

**UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO - UNINOVE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

RENATO LOGIUDICE

**RECOMENDAÇÕES PARA O CONTROLE DA QUALIDADE DO PROCESSO DE
TÊMPERA DE FERRAMENTAS DE GRANDES DIMENSÕES**

**SÃO PAULO
2014**

RENATO LOGIUDICE

**RECOMENDAÇÕES PARA O CONTROLE DA QUALIDADE DO PROCESSO DE
TÊMPERA DE FERRAMENTAS DE GRANDES DIMENSÕES**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção da Universidade Nove de Julho, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia da Produção.
Prof. Dr. André Felipe H. Librantz . Orientador
Prof. Dr. Rafael Agnelli Mesquita .Co Orientador

**SÃO PAULO
2014**

Logiudice, Renato.

Recomendações para o controle da qualidade do processo de têmpera de ferramentas de grandes dimensões. /Renato Logiudice. 2014.

88 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2014.

Orientador (a): Prof. Dr. André Felipe Henriques Librantz.

1. Aços ferramenta para trabalho a quente. 2. Tratamento térmico. 3. Direito do consumidor. 4. Controle da qualidade. 5. Dureza.

I. Librantz, André Felipe Henriques.

II. Título

CDU 658.5

São Paulo, 29 de agosto de 2014.

TERMO DE APROVAÇÃO

Aluno: Renato Logiudice

Título da Dissertação: RECOMENDAÇÕES PARA O CONTROLE DA QUALIDADE DO PROCESSO DE TÊMPERA DE FERRAMENTAS DE GRANDES DIMENSÕES.

Presidente: PROF. DR. ANDRÉ FELIPE HENRIQUES LIBRANTZ



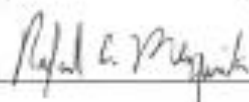
Membro: PROFA. DRA. PAULA FERNANDA DA SILVA FARINA



Membro: PROF. DR. SIDNEI ALVES DE ARAÚJO



Membro: PROF. DR. RAFAEL AGNELLI MESQUITA



AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela experiência dignificante vivenciada na elaboração deste trabalho e por ter colocado em meu caminho as pessoas certas que contribuíram para a superação das dificuldades.

À minha filha, Fernanda, pelo apoio e compreensão nos momentos em que me dediquei ao trabalho.

Ao meu orientador, Engenheiro Professor Doutor André Librantz, e o co-orientador, Engenheiro Professor Doutor Rafael Agnelli Mesquita, pela dedicação, trabalho e atenção dispensados para a realização deste projeto de forma incondicional.

À UNINOVE – Universidade Nove de Julho –, pela oportunidade de cursar o mestrado. À equipe do Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia da UNINOVE representada pelos técnicos Sr. Alex Martins Mendes da Costa e Sr. Rodrigo Levi Caetano Ferreira, responsáveis pelo preparo dos corpos de provas e à Professora Márcia Regina Viera de Araújo, pela colaboração e por disponibilizar 460 horas do Laboratório de Materiais.

Ao aluno João Henrique Storópoli e Dr. Reinhold.Schneider pela contribuição nos experimentos realizados na University of Applied Sciences Upper Austria.

Ao Engenheiro Vitor Anibal do Sacramento Mendes do LCE-Laboratório de Caracterização Estrutural Universidade Federal de São Carlos pelos relatórios da microestrutura dos corpos de provas pelo MEV – microscópio eletrônico de varredura.

À empresa Villares Metals na disponibilização dos aços necessários para a realização dos experimentos e a liberação das instalações fabris e de laboratórios para execução dos ensaios de impactos e tratamento térmico industrial.

Aos professores do curso de mestrado que contribuíram, direta ou indiretamente, para o desenvolvimento deste trabalho, pelas excelentes aulas e boas orientações.

Aos meus colegas do curso, que me incentivaram a estudar e auxiliaram em meu aprendizado.

À colega de curso Priscilla Aparecida Vieira Moraes e o professor Edson Garcia Gomes, que contribuíram para a realização deste trabalho na fase de preparação e tratamentos térmicos.

RESUMO

Nas indústrias manufatureiras, em geral, é ampla a utilização de ferramentas como moldes e matrizes na fabricação dos seus produtos. Essas ferramentas confeccionadas com aços ferramenta são ativas com autovalor agregado e que tem uma parcela abrangente nos aspectos da produtividade e competitividade das organizações. Esse trabalho tem por objetivo estudar a importância do controle da qualidade dos processos de tratamentos térmicos utilizados na confecção dessas ferramentas. O estudo foi experimental e ateu-se aos aços ferramenta para trabalho a quente: O VH13[®] e os de novas ligas desenvolvidas nos últimos dez anos, VHSUPER[®] e TENAX 300[®]. Características como dureza e tenacidades são enfatizadas nesse trabalho como influentes no desempenho das ferramentas. Sendo a dureza do aço o parâmetro usual de controle, constatou-se que isso não é suficiente para a garantia do desempenho da ferramenta. Sendo necessário também o estudo da tenacidade. O estudo foi desenvolvido em duas etapas: Na primeira, realizada em laboratório, amostras dos aços foram submetidas aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento em condições controladas de tempos e temperaturas. Na segunda etapa construiu-se adequadamente uma ferramenta de grandes dimensões que foi tratada em condição industrial. Medições de dureza e teste de impacto foram realizadas em amostras retiradas da superfície e do núcleo da ferramenta e também das tratadas em laboratório. Os resultados constataram a existência de baixa taxa de resfriamento da ferramenta submetida ao tratamento térmico pelo processo industrial. Isso ocasionou uma acentuada diminuição da tenacidade da ferramenta devido à formação de bainita e precipitação de carbonetos em contornos de grãos, este último em maior proporção. Já a dureza foi pouco afetada. Sendo o valor da tenacidade do aço uma característica importante na prevenção de trincas ou mesmo da quebra catastrófica da ferramenta, o controle dos processos de tratamentos térmicos das ferramentas é de fundamental importância para a qualidade das mesmas e que o atendimento apenas do valor da característica da dureza, como usualmente é feito pelos prestadores de serviços, não é suficiente para garantir a qualidade do tratamento térmico das ferramentas.

Palavras-chave: Aços ferramenta para trabalho a quente; tratamento térmico; controle da qualidade; dureza; tenacidade.

ABSTRACT

In manufacturing industries, in general, is the wide use of tools such as die and mold manufacturing of their products. These tools made from tool steels are assets with aggregate self worth and has a broad parcel on aspects of productivity and competitiveness of organizations. This work aims to study the importance of quality control procedures for the heat treatment used in the making of these tools. The study was experimental and adhered-to tool steels for hot work: The VH13® and new alloys developed in the last ten years, and VHSUPER® TENAX 300®. Characteristics such as hardness and tenacity are emphasized in this work as influential on the performance of the tools. As the hardness of steel usual control parameter, it was found that it is not enough to guarantee the performance of the tool. It is also necessary to study the toughness. The study was conducted in two stages: In the first, conducted in the laboratory, samples of steels were subjected to heat treatments of hardening and tempering under controlled time and temperature conditions. In the second step we constructed a suitably large tool which has been treated in an industrial condition. Measurements of hardness and impact tests were carried on samples drawn from the surface and core of the tool and also treated in the laboratory. The results verified the existence of low cooling rate of the tool subjected to heat treatment by processing. This led to a significant decrease in the toughness of the tool due to the formation of bainite and carbide precipitation at grain boundaries, the latter in greater proportion. Already hardness was little affected. As the value of the toughness of steel an important feature in preventing cracks or even catastrophic tool breakage, controlled processes of heat treatment of tools is of fundamental importance to their quality and that service only the value of the characteristic of hardness, as is usually done by the service providers, it is not enough to ensure the quality of heat treatment of tools.

Keywords: Tool steels; hot working; heat treatment; quality control; hardness; toughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Efeito da tenacidade, medida pela energia de impacto nas abscissas, e a redução do dano por fadiga térmica nas ordenadas	25
Figura 2 – Diagrama de resfriamento contínuo TRC para aços de alta liga.....	27
Figura 3 - Estudo de tenacidade em impacto e análise de fratura.....	28
Figura 4 - Curva de impacto em função da dureza para regiões da superfície e do núcleo da ferramenta.....	30
Figura 5 - Micrografias ópticas e análise de fratura para os extremos da taxa de resfriamento.....	30
Figura 6 - Comparativo entre a curva TRC do aço VHSUPER e H13.....	32
Figura 7 - Fluxograma sintético do desenvolvimento do trabalho.....	38
Figura 8 - Curva de calibração do forno Grion.....	40
Figura 9 - Curva de calibração do forno Metal Trend.....	40
Figura 10 – Corpos de provas para tratamento térmico em laboratório.....	41
Figura 11 – Corpos de provas para ensaio de impacto.....	41
Figura 12 – Modelo para simular uma ferramenta industrial.....	44
Figura 13 – Ferramenta tratada em forno industrial.....	44
Figura 14 – Posicionamento dos termopares na ferramenta industrial.....	45
Figura 15- Curva de resfriamento obtida para as duas regiões (superfície e núcleo) da ferramenta industrial.....	45
Figura 16 – Equipamento Flov para corte com jato d’água.....	46
Figura 17 – Dispositivo para permitir cortar amostra pequena com jato d’água	47
Figura 18 – Geometria do penetrador de diamante e as respectivas escalas Rockwell.....	48
Figura 19 – Corpo de prova ensaio Charpy – entalhe em V.....	53
Figura 20 – Esquema do equipamento para ensaio de impacto de um corpo de prova Charpy.....	53

Figura 21 - Gráfico da temperatura do revenimento em função da dureza alcançada pelas amostras dos aços, tratamento em laboratório.....	55
Figura 22 – Resultados das medições de dureza das amostras de aços retiradas da ferramenta industrial após a realização do 1º revenimento.....	59
Figura 23 – Resultados de dureza das amostras retiradas da ferramenta industrial – e tratadas num 2º Revenimento nas temperaturas de 550°C, 600°C e 625°C.....	60
Figura 24 – Dureza em função da temperatura de revenido para as amostras obtidas em laboratório (LAB) e em blocos industriais (SUP e NUCLEO). As indicações seguem a posição dos termopares, colocados na superfície e núcleo das amostras industriais	61
Figura 25 – Curva TRC sobreposta dos aços VH13, TENAX 300 e VHSUPER	65
Figura 26 – Mostrando a presença de carbonetos nos contornos de grãos na imagem à direita.....	67
Figura 27– Imagens obtidas MEV- microscópio eletrônico de varredura do corpo de prova do aço VH13Separação dos efeitos de fragilização.....	69
Figura 28 - Imagens obtidas MEV- microscópio eletrônico de varredura do corpo de prova do aço VHSUPER.....	69
Figura 29- Separação dos efeitos de fragilização.....	70
Figura 30 – Origem das distorções e esquema de têmpera controlada para evitar distorções.....	72
Figura 31 – Exemplo de ferramenta na qual foi colocado o cupom	74
Figura 32 – Considerações de melhorias no projeto da ferramenta.....	75
Figura a – Estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC).....	84
Figura b – Estrutura cristalina cúbica de fase centrada (CFC)	85
Figura c – Diagrama de fases Ferro-Carbono, com a fase metaestável Fe ₃ C.....	86
Figura d – Diagrama de resfriamento contínuo TRC para o aço AISI H13.....	87

Figura e - Representação esquemática da curva de revenimento do aço H13.....	92
Figura f – Forno Grion utilizado no tratamento de revenimento	93
Figura g – Forno Trend utilizado no tratamento de têmpera.....	93
Figura h – Porta de cerâmica refratária com abertura para inserção de termopar	94
Figura i – Durômetro e Fornos Trend e Grion	94
Figura j – Serra fita mesa e Serra fita automática laser.....	94
Figura k – Serra policorte com refrigeração forçada e Polimetrix.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação ABNT NBR 6189:1982 dos aços ferramenta	22
Tabela 2 – Classificação AISI – American Iron and Steel Institute – dos aços ferramenta.....	22
Tabela 3 – Composição química nominal dos aços estudados	42
Tabela 4 – Resultados da verificação indireta da incerteza-padrão 67 HRC.....	49
Tabela 5 – Resultados da verificação indireta da incerteza-padrão 44 HRC	50
Tabela 6 - Resultados dos testes de impacto, método Charpy V, amostras com tratamento térmico em laboratório.....	57
Tabela 7– Resultados dos experimentos do 2º revenimento das amostras retiradas da ferramenta industrial das regiões superficial e núcleo – Laboratório Materiais UNINOVE.....	58
Tabela 8 – Resultados do 2º revenimento e ensaio de Charpy V –ferramenta industrial.....	62
Tabela 9 - Comparação da diminuição da tenacidade nas regiões da superfície e núcleo da ferramenta tratada por processo industrial com relação ao valor do tratamento térmico em laboratório.....	64
Tabela 10 - Resultados dos ensaios do aço VH13 em condições de tratamento em laboratório com resfriamento rápido e lento.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnica
AISI	American Iron and Steel Institute
C	Carbono
Cr	Cromo
ESR	Eletro refusão
H	Valor médio da dureza
HRC	Hardness Rockwell C
ISO	International Organization for Standardization
J	Jaule
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NADCA	North American Die Cast Association
ASTM	American Society for Testing and Materials
Lf	Largura
Mo	Molibdênio
NBR	Norma Brasileira
r	repetibilidade
R	Reprodutibilidade
SAE	Society of Automotive Engineer
s	Desvio padrão
Si	Silício
TRC	diagrama de resfriamento contínuo
T	Tempo
U	Incerteza
V	Vanádio
W	Tungstênio
°C/s	Graus Celsius por segundo
® -	Marca registrada com patente.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 PROBLEMÁTICA E RELEVÂNCIA.....	16
1.2 OBJETIVOS.....	19
2 REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1 INTRODUÇÃO AOS AÇOS FERRAMENTA.	21
2.2 AÇOS PARA TRABALHO A QUENTE: Definições, Características e Aplicações.....	22
2.3 SOLICITAÇÕES E PROPRIEDADES DOS AÇOS FERRAMENTA PARA TRABALHO A QUENTE.....	24
2.4 TRATAMENTO TÉRMICO DE AÇOS FERRAMENTA	25
2.4.1 Introdução ao tratamento térmico de ferramentas industriais	25
2.4.2 Influência da taxa de resfriamento durante a têmpera	26
2.2.3 Estudos de tratamentos térmicos em novos aços	31
2.5 ASPECTOS DE QUALIDADE NO TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS FERRAMENTA.....	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA.....	36
3.2 PROCEDIMENTOS DA PESQUISA	37
3.3 PREPARATIVOS PRELIMINARES.....	37
3.3.1 Etapas dos experimentos de laboratório	38
3.3.2 Preparação dos fornos: adaptações dos equipamentos para os experimentos.....	39
3.3.3 Calibração dos instrumentos de medição e controle.....	39
3.4 AMOSTRAS.....	41
3.5 MATERIAIS E CICLOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS	42
3.6 EXPERIMENTO INDUSTRIAL	43
3.7 MEDIÇÕES DE DUREZA	48
3.7.1 Procedimento para ensaio de dureza.....	48
3.7.2 Calibração do equipamento de medição da dureza	50

3.8 ENSAIOS DE IMPACTO.....	52
3.9 AJUSTES PARA OS TESTES DE IMPACTO.....	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
4.1 RESULTADOS E AVALIAÇÃO DOS EXPERIMENTOS DE TÊMPERA E REVENIMENTO REALIZADOS EM LABORATÓRIO.....	55
4.2 RESULTADO DOS EXPERIMENTOS COM TRATAMENTOS TÉRMICOS POR PROCESSO INDUSTRIAL.	57
4.3 SEPARAÇÃO DAS CONTRIBUIÇÕES DA BAINITA E PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS EM CONTORNOS DE GRÃOS NA FRAGILIZAÇÃO DO AÇO.....	65
4.4 IMPLICAÇÕES PARA O CONTROLE DE QUALIDADE DE FERRAMENTAS INDUSTRIAIS.....	71
4.4.1 Controle do Processo de Tratamento Térmico.....	71
4.4.2 Utilização do teste de impacto como controle da qualidade.....	73
4.4.3 Projeto de ferramentas com base na taxa de resfriamento.....	75
4.4.4 Considerações finais sobre o impacto do presente trabalho nas recomendações de tratamentos térmicos	76
5 CONCLUSÕES.....	77
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	77
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
APÊNDICE 1 – Fundamentos tratamentos térmicos dos aços.....	84
APÊNDICE 2 - Equipamentos e instrumentos utilizados.....	85

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMÁTICA E RELEVÂNCIA

Ferramentas industriais são empregadas na indústria em diversas operações, para corte ou conformação de outros materiais (ROBERTS, 1998). Por exemplo, dificilmente se encontra uma empresa, do ramo industrial, que não utilize pelo menos uma operação de trabalho com ferramentas, como moldes, matrizes, punções ou ferramentas de corte e usinagem. Desta forma, o conhecimento do comportamento e do desempenho dos ferramentais é importante para os processos industriais, para a minimização de custos ou ganhos de produtividade. E, dentre os diversos pontos relacionados ao desempenho dos ferramentais, encontram-se as propriedades ou, de forma mais abrangente, as variáveis relacionadas à qualidade dos materiais das ferramentas.

