que ocorre é uma fina dispersão de minúsculos carbonetos secundários, trazendo um aumento da dureza sem detrimento das propriedades de impacto. Entretanto, o tamanho de grão é fundamental quanto a esse aspecto, deteriorando as propriedades de impacto quanto o tamanho de grão é excessivo.

Em relação às propriedades de tração do aço AISI H13, o aumento da temperatura de austenitização melhora as características de escoamento e ruptura. O tratamento de subzero diminui a estricção do material e o aumento do alongamento não chega a ser muito significativo no que se refere a essas propriedades.

## 8) BIBLIOGRAFIA

- [1] Averbach, B. L., *Tool Steels*, Massachusetts Institute of Technology;
- [2] Silva, André Luís da Costa, *Tecnologia dos aços*, Eletrometal, Universidade de Estadual de Campinas, 1981;
- [3] Chiaverini, V., *Aços e Ferros Fundidos*, 4ª ed., ABM, 1977;
- [4] Colpaert, H., *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*, 3ªEd., Edgard Blücher LTDA., São Paulo, 1974;
- [5] Souza, Sérgio Augusto de, *Ensaio mecânicos de materiais metálicos. Fundamentos teóricos e práticos*, Edgard Blücher, São Paulo, 1982;
- [6] Bahrami, A. et al. Effects of conventional heat treatment on wear resistance of AISI H13 tool steel. *Wear* xxx (2004). Article in press;
- [7] Dobrzanski, L. A. et al. Fabrication methods and heat treatment conditions effect on tribological properties of high speed steels. *Journal of Materials Processing Technology* 157-158: 324-330, 2004;
- [8] G.Roberts, G.Krauss and R. Kennedy. *Tool Steels*. ASM International, 5 edição, EUA, 1998;
- [9] Heat Treating Progress, Volume 2 – nº 9, ASM International, Materials Park, Ohio, p.41, 2003;
- [10] Metal – Mechanical Testing; Elevated and Low Temperature Tests; Metallography, Volume 03.01, Norma ASTM, E23-9, E8M –90a, 1991;
- [11] Grain Structure Types, <http://www.metallography.com/types.htm> .