Um exemplo histórico desta inter-relação entre materiais, ferramentais e as questões de produtividade é contatado nos estudos de Frederick Winslow Taylor, considerado o pai da administração científica e da engenharia de produção (CHIAVENATO, 2009). No início do século XX, dentre as diversas variáveis estudadas para o ganho de produtividade e a redução dos tempos de operação, Taylor observou que as limitações do material das ferramentas de usinagem limitavam o desempenho dessas, especificamente reduzindo as velocidades de corte nas operações de usinagem. Desta forma, desenvolveu juntamente com o engenheiro Maunsel White tratamentos térmicos para permitir maior dureza em alta temperatura de aços ferramenta com 2%C 7%W e 2,5%Mn (BECKER, 1910). As ferramentas obtidas poderiam cortar em velocidades mais altas e promover melhor produtividade nas operações de usinagem. Estes estudos foram os precursores de novos aços, denominados de *high-speed cutting steels* que, posteriormente, foram denominados de *high speed steels*, em português denominado de aços rápidos, o primeiro aço rápido, T1, patenteado pela empresa Crucible Steel Company (WILSON, 1975). O desenvolvimento desta nova classe de aços mostrou ganhos expressivos nos processos e, por mais de 70 anos, estes materiais foram utilizados na confecção das ferramentas de corte. Hoje a maior parte é constituída de

materiais compósitos, com carbonetos de tungstênio ligados a uma matriz de cobalto, na prática conhecidos pelo termo metal duro (TRENT; WRIGHT, 2000).

Da mesma forma que no exemplo anterior das ferramentas de corte, existem diversos processos industriais que utilizam aços especiais em moldes e matrizes (palavras sinônimas) e nos quais o comportamento do material da ferramenta influencia diretamente o custo, a produtividade ou a qualidade final da peça produzida. Para o bom desempenho dessas ferramentas além do controle do processo no qual elas são utilizadas o aço que a constitui deverá ter as características de qualidade conforme especificações e recomendações do fabricante e do projeto da ferramenta. Os aços estudados nesse trabalho pertencem a uma classe específica para trabalho a quente. Eles são os destinados a ferramentas utilizadas na fundição ou conformação a quente e que quando em uso atingem temperaturas acima de 600°C. Nestas aplicações, destacam-se as operações de conformação como nas forjarias de metais, principalmente aços, na indústria metal mecânica (GABARDO, 2011; BARBOSA; BACALHAU, 2012).

Entre os fatores mais importantes para o desempenho e a durabilidade das ferramentas o tratamento térmico é de especial interesse, visto que as propriedades mecânicas dos aços ferramenta somente são atingidas com controles adequados de temperaturas, tempos e procedimentos, conseqüentemente, os benefícios de um aço ferramenta, por mais alta qualidade que ele possua, apenas serão aproveitados após um adequado tratamento térmico. Além disso, a literatura aponta que muitos problemas de baixo desempenho e falhas inesperadas, encontradas em situações práticas são causados por erros de tratamento térmico (MESQUITA & MORAES, 2012).

Dentre as diversas características, o atendimento das propriedades de dureza e tenacidade é importante para evitar o desgaste, quebra ou deformações prematuras das ferramentas (LESKOVSEK; SUSTARSIC; JUTRISA, 2006). A dureza é uma das propriedades mecânicas mais comumente analisada e controlada em ferramentas, por ser um indicador importante devido à sua correlação com a resistência mecânica do material e também de fácil medição (MESQUITA; BARBOSA, 2004). Porém, o efeito da dureza no desempenho depende do tipo de aplicação do aço ferramenta, seu efeito é preponderante quando se requer resistência mecânica e ao desgaste. Portanto, as variáveis do processo de

tratamento térmico como temperatura, tempo, taxas de aquecimento e resfriamento e equipamentos utilizados, assim como todos os recursos envolvidos no processo, influenciam grandemente no desempenho e durabilidade da ferramenta. (MESQUITA; BARBOSA, 2006).

Apesar desta importância das variáveis do tratamento térmico e da sua influência nas propriedades e, conseqüentemente, no desempenho das ferramentas industriais, poucos estudos foram focados em avaliar o comportamento de peças em tamanho real. Ou seja, a maioria dos estudos na literatura é conduzida em amostras tratadas em laboratório, mas esta simplificação pode ofuscar aspectos importantes. Um deles é a diferença da taxa de resfriamentos da região do núcleo com a da superfície da ferramenta. Ferramentas industriais usualmente possuem dimensões acima de 100 mm de secção e pesos que vão de 100 kg a mais de 20 toneladas. Portanto, o comportamento no aquecimento e resfriamento pode ser dramaticamente diferente em uma peça pequena ou em uma amostra de laboratório. E estas variações de taxas, como serão mostradas a seguir, podem alterar as propriedades obtidas e, assim, o desempenho das ferramentas. Nestas taxas, a mais importante dela é o resfriamento “rápido”, denominado de têmpera, sendo que a taxa de resfriamento durante esta etapa é o parâmetro de especial importância. Se demasiadamente acelerada, trincas podem surgir, como conhecido na literatura (ROBERTS, 1998). Porém, se demasiadamente lenta, a dureza e a tenacidade podem ser influenciadas. Nos aços ferramenta, a facilidade de obtenção de dureza, mesmo em processos mais lentos de têmpera, pode sobrepor outros impactos em propriedades. E, especificamente neste ponto, pouquíssimas avaliações foram encontradas na literatura, principalmente devido às dificuldades experimentais e de custos relacionados a conduzir estudos em escala real.

Desta forma, o presente trabalho focou na avaliação da influência das taxas de resfriamento lento no tratamento térmico industrial das ferramentas nas propriedades de alguns aços ferramenta de trabalho a quente. Foram escolhidos os aços VH13® (ASTM H13), tradicionalmente utilizados nas ferramentas para trabalho a quente, e os aços recentemente lançados e comercializados pela empresa Villares Metals denominados comercialmente por VHSUPER® e TENAX 300®.

Esses novos aços foram desenvolvidos com elementos de ligas e processos de fabricação adequados para conferir propriedades de dureza e tenacidade a

quente visando uma vantagem competitiva em relação ao tradicional VH13[®]. Sobre o aço VH13[®] existe vasta publicação técnica (GABARDO, 2011) e informações sobre seu desempenho e propriedades, já não ocorre o mesmo com os novos aços.

Por meio de um aparato experimental desenvolvido exclusivamente para este trabalho, amostras dos aços ferramentas VH13[®], VHSUPER[®] e TENAX 300[®] foram cortadas em blocos e formaram um modelo de ferramenta industrial de grandes dimensões, após os tratamentos térmicos de têmpera e revenimentos amostras dos aços das regiões da superfície e do núcleo da ferramenta foram obtidas, propiciando as comparações de características de dureza e tenacidade resultantes de tratamentos térmicos em condições industriais e de laboratório.

1.2 OBJETIVOS

Entender a influência da taxa de resfriamento do tratamento térmico de têmpera na qualidade de aços utilizados em ferramentas para trabalho a quente, simulando condições industriais e estabelecendo recomendações para a maximização do desempenho.

Os aços estudados foram o VH13[®], VHSUPER[®] e TENAX 300[®].

Os objetivos específicos são:

- Estabelecer ciclos de tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, aplicados aos aços VH13[®], VHSUPER[®] e TENAX 300[®], para a obtenção das curvas características de dureza x temperatura de revenimento.
- Determinar as características de tenacidade para as condições de dureza de 45 RHC obtidas num segundo revenimento dos aços tratados em laboratório e em processo industrial.
- Identificar a influência da taxa de resfriamento na dureza e tenacidade dos aços com base nos resultados obtidos dos corpos de provas tratados em condições controladas em laboratório e os submetidos a tratamento térmico em processo industrial.

- Mostrar através dos resultados de ensaios de laboratório, simulando condições de diferentes taxas de resfriamento durante o tratamento térmico de têmpera as contribuições da bainita e da precipitação de carbonetos na diminuição da tenacidade dos aços.
- Estabelecer recomendações da qualidade de ferramentas industriais, em termos de variáveis de controle (taxa de resfriamento, temperatura, tempo) no tratamento térmico e no projeto das mesmas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 INTRODUÇÃO AOS AÇOS FERRAMENTA.

Um importante segmento da indústria siderúrgica, na fabricação de aços especiais, é representado pelos aços ferramenta. Uma definição interessante de aços ferramenta é apresentada pela seção específica do Manual da IRON AND STEEL SOCIETY (1988). São conhecidos como aços rápidos, aços liga ou aço ao carbono, permitem tratamentos térmicos de têmpera e revenimento utilizados em ferramentas de conformação de materiais na temperatura ambiente ou em temperaturas elevadas. Esses aços são aplicados quando se requer alta resistência ao desgaste, tenacidade e resistência mecânica para se atingir bom desempenho.

Considerando esta definição, três características principais são percebidas: a) a aplicação em processos de corte e conformação; b) as características especiais de fabricação; e c) os aspectos de tratamento térmico.

Um aspecto interessante dos aços ferramenta, que também os difere dos materiais estruturais, é que normalmente tais materiais são empregados até que ocorram falhas que levem à suspensão do uso da ferramenta (MESQUITA; BARBOSA, 2008). Portanto, torna-se importante avaliar as principais solicitações e propriedades desses materiais, como mostra o item a seguir.

Os processos empregados para produção dos aços ferramenta aliados à formulação da sua composição química permitem que eles atinjam um elevado padrão de desempenho em relação aos aços comuns com baixo teor de carbono. Desempenho esse obtido através de propriedades mecânicas de elevada resistência ao desgaste e suficiente resistência ao impacto, tão necessárias para permitir suportar grandes esforços para as aplicações descritas. Essas características normalmente se mantêm devido à adição de elementos de liga como os seguintes metais cromo Cr, tungstênio W, molibdênio Mo, vanádio V, manganês Mn e alta porcentagem de carbono C.

A classificação dos aços ferramenta é estabelecida em norma técnica com base nas suas características químicas e metalúrgicas e na sua aplicação. A norma ABNT NBR 6189:1982 trata desse assunto e na Tabela 1 é mostrada essa classificação.

Tabela 1 – Classificação ABNT NBR 6189:1982 dos aços ferramenta

Grupo geral	Subgrupo	Símbolo
1. Aços rápidos	1.1 ao molibdênio	M
	1.2 ao tungstênio	T
	1.3 outros	R
2. Aços para trabalho a quente	2.1 ao cromo	H13 H19
	2.2 ao tungstênio	H20 H39
	2.3 ao molibdênio	H40 H49
	2.4 outros	C
23. Aços para trabalho a frio	3.1 ao carbono	W
	3.2 alto carbono e baixa liga	O
	3.3 alto carbono e média liga	A
	3.4 alto carbono e alta liga	D
	3.5 resistentes ao impacto	S
	3.6 aços para moldes	P
	3.7 outros	L

Fonte: ABNT NBR 6189, 1982.

A classificação dos aços ferramenta segundo a AISI (AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE apud SILVA; MEI, 2010, p. 364) é muito utilizada na engenharia de aplicação, na Tabela 2 é mostrada essa classificação.

Tabela 2 – Classificação AISI – American Iron and Steel Institute – dos aços ferramenta

Aços para trabalho a frio	
O	Aço temperáveis em óleo (Oil)
A	Aços média liga, temperáveis ao ar (Air)
D	Aços alto carbono, alto cromo
W	Aços temperáveis em água (Water)
S	Aços resistentes ao choque (Shock)
Aços para trabalho a quente (Hot Working)	
H1 - H19	Ao cromo
H20 - H39	Ao tungstênio
H40 - H59	Ao molibdênio
Aços pra Moldes para Plásticos	
P	Aços para moldes
Aços rápidos	
T	Ao tungstênio
M	Ao molibdênio

Fonte: SILVA; MEI (2010)

2.2 AÇOS PARA TRABALHO A QUENTE : Definições, Características e Aplicações

Aços ferramenta para trabalho a quente formam um grupo especial de aços de alta liga, destinados a ferramentas industriais para conformação de metais em alta temperatura, tipicamente acima de 600°C. Dentre os diversos aços utilizados

para essas aplicações destacam-se o aço ASTM H13 que é utilizado há décadas. Recentemente, novos aços foram desenvolvidos, como os aços comercialmente denominados VHSUPER® e TENAX 300® (Villares Metals®)¹, desenvolvidos para aumentar a vida útil de moldes e matrizes, e que também foram objetos de estudo do presente trabalho. Nesses novos aços, a presença de elementos de liga no material aliada ao tipo de tratamento térmico especificado, obtém-se as propriedades mecânicas, tais como tenacidade, resistência mecânica, dureza, usinabilidade e resistência mecânica em trabalho a quente e a corrosão (BARBOSA; BACALHAU, 2012).

Embora os aços para trabalho a quente sejam presentes na maioria das aplicações industriais, esses aços ferramenta não são tão bem definidos como os aços comuns ao carbono de baixa liga. Porém, existem referências interessantes que reúnem os conhecimentos destes materiais (ROBERTS, 1998). Esses aços constituem a família H nas classificações de aços ferramenta.

Muitas variáveis são importantes para a vida útil de ferramentas para trabalho a quente, como: o projeto da ferramenta, as condições de operação como lubrificação e pré-aquecimento da matriz antes do seu uso, aquecimento e refrigeração durante o processo produtivo, o aço empregado e o tratamento térmico da ferramenta (VILLARES, 2001). Muitos problemas de baixo desempenho e falhas inesperadas, encontradas em situações práticas são causados por erros de tratamento térmico. Além disso, as propriedades de muitos aços apenas podem ser atingidas após serem submetidos ao tratamento térmico.

Os aços para trabalho a quente, normalmente, são utilizados até a exaustão (até a falha), ou seja, a falha sempre ocorrerá de maneira mais lenta ou mais rápida, dependendo do material empregado na matriz e do processo de tratamento térmico empregado para conferir as características físicas especificadas para a sua aplicação e uso. Por isso, a melhoria das propriedades dos materiais das ferramentas pode afetar tão dramaticamente a competitividade dos processos industriais que as utilizam.

¹ Disponível em: <http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/1020_PTB_HTML.htm>. Acesso em: 17 mar. 2013.

2.3 SOLICITAÇÕES E PROPRIEDADES DOS AÇOS FERRAMENTA PARA TRABALHO A QUENTE

Conforme Berns (1987), as propriedades dos aços ferramentas devem ser apropriadas para as condições de uso da ferramenta do qual eles fazem parte. Solicitações como esforços mecânicos e variações térmicas da ferramenta industrial devem ser levadas em consideração na avaliação das condições de trabalho da ferramenta como resistência mecânica em alta temperatura para evitar desgaste e a tenacidade do aço para evitar trincas ou quebra catastrófica. Esta necessidade decorre das elevadas temperaturas nos processos em que tais ferramentas são empregadas atingindo 1100°C nas ferramentas de forjamento a quente, apesar de curtos intervalos de tempo de contato (BYRER, 1985); da ordem de 700°C em fundição sob pressão de ligas de alumínio (KAYE, 1982), com maiores tempos de contato e, também, maior capacidade de troca de calor devido ao contato com alumínio líquido; e menores temperaturas, na extrusão de alumínio (da ordem de 500°C) ou ligas de cobre (acima de 600°C), porém com contato contínuo por várias horas (LAUE, 1981).

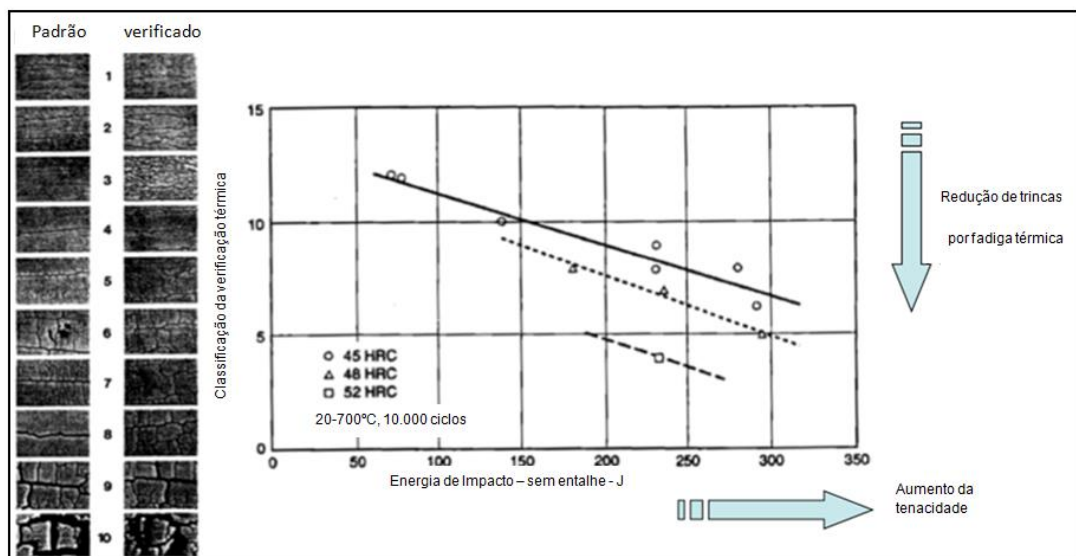
O longo tempo de exposição nessas temperaturas (seja pelo processo em si como no caso da extrusão seja por milhares de peças produzidas como em forjamento ou fundição sob pressão) onde estão sujeitas à aplicação de solicitações térmicas e mecânicas num complicado arranjo de forças, torna, também, fundamental a propriedade de resistência ao revenido. Ou seja, quanto o material resiste à perda em resistência por fenômenos de revenido que ocorrem durante sua utilização. A quantificação deste efeito pode ser feita de maneira interessante pelo parâmetro de Hollomon-Jaffe (1945), quantificando conjuntamente os efeitos do tempo e temperatura. Porém, as condições de trabalho podem acelerar o efeito de perda em dureza, como mostrado no estudo de fadiga térmica, onde o aumento dos defeitos microestruturais facilita a difusão e o coalescimento (SJÖSTRÖM; BERGSTRÖM, 2004).

A tenacidade usualmente está relacionada a mecanismos de falha envolvendo trinca, em especial as falhas por fadiga térmica, como descrita a seguir. Essas ferramentas são submetidas a grandes variações de temperatura durante o uso nas atividades produtivas a que ela se destina. Isso favorece a falha por fadiga

térmica, falha por choques mecânicos, deformação plástica, propagação de trincas e desgastes pelo uso. (GABARDO; OKIMOTO, 2011; GALLO et al., 2011, p. 154).

Após o início de uma trinca em uma ferramenta, a propriedade que vai definir a velocidade de propagação e aumento dessa trinca é a tenacidade. A ordem de grandeza da tenacidade, uma característica que depende do material e do processo de tratamento térmico empregado, é importante em regiões da ferramenta que são mais solicitadas mecanicamente como em cantos vivos. Por isso, quanto maior a tenacidade, maior será a vida útil em fadiga térmica, como mostra a Figura 1.

Figura 1: Efeito da tenacidade, medida pela energia de impacto nas abscissas, e a redução do dano por fadiga térmica nas ordenadas



Fonte: ELIASSON; SANDBERG (1989, adaptado).

2.4 TRATAMENTOS TÉRMICO DE AÇOS FERRAMENTA

2.4.1 Introdução ao tratamento térmico de ferramentas industriais

Os tratamentos térmicos são operações de aquecimento e resfriamento visando alterar as características de aços e ligas especiais. Essas alterações ocorrem na estrutura cristalina do aço e também na formação de compostos que interferem nas propriedades mecânicas desses aços. A fundamentação básica sobre tratamentos térmicos é apresentada no Apêndice I da presente dissertação.

O atendimento das especificações de dureza e tenacidade do aço ferramenta é importante para evitar o desgaste, quebra ou deformações prematuras das ferramentas (MESQUITA; BARBOSA, 2006). A dureza é uma das propriedades mecânicas mais comumente analisada e controlada em ferramentas, por ser um indicador importante devido a sua correlação com a resistência mecânica do material (MESQUITA, 2010). Porém, o efeito da dureza no desempenho da ferramenta depende da aplicação da ferramenta sendo a tenacidade característica que também deve ser obedecida e controlada. Portanto as variáveis do processo de tratamento térmico como: temperatura, tempos, taxas de aquecimento e resfriamento, equipamentos utilizados assim como todos os recursos do processo envolvido, influenciam muito na obtenção da dureza e tenacidade especificadas e impactam no desempenho e durabilidade da ferramenta (MESQUITA et al., 2005).

2.4.2 Influência da taxa de resfriamento durante a têmpera

No que se refere ao formato e dimensões da ferramenta, a energia térmica é dissipada da superfície da ferramenta para o meio refrigerante e a taxa de resfriamento de um tratamento de têmpera depende da área da superfície pela massa da ferramenta. Quanto maior for essa razão maior será a taxa de resfriamento, conseqüentemente, mais profundo será o efeito no endurecimento e nas características de microestrutura (CALLISTER, 2008).

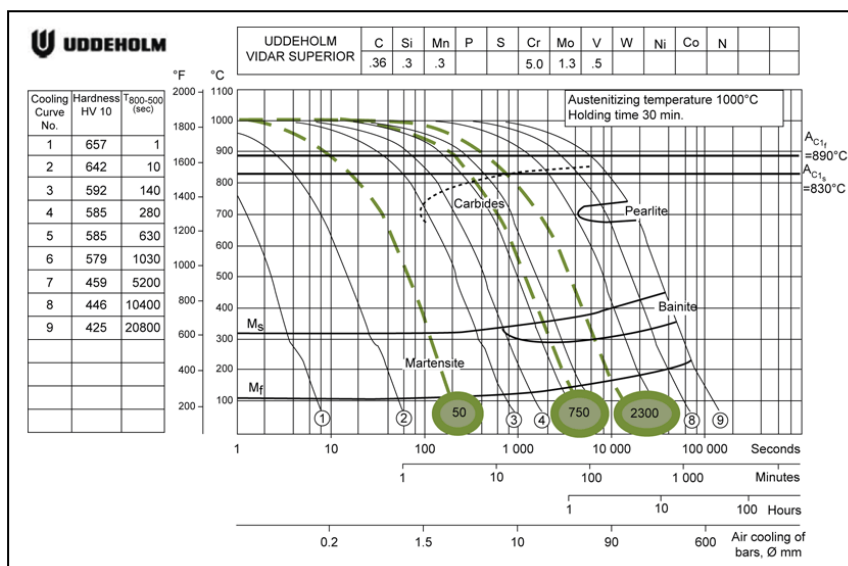
Apesar das variações microestruturais com a taxa de resfriamento muitas vezes a dureza obtida em aços ferramentas não é impactada por resfriamentos mais lentos, ou mesmo pode ser corrigida pelo processo de revenimento subsequente à têmpera. Isto ocorre porque os aços ferramenta de alta liga empregados em trabalho a quente, tanto os tradicionais quanto os novos materiais, possuem elevada temperabilidade. Por isso, nas décadas de 30 a 60, acreditava-se que estes materiais poderiam ser temperados com a utilização de baixas velocidades de resfriamento durante a têmpera, pois a obtenção da dureza final era entendida como o fator principal (ROBERTS, 1998).

Porém, desde os primeiros estudos no final da década de 40 por Payson (1948) até recentemente Mesquita (2012), diversos resultados da literatura mostram que este

conceito incorre em falhas prematuras. Em termo de dureza, o aço H11 ou H13 podem sim ser temperados mesmo com taxas de resfriamento lentas (como têmpera ao ar, por exemplo). Porém, este procedimento promove excessiva fragilização dos contornos de grão, pela precipitação de carbonetos. Este efeito é normalmente indicado por uma linha tracejada na curva de resfriamento contínuo do material e, micro estruturalmente, aparece como uma marcação expressiva dos contornos de grão após ataque metalográfico. Hoje é de tal modo importante, que a recomendação da associação americana de fundição sob pressão estabelece níveis aceitáveis de marcação em contornos de grão para aços de trabalho a quente aplicados em matrizes de alto desempenho (NADCA, 2006).

Como exemplo de entendimento deste efeito do resfriamento lento, temos o diagrama de resfriamento contínuo TRC da Figura 2 em que são mostrados os vários microconstituintes do aço ferramenta (carbonetos, perlita, bainita e martensita) que se formam em diferentes taxas de resfriamento do tratamento térmico. Nele pode-se ver que a estrutura metalográfica da série 50 de resfriamento mais rápido (tempo de 50 segundos entre as temperaturas de 800 a 500°C) é constituída unicamente de martensita. Já as séries de resfriamentos mais lentos séries 750 e 2300 contêm uma mistura de bainita e mantensita e a quantidade de bainita aumenta com a diminuição da taxa de resfriamento do aço.

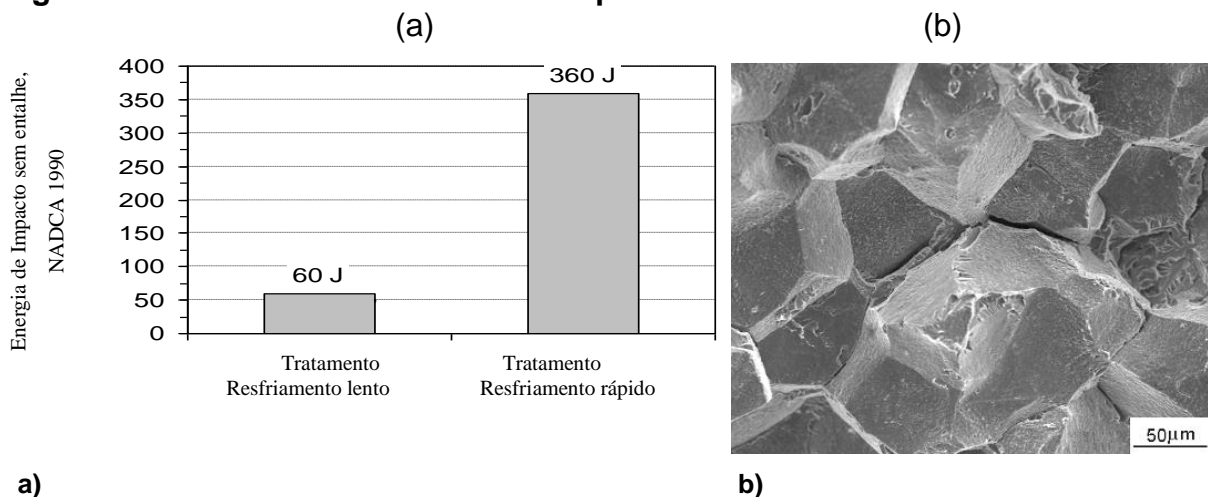
Figura 2 – Diagrama de resfriamento contínuo TRC para aços de alta liga.



Fonte: Hanrik; Nilsson (2012)

Alguns exemplos na literatura recente mostram o efeito das taxas de resfriamento na tenacidade de aços para trabalho a quente. Um exemplo é mostrado na Figura 3, a qual apresenta o expressivo aumento na tenacidade do mesmo material submetido a tratamento térmico de têmpera com resfriamento acelerado. Na Figura 3b, a fratura intergranular do corpo de prova de impacto, com resfriamento lento, denotando a fratura intergranular e a fragilização dos contornos de grão austeníticos pela têmpera com baixa taxa de resfriamento (MESQUITA, 2008).

Figura 3 – Estudo de tenacidade em impacto e análise de fratura



a) Diagrama de barras referente ao estudo de tenacidade em impacto do novo aço ferramenta para trabalho a quente, com nomenclatura comercial VHSUPER®, de uma matriz com falha prematura, antes e após retratamento.

b) Imagem (MEV) da fratura antes do retratamento, por microscopia eletrônica de varredura, mostrando o aspecto intergranular, resultante da fragilização dos contornos de grão.

Fonte: MESQUITA (2008)

Outro exemplo é apresentado por Jespersen e Nilsson (2012), em que verificaram que a quebra brusca das ferramentas industriais para trabalho a quente é devido aos métodos de trabalho e também a lenta taxa de resfriamento da mesma durante o tratamento de têmpera. Os resultados comparativos de experimentos mostrou que os aços que tiveram os resfriamentos mais rápidos tiveram maiores valores de resistência à fratura e ductibilidade.

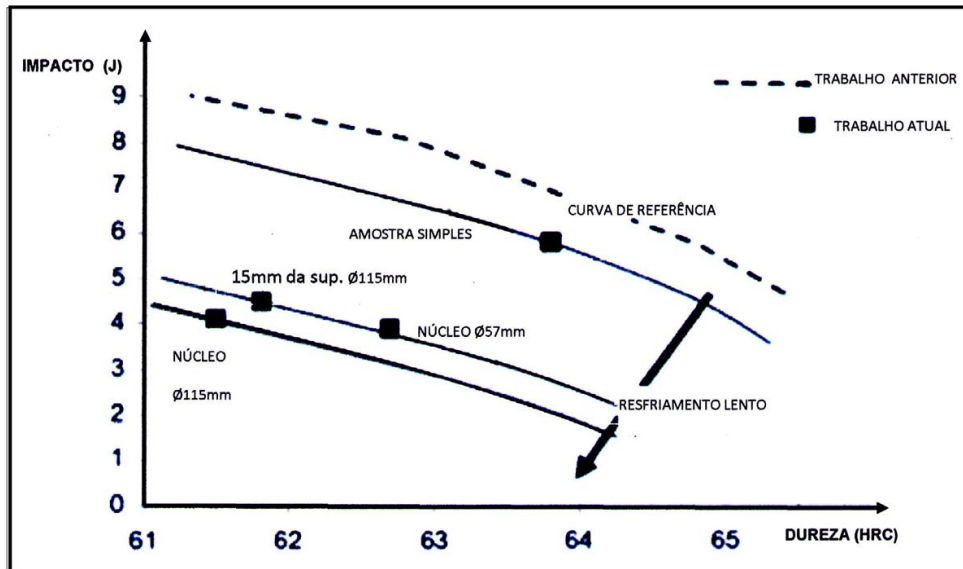
Em aços rápidos, semelhantes aos aços para trabalho a quente em termo de precipitação secundária, porém com maior quantidade de elementos de liga, um interessante resultado pode também ser observado (ver Figura 4). Valores específicos não podem ser comparados, devido aos materiais possuírem diferentes

faixas de dureza, causados pelo tempo diferente de resfriamento, peças maiores levam mais tempo para atingir e permanecer em austenitização, reduzindo a dissolução e precipitação secundária e, assim, reduzindo a dureza final após revenido (GONÇALVES et al., 2011).

Porém, uma relação das curvas de dureza versus tenacidade pode ser feita, seguindo a tendência de estudos anteriores em amostras de laboratório (GONÇALVES et AL. 2011). Nesta relação, observa-se que as amostras do núcleo da barra de 57 mm possui um comportamento semelhante da superfície da barra de 115 mm, o que condiz com os dados de taxas de resfriamento, apresentados ao final da figura. Portanto, é possível indicar um sentido em que, para mesma dureza, as curvas possuem um decaimento na tenacidade e, portanto, uma fragilização devido ao resfriamento lento na têmpera. Isto é indicado pela seta na Figura 4.

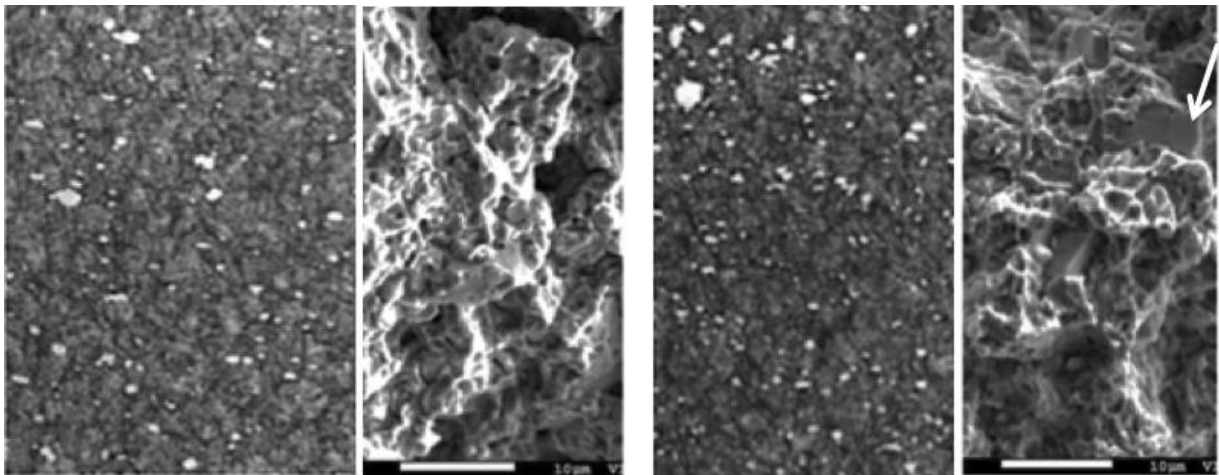
As razões para tal fragilização são, teoricamente, provenientes de duas fontes principais: precipitação em contornos de grão ou formação da bainita. Para os aços rápidos, a formação de bainita ocorreria apenas em resfriamentos muito lentos, (ROSE, 1972) sendo assim esperado que o mecanismo principal seja pela formação de carbonetos em contornos de grão. Tal observação é difícil de ser feita por metalografia, mas marcações em contornos de grão podem ser observadas nas imagens metalográficas da Figura 5(b). Algumas regiões da fratura das amostras resfriadas mais lentamente mostraram-se lisas e com aspecto de pequenas regiões intergranulares, como indicado pela seta. Assim, é provável dizer que o mecanismo de fragilização, observado na Figura 5(a), é causado principalmente pela precipitação de carbonetos em contornos de grão.

Figura 4 – Curva de impacto em função da dureza para regiões da superfície e núcleo



Fonte: GOLÇALVES et al. (2011), adaptado.

Figura 5 – Micrografias ópticas (esquerda) e análise de fratura (direita) para os extremos de taxa de resfriamento



a) Amostras Isoladas (taxa – 470°C/min.)

b) Amostras Núcleo barra 115 mm (taxa – 57°C/min.)

Algumas regiões lisas, com aparência de fratura intergranular, foram observadas nas amostras de resfriamento mais lento, como indicado pela seta. A taxa mostrada refere-se ao intervalo entre 1200 e 650°C.

Fonte: GOLÇALVES et al. (2011).

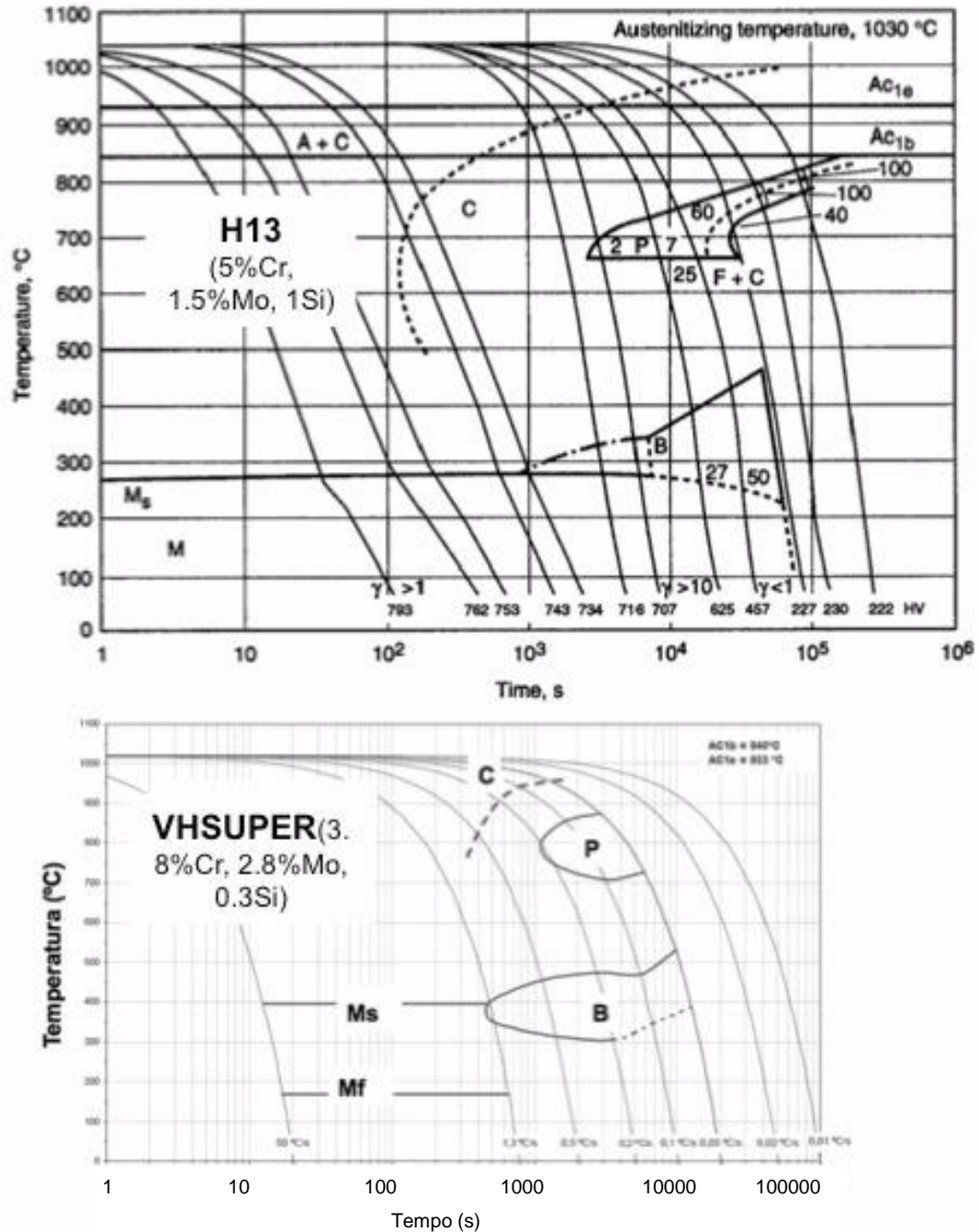
Apesar de metalurgicamente ser clara a necessidade de um resfriamento rápido e mesmo constando em recomendações como a NADCA, ainda podem ser observados casos de excessiva precipitação em contornos de grão, devido à baixa taxa de resfriamento na têmpera (MESQUITA, 2008). Isto ocorre porque, em termos

de tratamento térmico, a têmpera lenta é muito mais simples de ser realizada, evitando distorções e trincas. Além disso, o controle é unicamente feito, em muitas empresas, pela dureza e esta não é sensível a mecanismos de fragilização.

2.4.3 Estudos de tratamentos térmicos em novos aços

Nos últimos 10 anos, novos aços ferramenta para trabalho a quente vêm sendo empregados, especialmente utilizando o conceito de redução do teor de Si ou aumento do teor de Mo. Estas alterações, além de afetarem a tenacidade e resistência a quente (como mostra a literatura, MESQUITA, 2003), também afetam a temperabilidade dos materiais, como mostra o Figura 6. Desta forma, os mecanismos de fragilização acima discutidos podem ocorrer em diferentes intensidades nestes novos materiais.

Figura 6 – Comparativo entre a curva TRC do aço VHSUPER® e H13



Fonte: (THELNING, 1984) - VILLARES METALS

Uma importante relação entre esta fragilização por resfriamento lento durante a têmpera e os novos aços é também identificada, conforme o trabalho de Umino et al. (2003). Como em outras referências, este trabalho apresenta o aumento na tenacidade com a redução do teor de silício, avaliada pelo ensaio de tenacidade a fratura. Porém, o resultado mais relevante é que a diferença das ligas de altos e

baixos Si praticamente desaparece se empregadas baixas velocidades de resfriamento na têmpera. Por um lado, é possível que a fragilização em contornos de grão gere tal redução. Por outro lado, como sugere o trabalho de Okuno (1987), o aumento da quantidade de bainita (presente em taxas de resfriamento mais lentas) também promove redução da tenacidade, mesmo na ausência de precipitação de carbonetos em contornos de grão austeníticos. Assim, ambos os fatos poderiam explicar a “perda do efeito benéfico” da redução do silício em determinadas condições de têmpera. Contudo, a literatura não apresenta informações neste sentido.

Portanto, o efeito do tratamento térmico nos novos aços ferramenta, aparentemente, mostra-se mais relevante que no aço convencional VH13[®]. Se não for corretamente aplicado, pode levar à eliminação das grandes vantagens de tenacidade presentes nestes materiais. E este efeito torna-se importante em termos tecnológicos, pois define qual o ganho de propriedades estarão presentes em ferramentas de grandes dimensões produzidas com estes novos aços ferramenta. Com efeito, algumas análises de falha de matrizes de grandes dimensões, não são publicadas por questão de sigilo, mostram que este efeito efetivamente ocorre. Ou seja, os novos aços ferramenta, que deveriam apresentar tenacidade sensivelmente superior que os convencionais, podem ser intensamente fragilizados dependendo das velocidades do resfriamento empregadas na têmpera.

2.5 ASPECTOS DE QUALIDADE NO TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS FERRAMENTA

Os problemas de desgastes prematuros e falhas inesperadas são encontrados em situações práticas e na grande maioria causados por erros ou falhas no processo de tratamento térmico notadamente nos controles das taxas de resfriamento e ausência do controle da tenacidade (MESQUITA, 2010). Não conformidades que acarretam sérios prejuízos devido ao alto custo dessas ferramentas e comprometimento dos programas de produção estabelecidos pelas empresas usuárias desses ativos.

O processo de tratamento térmico de ferramentas é classificado como processo especial, pois, a garantia da qualidade somente é possível quando o processo for mantido sob controle já que não é possível a inspeção no interior da ferramenta para a avaliação da dureza e tenacidade do aço (ISO 9001:2008). Desta forma, deve ser feita a validação do processo empregado de modo que, mesmo sem medições e ensaios específicos de controle de qualidade, a ferramenta final possa atingir suas propriedades especificadas (MESQUITA & MORAES, 2012).

Sendo o tratamento térmico um processo crítico na garantia da qualidade das ferramentas, esses processos devem ser planejados. Entretanto, é necessário ir além do planejamento, nele deve também incluir o controle da qualidade nas atividades operacionais. Isso é um tanto diferente do que é feito em processos menos críticos quando não conformidades ocorridas ficam evidentes (JURAN, 1990). Conforme as recomendações contidas na NBR ISO 9001 (ABNT 2008) no controle de produção e prestação de serviço a organização deve planejar e realizar a produção sob condições controladas. Essas condições se referem a: informações técnicas dos clientes e fornecedores, disponibilidade de instruções de trabalho, uso de equipamento adequado, disponibilidade e uso de equipamentos de monitoramento medição, monitoramento e medição para manter a capacidade do processo e implementação de atividades de liberação do produto. Conforme citado por Zanco et al. (2011) em seu estudo realizado em uma empresa metal-mecânica, a criação de indicadores de qualidade se faz necessário para o controle do processo, tendo em vista que atualmente o mercado competitivo demanda das empresas um permanente controle de seu desempenho. Indicadores do processo de tratamento térmico são importantes para a certificação de que o produto está conforme as especificações do projeto. Segundo Rodrigues (2006) indicadores de desempenho de um processo são critérios explícitos de medidas, que devem monitorar as ações gerenciais em um processo. Os indicadores são definidos para quantificar os resultados das ações e para estabelecer e valorar o cumprimento dos objetivos específicos e metas, diante da natureza e especificidade do processo.

Na gestão da qualidade dos processos a padronização dos métodos de trabalho, através de normalização ou instruções de trabalho, é fundamental para se atingir o desempenho desejado e a uniformidade dos produtos. Na Gestão da Qualidade a padronização ou normalização é a base para as rotinas ou métodos de trabalho do

processo, quando não existente ou não validado interfere na qualidade do produto. Entretanto, a experiência tem demonstrado que a situação brasileira no tocante à padronização não é boa (CAMPOS, 1940). Pelo trabalho desenvolvido por Moraes (2013) no setor de tratamento térmico de ferramentas indústrias essa situação continua crítica, faltam; literatura, normas específicas, treinamento dos recursos humanos envolvidos no processo e também dos gestores. Os atores envolvidos na cadeia produtiva que contém processo de tratamento térmico, cliente, fornecedores e gestores precisam entender que a padronização é necessária para a melhoria da produtividade e competitividade em nível internacional da organização.

O processo produtivo para o tratamento térmico é uma sequência de atividades organizadas que transformam a ferramenta para ter um aumento no valor agregado para o cliente, ferramenta com maior durabilidade e desempenho. Sendo recomendável que o desenvolvimento do processo obedeça à abordagem sistêmica, ou seja, entender e gerenciar os processos inter-relacionados, como um sistema, projeto da ferramenta, gestão dos materiais, engenharia de aplicação, gestão da qualidade, engenharia do processo, as interações entre tais processos são conhecidas como abordagem de processos são fatores que contribuem para a eficácia e eficiência no cumprimento dos objetivos, (ROTONDARO, 2005).

Independentemente do ramo de atividade da empresa, é necessário que seu processo produtivo seja controlado, a fim de evitar o desenvolvimento e fabricação de produtos fora do especificado. Porém, para isso ocorrer, é necessário que a empresa utilize as ferramentas da Qualidade para o controle da produção, como o Controle Estatístico do Processo (CEP), ferramenta para auxiliar a análise e detecção de causas dos problemas como o Diagrama de Ishikawa, Listas de Verificação, entre outras, (Mañas, 2011).

Os procedimentos operacionais utilizados nos processos de tratamento térmico devem ser devidamente estudados, validados e padronizados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho iniciou-se com o estudo de conceitos de metalurgia dos aços ferramentas em variada literatura, incluindo livros, artigos de periódicos e de eventos científicos e dissertações. Como tem sido preconizado por vários autores (MARCONI; LAKATOS, 1999; SILVA; MENEZES, 2005), a metodologia científica caracteriza os caminhos e os meios utilizados para se realizar a pesquisa, assim sendo, deve-se evidenciar claramente o método e a classificação da pesquisa – quanto à natureza, abordagem, objetivos e procedimentos técnicos adotados. Com respeito ao método aqui utilizado, pode-se dizer que o trabalho foi desenvolvido em duas etapas:

- a) Execução de experimentos de laboratório para a apuração dos valores de dureza e tenacidade das amostras dos aços ferramentas estudados e das suas microestruturas.
- b) Realização de tratamento térmico de têmpera e revenimento em uma ferramenta de grades dimensões em instalações industriais.

Quanto ao processo de abordagem, ela pode ser classificada como quantitativa, envolvendo valores correlacionados a resistência dos aços e suas tenacidades, correspondente a um estudo aprofundado e exaustivo de um ou mais objetos, de maneira a propiciar um conhecimento mais amplo e detalhado. De fato, objetivou-se tratar o processo de tratamento térmico industrial num contexto real, o que forneceu à pesquisa uma abordagem prática quanto a sua finalidade.

Como delimitações do trabalho pode-se citar que foi adotado um agrupamento das atividades em grupos maiores; (Universidade de UPPER, Áustria, Villares Metals) formando um conjunto de esforços para a consecução dos resultados.

3.2 PROCEDIMENTOS DA PESQUISA

O foco do presente trabalho foi a comparação do aço ferramenta tradicional, VH13[®], com os aços ferramentas contendo menores teores percentuais em composição dos elementos de ligas como os aços de nomenclatura comercial TENAX 300[®] (baixo Si), VHSUPER[®] (alto Mo e baixo Cr).

A metodologia utilizada foi a comparação entre a característica de dureza e tenacidade do material de amostras tratadas em laboratório com as tratadas por processo de tratamento térmico industrial.

A despeito da enorme variedade de operações de ferramentas há algumas propriedades básicas dos materiais para ferramentas que governam o desempenho nas aplicações. Estas propriedades são a tenacidade, o que impede a fratura instantânea da ferramenta e a dureza a qual deve ser suficientemente elevada para evitar a deformação plástica e desgaste (LESKOVSEK; SUSTARSIC; JUTRISA, 2006).

As amostras dos aços ferramentas estudadas foram tratadas através de experimentos em laboratório nos processos de tempera e revenimento em condições pré-determinadas com o objetivo do levantamento das características de dureza e tenacidade. As medições foram realizadas por testes em durômetro e charpy e análises de imagens por microscopia eletrônica de varredura MEV.

Já para a obtenção das amostras da ferramenta com tratamento térmico por processo industrial foram cortados corpos de provas das regiões superficiais e do núcleo da ferramenta.

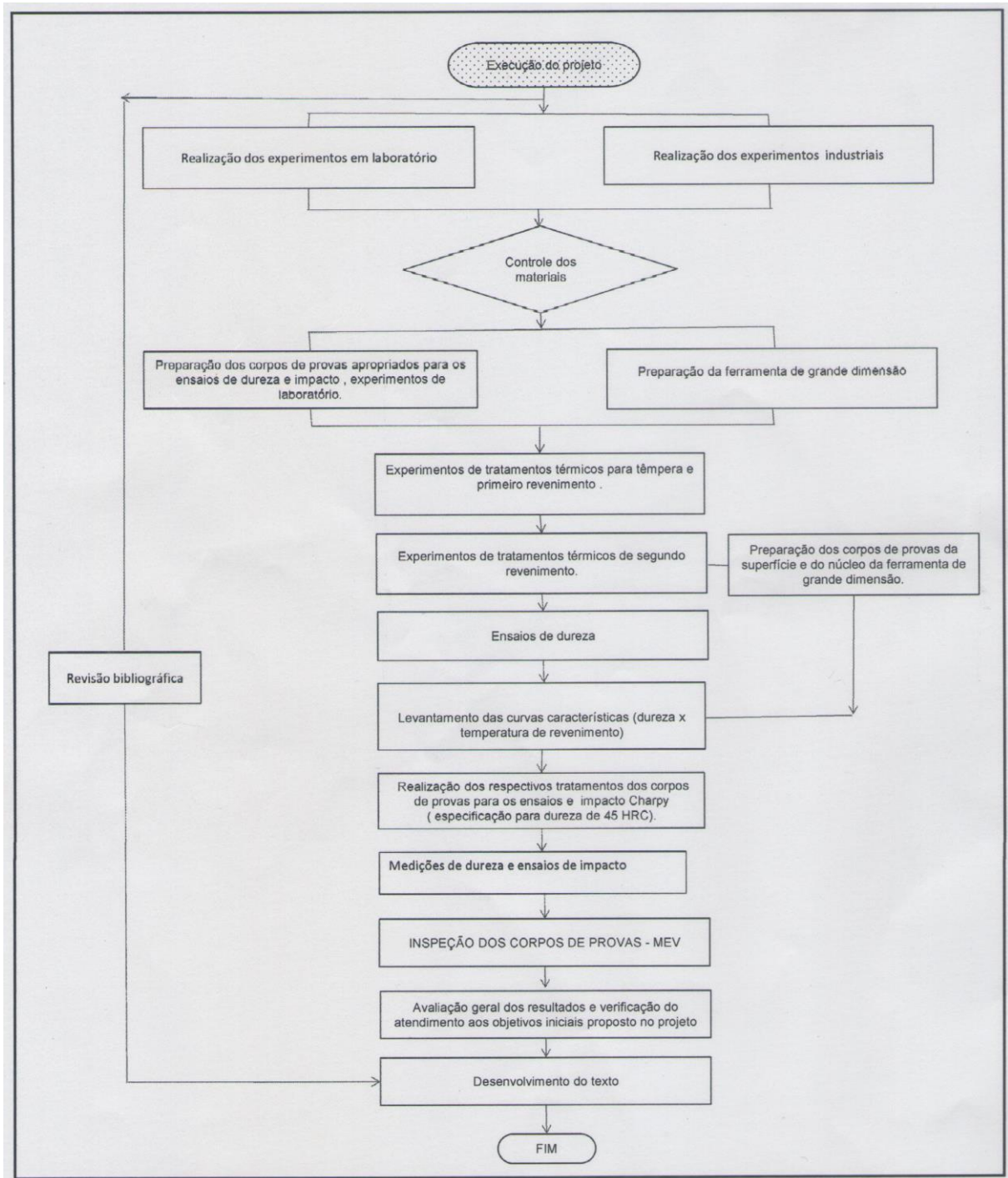
3.3 PREPARATIVOS PRELIMINARES

- Elaboração do plano de trabalho no qual foram colocados, por meio de um cronograma, as atividades, processos, características de controles e prazos.
- Elaboração da documentação para registros dos experimentos.
- Definições e treinamentos dos métodos de trabalho para as várias atividades laboratoriais.

3.3.1 Etapas dos experimentos de laboratório

A Figura 7 Apresenta de maneira sintética as etapas que foram seguidas para o desenvolvimento deste trabalho.

Figura 7 – Fluxograma sintético do desenvolvimento deste trabalho



3.3.2 Preparação dos fornos: adaptações dos equipamentos para os experimentos

As condições de estabilidade da temperatura durante o tratamento térmico são de fundamental importância para que as características mecânicas e metalográficas do aço a ser tratado sejam obtidas. Essa estabilidade deve ser entendida como valores das temperaturas medidas correspondendo àquela da especificação. A região do forno escolhida para se colocar o corpo de prova deve ter uma estabilidade tal que o sistema de controle automático de temperatura do forno não provoque flutuações significativas da temperatura em torno da média estabelecida.

Visando minimizar os efeitos de flutuação da temperatura, os corpos de provas foram colocados na parte central da câmara do forno e o termopar o mais próximo possível do corpo de prova.

As condições de aquecimento do forno e a estabilização da temperatura de austenitização devem ser controladas durante o tempo estabelecido. Para isso, foi realizada a calibração dos fornos e dos instrumentos de medições. Foi construída uma sonda de aço semelhante às amostras de ensaios, porém com um furo central para a colocação da ponta de um termopar, para garantir que a temperatura a ser medida seja a mais próxima possível das amostras que estão sendo submetidas ao ensaio.

As condições construtivas dos fornos para os tratamentos térmicos das amostras foram alteradas, adaptando-se uma porta com uma abertura menor possível, para a colocação e retirada das amostras, permitindo também a inserção do termopar o mais próximo possível da amostra. Aspectos das portas utilizadas nos fornos são mostrados nas Figuras f, g e h, no apêndice.

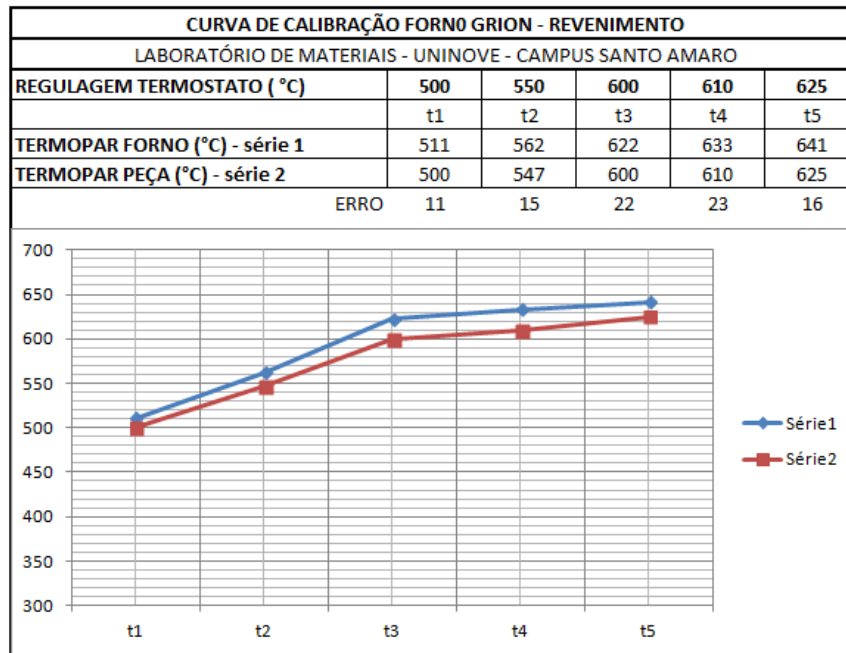
O resfriamento das amostras foi em água a temperatura ambiente, com tempo de mergulho do corpo de prova em torno de três segundos.

3.3.3 Calibração dos instrumentos de medição e controle

Constatou-se que a temperatura dos fornos não é homogênea em sua câmara de tratamento. A leitura do termopar do forno não corresponde exatamente

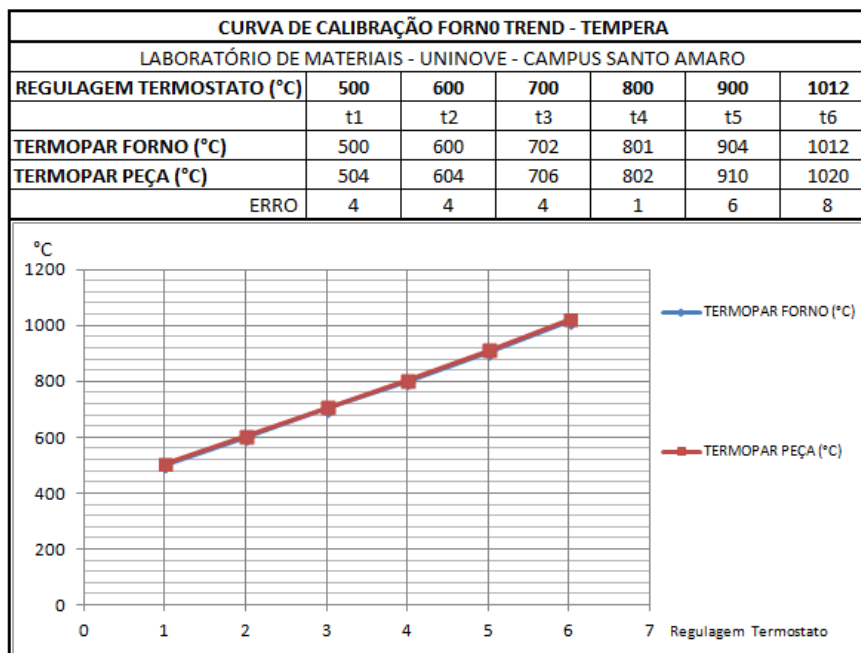
com a temperatura no centro da câmara. Para corrigir esse erro foram levantadas as curvas de aquecimento dos fornos e determinados os erros existentes entre a medição do termopar do forno e o termopar colocado na região de posicionamento das amostras para tratamento. Os resultados são mostrados nas Figuras 8 e 9.

Figura 8 – Curva de calibração do forno Grion



Fonte: o autor

Figura 9 – Curva de calibração do forno Metal Trend



Fonte: o autor

3.4 AMOSTRAS

Para a preparação dos corpos de provas para os ensaios de tratamento térmico de têmpera e revenimento foram confeccionadas 10 (dez) amostras com as dimensões 15x18x27mm para cada tipo de aço. Essas amostras foram convenientemente identificadas, com chanfros, para permitir rastreabilidade dos resultados dos ensaios como mostrado na Figura 10.

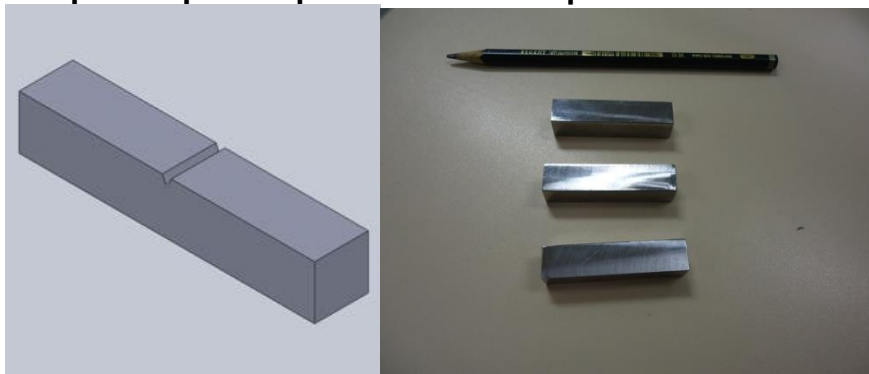
Figura 10 – Corpos de provas para tratamento térmico em laboratório



Nota: Amostras com medições 15 x 20 x 28 mm – chanfros nas quinas usados como identificação.
Fonte: o autor

Na preparação dos corpos de prova para os ensaios de impacto por Pêndulo Charpy – para a avaliação da tenacidade, foi seguida a norma ABNT NBR NM 281-1:2003. Foram preparados 10 (dez) corpos de provas com as dimensões de 12x12x55 mm, conforme mostrado na Figura 11, para cada um dos tipos de aço. Essas amostras foram devidamente identificadas, para permitir rastreabilidade dos resultados dos ensaios.

Figura 11 – Corpos de provas para ensaio de impacto



Nota: Amostras para ensaio Charpy V (10 x 10 x 55mm)
Fonte: o autor

Na obtenção dos corpos de provas dos tratamentos térmicos em condições industriais foi necessária a construção de uma ferramenta de grandes dimensões que representasse condições reais nos processos e condições industriais, conforme mostrado nas Figuras 12 e 13.

Importante enfatizar que este estudo de tratamento térmico de grandes massas de aços ferramenta visa entender condições típicas industriais, assim a empresa Villares Metals foi parceira do presente projeto, disponibilizando fornos industriais para os experimentos.

3.5 MATERIAIS E CICLOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS

Para a realização dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento foram confeccionadas 9 (nove) amostras, 3 (três) para cada um dos aços: VH13[®], VHSUPER[®] e TENAX 300[®]. A composição química deles é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição química nominal dos aços estudados

	C	Si	Mn	P	S	Co	Cr	Mo	Ni	V	W	Cu	Al
VH13	0,410	0,920	0,310	0,023	0,001	0,030	5,050	1,210	0,280	0,830	0,080	0,04	0,017
VHSUPER	0,370	0,220	0,250	0,010	0,000	0,020	3,850	2,480	0,070	0,510	0,020	0,040	0,006
TENAX 300	0,350	0,250	0,250	0,010	0,001	0,020	5,000	1,300	0,210	0,370	0,020	0,040	0,011

resultados das análises químicas das amostras estudadas - composição % em peso e balanço em ferro.

Fonte: o autor

Os parâmetros escolhidos para temperatura e tempo no processo de tratamento térmico de têmpera foram 1020°C durante o tempo de 45 minutos e com o tempo em torno de 3 (três) segundos da retirada da amostra do forno até o mergulho em água a temperatura ambiente. Esses valores também estão referenciados no artigo de (LESKOVSEK, SUSTARSIC; JUTRISA, 2006) como ideais. Após a realização do tratamento de têmpera foi executado o tratamento térmico de revenimento que foi feito em duas etapas, cada qual com a duração de 135 minutos na temperatura especificada, seguido de resfriamento em temperatura ambiente. As temperaturas selecionadas como suficientes para o levantamento da curva Dureza X Temperatura de revenimento foram 300°C, 400°C, 500°C, 550°C, 600°C, 625°C, 650°C e 700°C. Depois de concluído o tratamento de revenimento a amostra de cada tipo de aço foi colocada no equipamento polimetrix, que permite o

lixar e também refrigera a amostra com água, isso se faz necessário para retirar 1,0 mm de material da superfície, material esse constituído superficialmente de carepa (óxido de ferro) e após isso efetuada a medição da dureza (QUAMAR; SIDDIQUI; PERVEZ, 2009). A característica de controle desses tratamentos foi à medição da dureza HRC das amostras. Para isso foram feitas 5 (cinco) medições de dureza, isso para ter dado estatístico do tratamento na amostra.

Para o ensaio de impacto por pêndulo Charpy, o procedimento utilizado foi o estabelecido pela norma ABNT NBR NM 281-2-2003.

Para os ensaios de impacto foram confeccionadas 27 amostras, provenientes do mesmo lote dos aços especiais. Essas amostras foram submetidas aos mesmos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento sendo cada qual na sua temperatura especificada. As amostras foram submetidas ao ensaio de impacto Charpy conforme procedimento específico para ensaios de impacto Charpy.

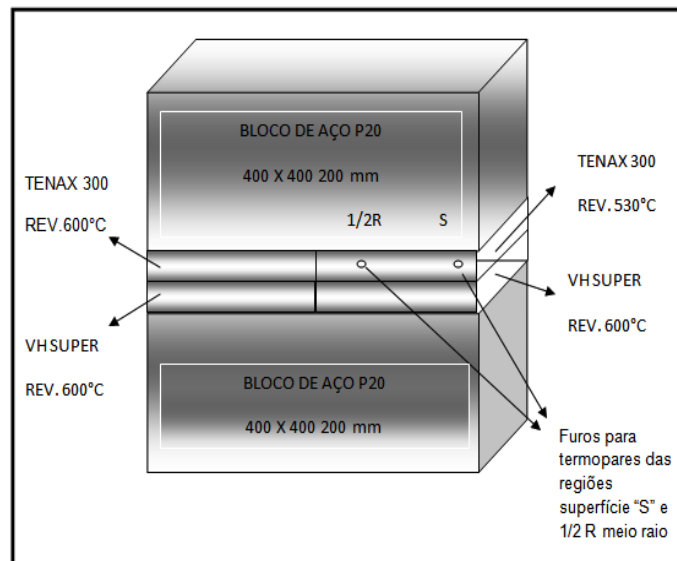
3.6 EXPERIMENTOS INDUSTRIAIS

Como mencionado, a avaliação das características e propriedades mecânicas do aço das ferramentas industriais é importante para o controle da qualidade das mesmas, porém na maioria dos casos isso é impraticável ou inviável em termos de custos envolvidos para o controle, sendo feito apenas a medição da dureza do aço na superfície. Para permitir o controle das características e propriedades mecânicas de amostras retiradas do núcleo da ferramenta foi construída uma ferramenta equivalente ao mostrado na Figura 12. Nela foram montadas segmentos de placas dos aços (VH13[®], VHSUPER[®], TENAX 300[®]) como inserção de peças no interior de outras peças na superfície possibilitando assim o desmonte após a realização dos tratamentos térmicos permitindo a medição das propriedades (dureza e tenacidade) dos materiais que foram tirados do núcleo e da superfície da ferramenta, Figura 13.

A ferramenta industrial após o tratamento de têmpera foi submetida a um tratamento térmico de revenimento a 600°C. Isso se fez necessário, pois o intervalo de tempo do tratamento térmico de têmpera para o início do revenimento deve ser o mais curto possível. Os demais revenimentos foram feitos em fornos de laboratório, para permitir o ajuste da temperatura das amostras ao valor necessário para possibilitar a dureza das amostras em torno de 45,0 HRC.

Procurou-se manter as condições de tratamento térmico das peças em laboratório o mais próximo possível da industrial, com exceção do tempo de aquecimento e do tempo em temperatura de austenitização que foi maior para as amostras em laboratório. Por exemplo, na condição industrial o tempo no patamar de austenitização foi cerca de uma hora, enquanto a do laboratório foi de 45 minutos. Isto foi realizado para manter a prática industrial, objeto de estudo do presente trabalho. No processo de têmpera, o material do conjunto mostrado na Figura 19 foi resfriado com gás nitrogênio a 6 bares de pressão, sendo monitorada a temperatura em função do tempo de resfriamento, conforme mostrados nas Figuras 14 e 15.

Figura 12 – Modelo para simular uma ferramenta industrial



FORNTE: MESQUITA 2010

Figura 13 – Ferramenta tratada em forno industrial



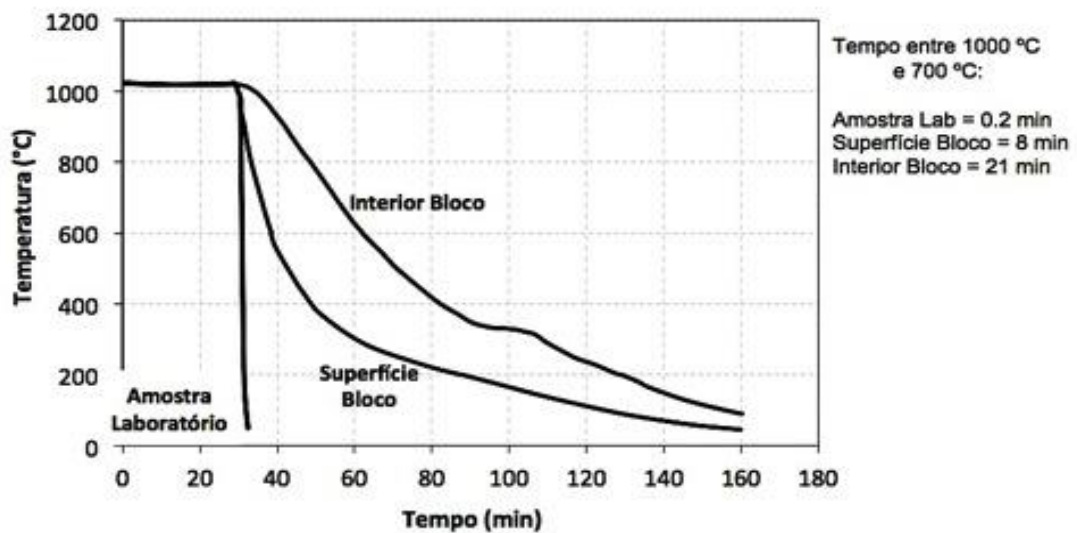
Figura 14 – Posicionamento dos termopares na ferramenta industrial



Fonte: MESQUITA (2010, p. 11)

Figura 15 – Curva de resfriamento obtida para as duas regiões (superfície e interior) das placas de aço ferramenta tratadas entre blocos de aço P20 (baixa liga)

A região sensível à precipitação de carbonetos em contornos de grão é entre 1000°C e 700°C. Na legenda do lado esquerdo da figura tem-se os tempos decorrido no resfriamento de 1000 °C a 700 °C, regiões da ferramenta, e neste intervalo que ocorre a fragilização do material.



Fonte: MESQUITA (2010, p. 11)

A avaliação deve ser em condições efetivamente equivalentes, as matrizes industriais. Porém na maioria dos casos, isto pode ser impraticável ou inviável em termos de custos envolvidos para o controle levando-se em consideração apenas o valor do aço ferramenta utilizado. Sendo assim, condições equivalentes, como inserção de peças no interior de outras peças pode ser empregada como mostrado na Figura 12.

Conforme mostrado, a ferramenta foi construída com segmento de blocos dos aços ferramentas objeto do estudo. Esses blocos foram montados de modo a obter amostras das regiões superficiais e do núcleo da ferramenta tratada.

Para estudar este efeito, foram planejados experimentos com aços ferramenta para trabalho a quente.

A grande dificuldade com o experimento industrial foi cortar os corpos de prova do material temperado (dureza alta), após os experimentos em grandes massas. Assim, utilizou-se a proposta conforme Mesquita (2010, p. 11), que consiste em inserir corpos de prova de secção retangulares aglutinados com placas entre blocos de maiores dimensão de aço baixa liga. Esta abordagem é chamada de “sanduíche”. Termopares foram colocados nas regiões próximas às amostras, medindo a taxa de resfriamento.

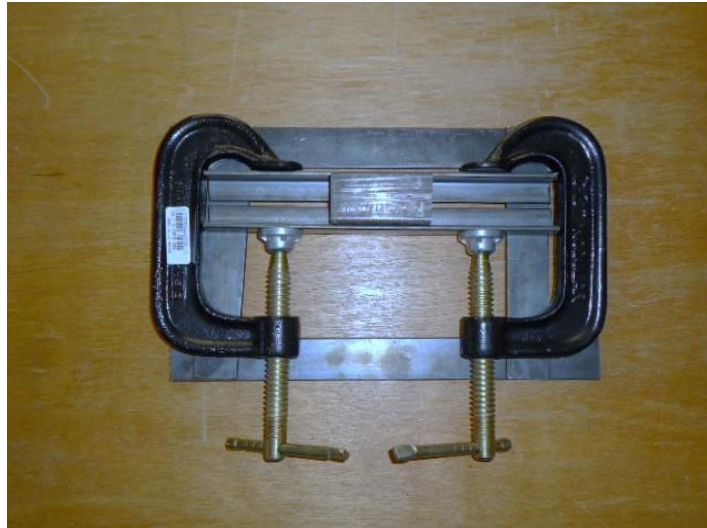
Na preparação das amostras obtidas da ferramenta industrial foi necessário desenvolver um dispositivo, conforme mostrado na Figura 17, para possibilitar o corte de amostra pequena utilizando-se de um equipamento de corte por jato d’água Figura 16.

Figura 16 – Equipamento Flow para corte com jato d’água



Fonte: Perfer LTDA

Figura 17 – Dispositivo para permitir cortar amostras pequenas com jato d'água

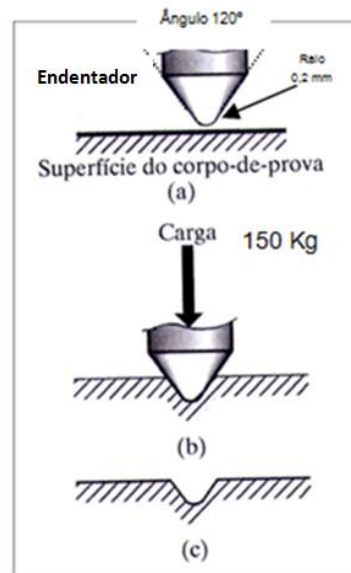


Fonte: o autor

3.7 MEDIÇÕES DE DUREZA

O ensaio de dureza está disponível como uma alternativa relativamente simples para o ensaio de tração. A resistência do material à penetração é uma indicação de sua resistência. O penetrador (endentador) pode ser arredondado ou pontiagudo e é feito de um material muito mais duro que o corpo-de-prova, nos ensaios foi utilizado ponteira de diamante com forma cônica com ângulo de abertura de 120° e raio da ponta de 0,2mm conforme esboço mostrado na Figura 18, nela temos a geometria do penetrador e a carga para a escala C (Rockwell) utilizada.

Figura 18 – Geometria do penetrador de diamante e as respectivas escalas Rockwell.



Fonte: adaptado de SHACKELFORD 2008.

A dureza Rockwell é bastante usada com escalas A, B e C disponíveis para diferentes intervalos de dureza. A correlação da dureza com a profundidade de penetração permite que o valor da dureza seja convenientemente apresentado em um mostrador ou visor digital.

As escala utilizada neste trabalho foi a Rockwell HRC. – com carga de 150 kg. Foram efetuadas 6 (seis) medições, para posterior tratamento estatístico, com a observação de se eliminar a primeira medição.

Ressalta-se a importância de manter as faces paralelas para controlar os erros no processo de medição. O desbaste foi executado em polimetrizes com lixas 80 e controle da lubrificação por jato de água. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ISO 6508-1:2008)

3.7.1 Procedimento para ensaio de dureza

Segundo a Norma ABNT ISO 6508-1:2008, que trata do Ensaio de Dureza, a escala C correspondente a 150 Kg para Materiais Metálicos, aplica-se uma força em duas etapas utilizando-se um penetrador de tamanho, forma e materiais especificados, na superfície de um corpo-de-prova, mede-se a profundidade de

penetração permanente h sob efeito da força de ensaio inicial após a remoção da força de ensaio adicional. A partir dos valores de h e das duas constantes N e S normatizadas é calculada a dureza de acordo com a fórmula:

$$\text{Dureza Rockwell} = N - h/S,$$

sendo: $N = 100$;

$S = 0,002$ mm;

h = profundidade de penetração permanente sob força de ensaio inicial, após a remoção da força de ensaio adicional.

O ensaio foi realizado no corpo de prova tendo uma superfície plana e lisa, isenta de camadas oxidadas. Foi necessário remover material dos corpos-de-prova porque ocorreu oxidação devido o processo de tratamento térmico. A preparação foi realizada de forma a minimizar qualquer alteração na dureza superficial, por exemplo, devido o aquecimento excessivo provocado pela abrasão utilizou-se equipamento polimetrix com lixa d'água NORTON 80, com jato de água contínuo.

Após o ensaio, foi realizada uma minuciosa inspeção visual para constatar a inexistência de deformações ou trincas.

Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente dentro dos limites entre 10°C a 35°C.

Foi observada a recomendação da norma que antes do início de uma série de ensaios ou quando se passar mais de 24h desde o último ensaio, e após cada mudança, ou remoção e reposição do penetrador ou do apoio do corpo-de-prova, deve ser assegurado que o penetrador e o apoio do corpo-de-prova estejam montados corretamente na máquina. As duas primeiras leituras após cada mudança foram descartadas.

O número da dureza Rockwell é derivado da profundidade de penetração h , utilizando a fórmula citada anteriormente, e lido diretamente na escala do aparelho.

A distância entre os centros de duas impressões adjacentes deve ser de pelo menos quatro vezes o diâmetro da impressão (embora não menor que 2,0 mm)

A distância desde o centro de qualquer impressão a uma borda do corpo-de-prova deve ser de pelo menos duas vezes e meia o diâmetro da impressão (embora não menor que 1,0 mm).

3.7.2 Calibração do equipamento de medição da dureza

A abordagem para a determinação da incerteza apresentada considerou apenas aquelas incertezas associadas ao desempenho geral em medição da máquina de ensaio de dureza em relação aos blocos de referência de dureza.

Tabela 4 – Resultados da verificação indireta da incerteza-padrão 67 HRC

Resultados da verificação indireta da incerteza	
<i>Número da medição</i>	<i>Valor de dureza medido HRC</i>
1	67,2
2	67,3
3	67,3
4	67,3
5	67,3
Valor médio - H	67,3
Desvio padrão – s	0,045
Incerteza- padrão – U	0,023
HRC- Dureza Rockwell – Equipamento:Wilson Instruments Nºsérie R547-00-0120 Padrão:Hardness Standart Test Block 09 – 66,97HRC- R0.2 – N°T72227	
Repetibilidade - r	0,1

Fonte: o autor, adaptado do manual Wilson Instrumentos

Tabela 5 – Resultados da verificação indireta da incerteza-padrão 44 HRC

Resultados da verificação indireta da incerteza	
<i>Número da medição</i>	<i>Valor de dureza medido HRC</i>
1	45,0
2	45,1
3	45,2
4	45,2
5	45,2
Valor médio – H	45,1
Desvio padrão – s	0,080
Incerteza –padrão – U	0,041
HRC- Dureza Rockwell – Equipamento: Wilson Instrumentos Nº série R574-00-0120 Padrão: Hardness standard Test Block 12 – 44,43 HRC Nº P93923	
Repetibilidade r	0,2

Fonte: o autor, adaptado do Manual Wison Instrumentos.

Para a determinação da incerteza aplicou-se a equação $U = (t \times s) / \sqrt{n}$ (a), sendo (s) o desvio padrão e $t = 1,14$, $n=5$ constantes. Obtiveram-se os valores de 0,022 para o padrão 67 HRC e 0,041 para o padrão 45 HRC, portanto aprovadas.

A verificação e calibração do equipamento de ensaio de dureza Rockwell foram executadas conforme recomendação da norma ABNT NBR NM ISO 6508-2:2008

A verificação indireta foi feita a uma temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por meio de blocos de referência calibrados de acordo com a norma ISO NM ISO 6508-3:2005. O equipamento de ensaio foi verificado nas duas faixas de durezas alcançadas pelos corpos de provas. Sendo uma região a faixa de (35 a 55 HRC) e a outra faixa de (60 a 70 HRC).

Em cada bloco de referência, cinco impressões foram uniformemente distribuídas sobre a superfície de ensaio e cada número de dureza foi observado dentro de 0,2 de uma unidade de escala. Antes da realização destas impressões, foram feitas pelo menos duas impressões preliminares para garantir que a máquina estivesse operando livremente e que o bloco de referência, o penetrador e o batente estivessem assentados corretamente. Os resultados destas impressões preliminares devem ser ignorados.

Na determinação da repetibilidade para cada bloco de referência, sejam H1, H2, H3, H4, H5 os valores de dureza medida ordenados em ordem crescente de magnitude.

A repetibilidade “r” da máquina de ensaio, sob condições de verificação é determinada pela seguinte equação: $r = H_5 - H_1$.

O erro admissível “E” do equipamento de ensaio sob condições de verificação determinadas é expressa por meio da seguinte equação: $E = H - H_c$ (b)

Na qual H é o valor da média das medições de dureza e H_c é a dureza especificada do bloco padrão utilizado.

Os valores dos erros admissíveis obtidos pelos cálculos utilizando-se da equação (b) foram: 0,3 para o padrão 67 HRC e 1,1 para o padrão 44 HRC, e os valores da repetibilidade obtidos utilizando-se da equação (a) foram: 0,1 para o padrão 67 HRC e 0,2 para o padrão 44 HRC.

Uma vez que os valores encontrados estavam dentro dos valores especificados, para a escala C de dureza Rockwell para a faixa de dureza do bloco de referência de 20 a ≤ 70 especifica o erro admissível de $\pm 1,5$ HRC e a

repetitividade da máquina de ensaio $\leq 0,8$ unidade Rockwell, o equipamento foi aprovado para uso.

3.8 ENSAIOS DE IMPACTO

Na preparação dos corpos de provas das amostras tratadas em laboratório, os mesmos tiveram o tratamento térmico de revenimento nas respectivas temperaturas para que as durezas das amostras atingissem o valor de 45 HRC.

Isso feito para cada tipo de aço ferramenta estudado. Antes do duplo revenimento (135 minutos cada) as amostras foram submetidas ao tratamento térmico de têmpera a 1020°C por 45 minutos. Já para os corpos de prova retirados da ferramenta com tratamento térmico industrial, levantaram-se as curvas temperatura x dureza e delas obtiveram-se as temperaturas, que corresponde o valor de 45 HRC de dureza, para a realização do tratamento térmico de revenimento, isso para cada amostra dos aços ferramenta.

Essas condições são necessárias para garantir condições equivalentes para a comparação dos resultados.

Conforme norma ABNT NBR NM 281-1:2003, o ensaio consiste em romper, por meio de um golpe de um pêndulo oscilando, sob condições definidas a seguir:

Um corpo de prova dotado de um entalhe no centro e apoiado em suas extremidades. O entalhe especificado para os testes foi o “V” de 45°, com 2,0 mm de profundidade e raio de curvatura de 0,25mm na base do entalhe, como representado na Figura 19.

O corpo de prova foi padronizado em 55 mm de comprimento e seção quadrada com 10 mm de lado conforme tabela 2 da norma ABNT NM. 281.1.2003 que especifica tolerância das dimensões especifica dos corpos de prova com ajuste Js (eixo base).

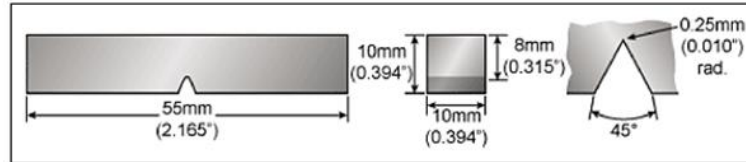
O corpo de prova foi totalmente usinado, com o plano de simetria do entalhe perpendicular ao eixo longitudinal do corpo de prova.

A tolerância das dimensões especificadas foi:

- comprimento 55mm +- 0,60 mm

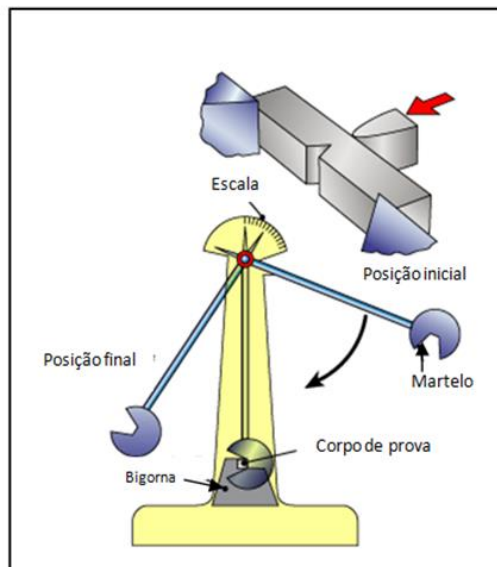
- altura 10mm \pm 0,06 mm
- ângulo de entalhe 45° \pm 2°

Figura 19– Corpo de prova ensaio Charpy – entalhe em V



A Figura 20 mostra um esquema do equipamento para ensaio de impacto Charpy, em que o martelo é liberado de uma altura adequada h e atinge e rompe o corpo de prova. A energia consumida na fratura é a diferença da energia potencia inicial e final.

Figura 20 – Esquema de equipamento para ensaio de impacto de um corpo de prova Charpy



Fonte: The Welding Institute – www.twi-global.com

Os resultados dos ensaios de impactos fornecem uma importante informação qualitativa e comparativa entre várias amostras de aços. Obtém-se o resultado da energia absorvida pelo corpo de prova e a possibilidade da realização de inspeção por microscopia eletrônica da superfície da falha. Esses dados servem de indicativo da natureza da fratura se dúctil (alta tenacidade) na qual a superfície apresenta-se

fibrosa com características de cisalhamento ou frágeis na qual possuem uma textura granular ou brilhosa com características de clivagem (CALLISTER, 2007).

3.9 AJUSTES PARA OS TESTES DE IMPACTO

Para a realização dos ensaios de impacto nos corpos de provas provenientes da ferramenta industrial seguiu-se o seguinte procedimento: i) Com a utilização das curvas (dureza x temperaturas de revenimentos) contidas nas Figuras 21 e 24, levantadas com base em amostras dos aços estudados, nos experimentos de laboratório e industrial, determinou-se a temperatura para realizar o segundo revenimento dos corpos de provas para que os aços adquirissem à dureza de 45 HRC.

ii) Os corpos de provas dos aços foram submetidos a um 2º tratamento térmico de revenimento nas respectivas temperaturas com duração de 135 minutos. Esses corpos de provas foram usinados por retífica plana para obterem-se as dimensões, tolerâncias e acabamento especificados em norma.

iii) Para que as amostras preparadas para os ensaios de impacto atingissem o valor de dureza o mais próximo de 45,0 HRC foram necessários a execução de vários tratamentos térmicos em amostras diferentes. Isso porque a correspondente temperatura para que o aço atingisse 45,0 HRC se encontra numa região da curva (dureza x temperatura de revenimento) com derivada alta, pequena variação da temperatura ocasiona grande incremento na dureza. Com esse procedimento por aproximação sucessiva obteve-se o melhor valor, possível, da temperatura de revenimento do corpo de prova.

Isso se fez necessário pois as tangentes das curvas tornam-se grandes na região de dureza 45 HRC, essa região de tratamento térmico dos aços é muito crítica, possibilitando erros na obtenção das características mecânicas do aço.

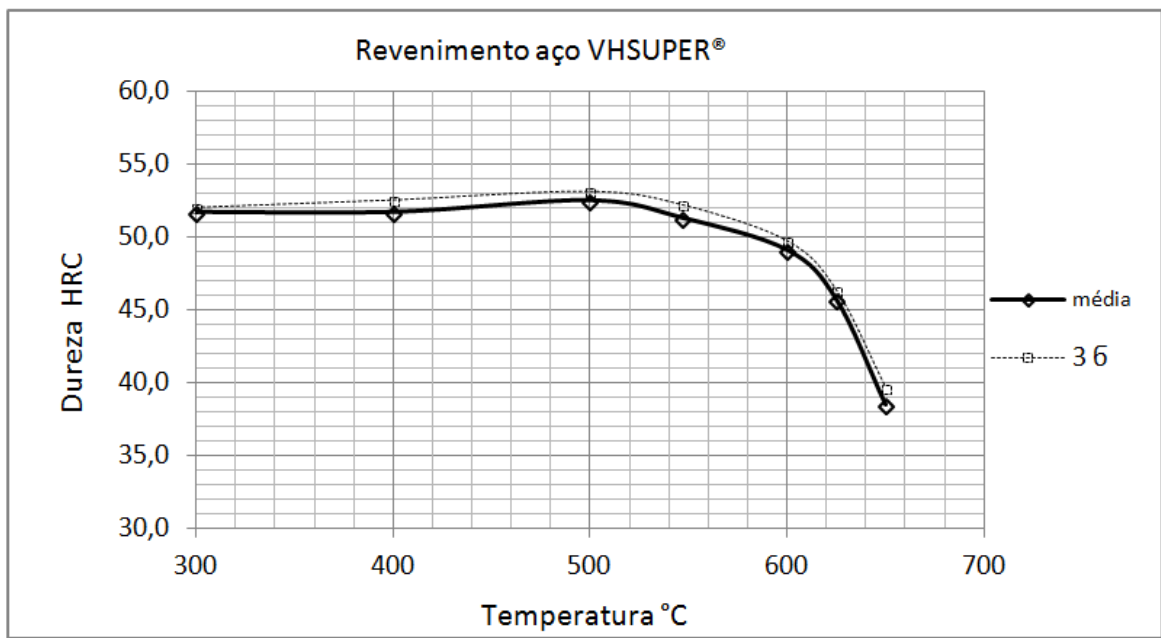
Ajustes finos na faixa de décimos de graus Celsius não foi possível devido ao controle discreto de temperatura dos fornos de tratamento térmico do laboratório, que possuem incrementos de 1,0 °C.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

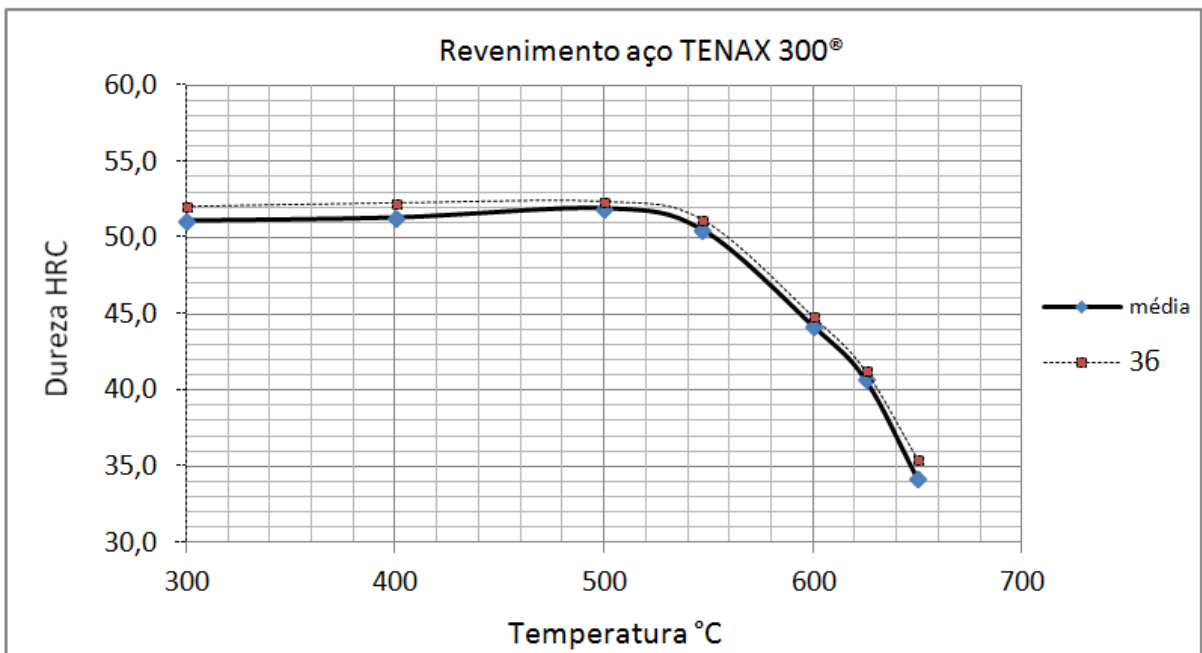
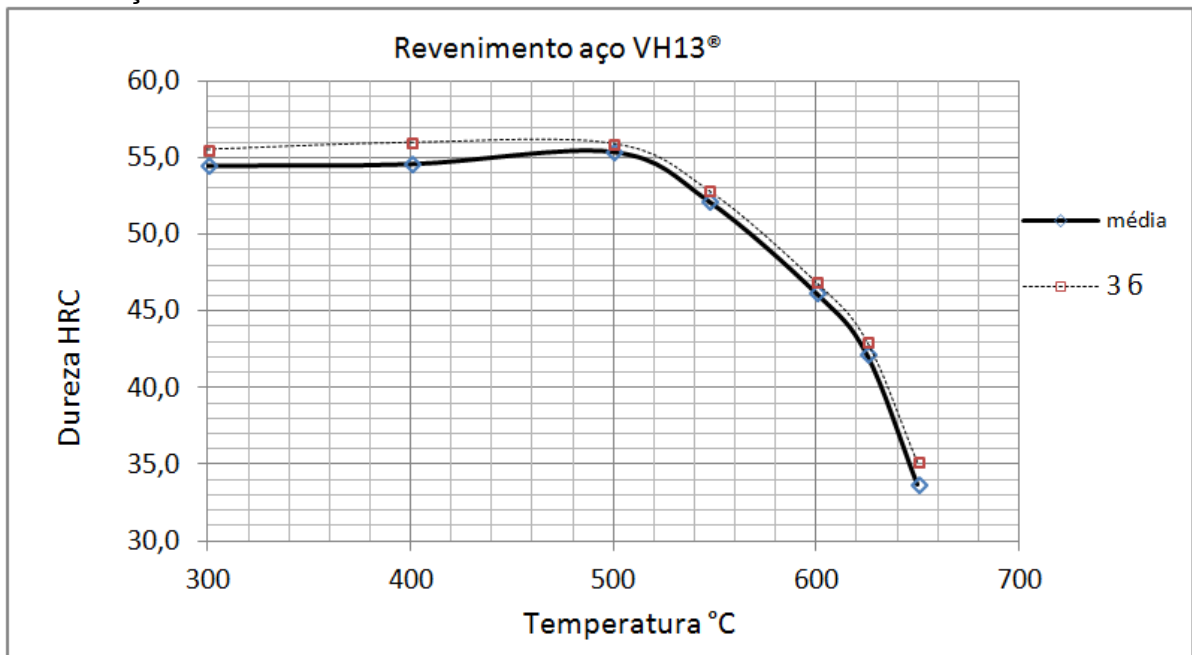
4.1 RESULTADOS E AVALIAÇÃO DOS EXPERIMENTOS DE TÊMPERA E REVENIMENTO REALIZADOS EM LABORATÓRIO

Os resultados de dureza dos experimentos dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento realizados nas amostras provenientes das placas dos aços ferramentas VH13[®], VHSUPER[®] e TENAX 300[®] foram elaborados os gráficos das características de dureza em função da temperatura de revenimento como mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Gráfico da temperatura do revenimento em função da dureza alcançada pelas amostras dos aços, tratamento em laboratório



Continuação



Fonte: o autor

Os resultados obtidos comparados com os publicados pelo fabricante dos aços, empresa Villares Metals®, indica uma boa prática experimental desenvolvida no laboratório, o que validou os processos utilizados no tratamento térmico das amostras isso possibilitou o prosseguimento do estudo com segurança.

Essas amostras foram submetidas a tratamentos térmicos de tempera e revenimentos em laboratório. Os resultados de impacto mostrados na Tabela 8

serão importantes quando da comparação dos resultados obtidos das amostras retiradas da ferramenta com tratamento térmico por processo industrial.

Tabela 6 – Resultados dos testes de impacto, método Charpy V, amostras com tratamento térmico em laboratório

Aço VH13 [®]					
Amostras	1	2	3	Média	D.Padrão
Temperatura de revenimento	609°C				
Dureza- (HRC)	45,1	44,9	44,8	44,9	0,2
Impacto- (J)	22	22	20	21,3	1,2
Aço VHSUPER [®]					
Amostras	1	2	3	Média	D.Padrão
Temperatura de revenimento	630 °C				
Dureza- (HRC)	44,4	44,6	44,7	44,6	0,2
Impacto- (J)	22	20	22	21,3	1,2
Aço TENAX 300 [®]					
Amostras	1	2	3	Média	D.Padrão
Temperatura de revenimento	605 °C				
Dureza- (HRC)	45,5	44,5	44,9	45,1	0,5
Impacto- (J)	44	42	50	45,3	4,2

Fonte: O autor

O experimento para o tratamento térmico de revenimento das amostras se ateve a dureza. Com o auxílio dos gráficos da Figura 24 obtêm-se os valores das temperaturas dos aços que correspondem à dureza em torno do valor de 45 HRC no ensaio de revenimento. As temperaturas escolhidas foram números inteiros tendo em vista o ajuste dos fornos de tratamento térmico.

4.2 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COM TRATAMENTOS TÉRMICOS POR PROCESSO INDUSTRIAL.

Os resultados de dureza dos aços ferramentas utilizados nos experimentos com tratamentos térmicos por processo industrial são mostrados na Tabela 9.

Constata-se uma tênue diminuição das durezas dos aços nas regiões do núcleo da ferramenta com relação a da superfície.

Na Figura 29 são mostrados os valores das durezas após a realização do primeiro revenimento.

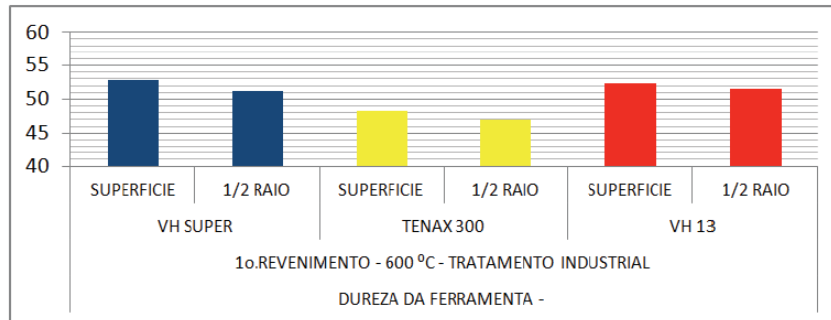
Tabela 7 – Resultados dos experimentos do 2º revenimento das amostras retiradas da ferramenta industrial das regiões superficial e núcleo – Laboratório Materiais UNINOVE

UNINOVE - UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO										
LABORATÓRIO DE MATERIAIS CAMPUS SANTO AMARO										
RESULTADOS DOS ENSAIOS DO 2º REVENIMENTO - 135 minutos- aços ferramentas tratamento térmico industrial										
AÇOS FERRAMENTAS PERTENCENTES A FERRAMENTA COM TRATAMENTO TÉRMICO INDUSTRIAL										
Executado: Renato Logiudice, - 2013- controlado : Dr.Prof. Rafael Agnelli Mesquita										
ponto	temperatura °C	AMOSTRA	IDENT.	DUREZA HRC					MÉDIA	D.PADRÃO
superfície DA FERRAMENTA	550	VH-SUPER	A1	53,1	52,2	53,7	52,8	54,2	53,0	0,78
	550	TENAX 300	B1	48,2	48,6	48,8	48,5	48,6	48,4	0,28
	550	VH13	C1	51,1	51,2	50,7	51,5	51,0	51,3	0,07
1/2 RAI0 DA FERRAMENTA	550	VH-SUPER	A2	52,1	52,4	52,5	52,4	52,6	52,3	0,35
	550	TENAX 300	B2	48,7	48,1	48,0	48,2	48,6	48,5	0,07
	550	VH13	C2	51,3	52,2	51,9	51,1	51,6	51,2	0,21
superfície DA FERRAMENTA	600	VH-SUPER	A3	52,1	51,9	51,8	51,6	51,8	51,9	0,21
	600	TENAX 300	B3	46,1	46,3	46,5	46,3	46,1	46,2	0,00
	600	VH13	C3	45,8	45,1	45,0	45,5	45,6	45,7	0,14
1/2 RAI0 DA FERRAMENTA	600	VH-SUPER	A4	51,6	51,9	51,8	51,8	52,0	51,7	0,28
	600	TENAX 300	B4	45,6	45,6	45,5	45,5	45,0	45,6	0,42
	600	VH13	C4	45,4	44,9	44,0	45,1	46,2	45,3	0,57
superfície DA FERRAMENTA	625	VH-SUPER	A5	51,5	50,8	50,8	51,4	50,9	51,5	0,42
	625	TENAX 300	B5	40,1	40,5	40,6	39,8	40,8	40,0	0,49
	625	VH13	C5	40,3	40,3	40,7	40,8	40,7	40,6	0,28
1/2 RAI0 DA FERRAMENTA	625	VH-SUPER	A6	49,7	50,3	50,1	49,8	50,3	49,8	0,42
	625	TENAX 300	B6	40,6	40,5	40,6	40,6	40,5	40,6	0,07
	625	VH13	C6	40,0	40,5	40,0	40,3	39,9	40,2	0,07

Fonte: o autor

Figura 22 – Resultados das medições de dureza das amostras de aços retiradas da ferramenta industrial após a realização do 1º revenimento

DUREZA DA FERRAMENTA -					
1o.REVENIMENTO - 600 °C - TRATAMENTO INDUSTRIAL					
VH SUPER		TENAX 300		VH 13	
SUPERFICIE	1/2 RAI0	SUPERFICIE	1/2 RAI0	SUPERFICIE	1/2 RAI0
53,1	51,1	48,4	46,9	52,3	51,7



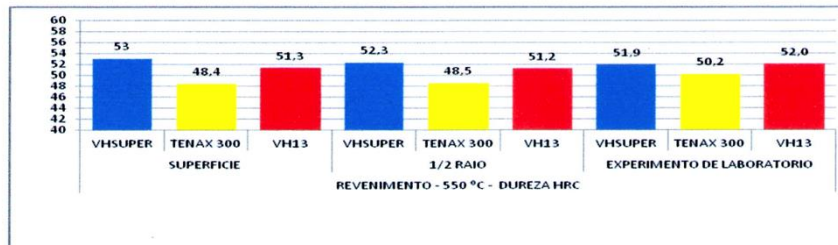
Fonte: o autor

Amostras dos aços ferramentas que constituíam a ferramenta industrial foram transformadas em corpos de provas convenientes e submetidas, em laboratório, a um segundo revenimento com tempo de duração de 135 minutos.

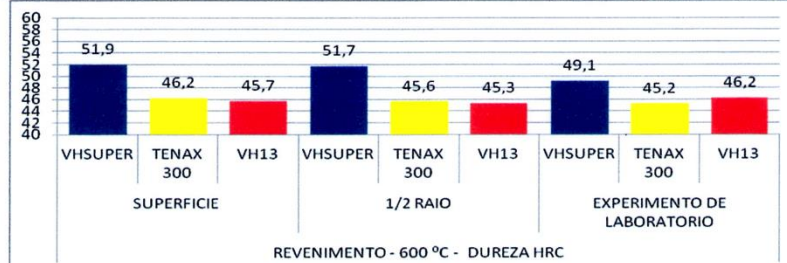
Colocando-se num gráfico de barras os valores das durezas obtidas nas regiões da superfície e do núcleo da ferramenta possibilita a melhor visualização das diferenças encontradas como mostradas na Figura 30.

Figura 23 – Resultados de dureza das amostras retiradas da ferramenta industrial – e tratadas num 2º Revenimento nas temperaturas de 550°C, 600°C e 625°C

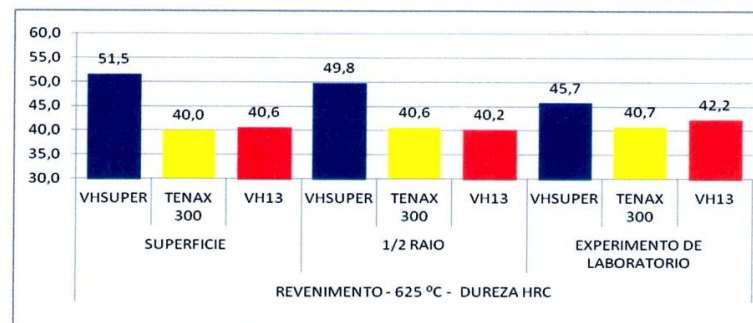
REVENIMENTO - 550 °C - DUREZA HRC								
SUPERFICIE			1/2 RAI0			EXPERIMENTO DE LABORATORIO		
VHSUPER	TENAX 300	VH13	VHSUPER	TENAX 300	VH13	VHSUPER	TENAX 300	VH13
53	48,4	51,3	52,3	48,5	51,2	51,9	50,2	52,0



REVENIMENTO - 600 °C - DUREZA HRC								
SUPERFICIE			1/2 RAI0			EXPERIMENTO DE LABORATORIO		
VHSUPER	TENAX 300	VH13	VHSUPER	TENAX 300	VH13	VHSUPER	TENAX 300	VH13
51,9	46,2	45,7	51,7	45,6	45,3	49,1	45,2	46,2

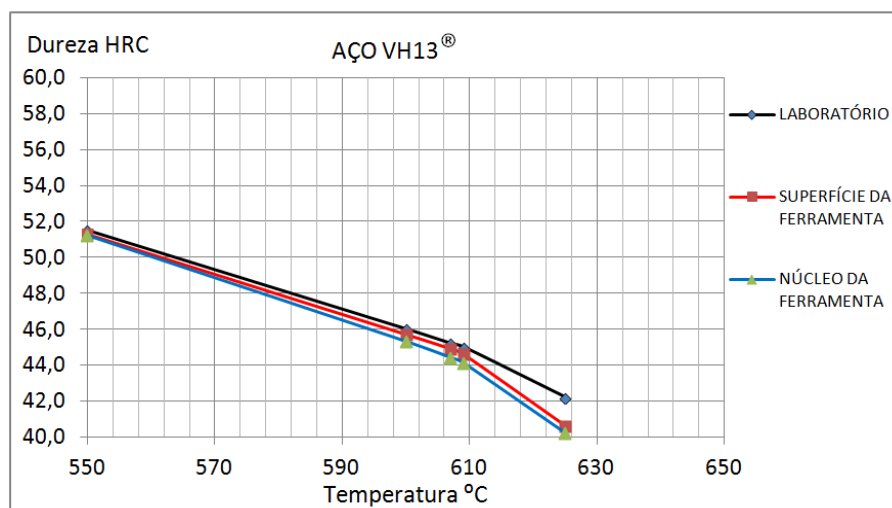
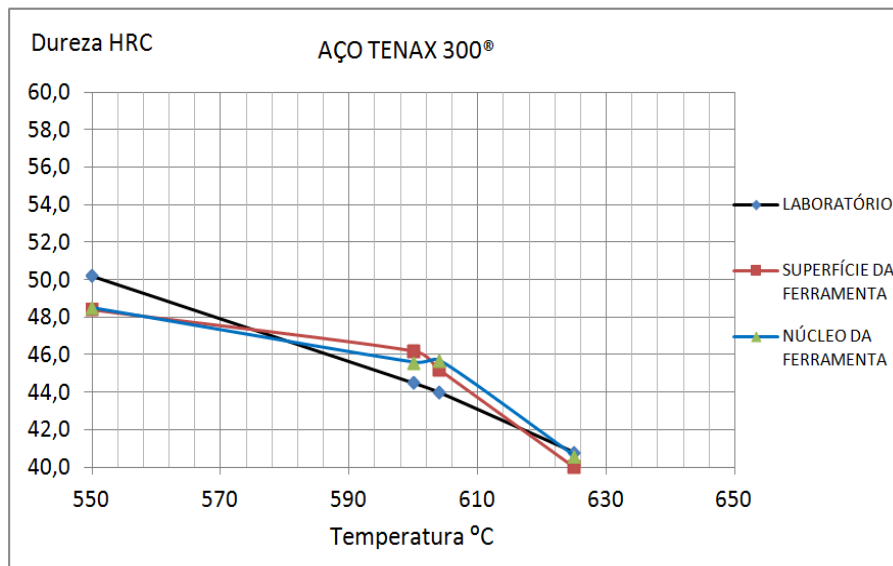
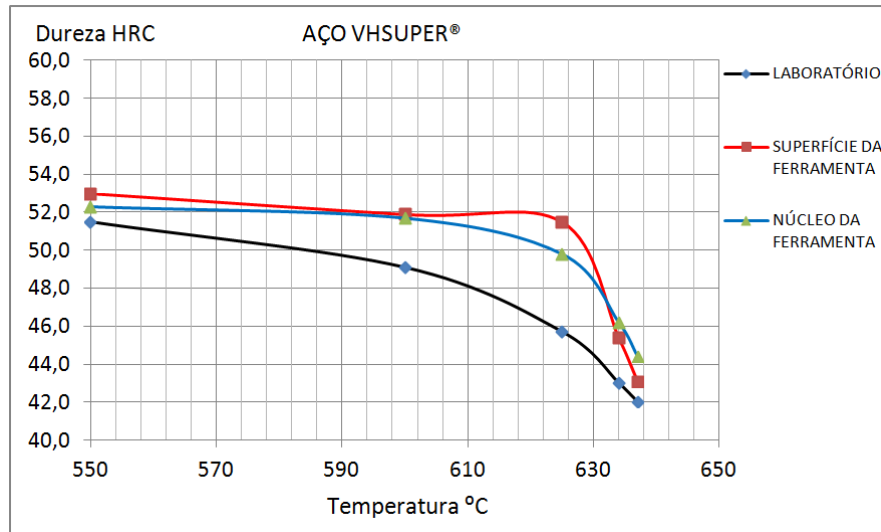


REVENIMENTO - 625 °C - DUREZA HRC								
SUPERFICIE			1/2 RAI0			EXPERIMENTO DE LABORATORIO		
VHSUPER	TENAX 300	VH13	VHSUPER	TENAX 300	VH13	VHSUPER	TENAX 300	VH13
51,5	40,0	40,6	49,8	40,6	40,2	45,7	40,7	42,2



Para facilitar a comparação dos valores de durezas das regiões do núcleo e da superfície da ferramenta com as das curvas obtidas em laboratório levantou-se os gráficos conforme mostrado o Figura 31.

Figura 24 – Dureza em função da temperatura de revenido para as amostras obtidas em laboratório e em blocos industriais nas regiões do núcleo e da superfície da ferramenta



Fonte: o autor

Estas curvas foram comparadas para as respostas ao revenimento dos materiais resfriados rapidamente, de modo a explicar a diferença de precipitação secundária e, portanto, de dureza de revenido. Por exemplo, o patamar notado no resfriamento das regiões do interior do bloco é típico de uma reação exotérmica de transformação de fase causada pela formação de bainita. Assim, é esperada a presença de bainita e, conseqüentemente, diferentes propriedades mecânicas das amostras resfriadas rapidamente e do material resfriado em escala industrial.

Esta comparação foi realizada para os três aços, conforme mostra a Figura 24. Durezas ligeiramente mais baixas são obtidas para os aços VH13[®], e TENAX 300[®], entre 1 e 2 HRC, sendo provavelmente resultado de microconstituintes diferentes, ou seja, maior quantidade de bainita nas amostras industriais. Porém, para o aço VHSUPER[®], o resultado foi o inverso. Os resultados mostrados na Figura 24 para o aço VHSUPER[®] as durezas tanto na região do núcleo como da superfície do aço indicam que esse aço apresentou um comportamento diferente dos outros aços estudados. Inicialmente pensou-se que fosse erro, porém os resultados foram confirmados. Melhores avaliações deverão ser realizadas neste sentido, porém é possível especular que o maior tempo em temperatura de austenitização, da condição industrial em relação à amostra de laboratório, seja responsável por esta diferença: promovendo maior dissolução de carbonetos secundários e, assim, uma precipitação e conseqüente endurecimento mais intenso neste material.

Apesar das pequenas diferenças das durezas notadas na Figura 24, variações mais expressivas são notadas na tenacidade, comparando amostras de laboratório e amostras industriais, conforme resultados de análise de falhas de peças reais e nos obtidos nesse estudo. Neste sentido, as curvas do segundo revenimento Figura 24 foram utilizadas para determinar as temperaturas para os tratamentos térmicos do segundo revenimento dos corpos de provas das amostras retiradas da ferramenta industrial isso para a realização dos ensaios de impactos nas duas condições, tratamento de laboratório e o industriais. Para as amostras de laboratório os resultados são mostrados na Tabela 6.

Os resultados dos tratamentos térmicos de dureza e do ensaio de Charpy V, das amostras retiradas da ferramenta industrial, são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados do 2º revenimento e ensaio de Charpy V – ferramenta industrial

VH13 [®]					
Amostras retiradas da superfície da ferramenta					
Amostras	1	2	3	Média	D.Padrão
Temperatura do Revenimento	609°C				
Dureza (HRC)	44,4	44,9	44,6	44,6	0,3
Impacto (J)	16,9	16	8,2	13,7	4,8
VH13 [®]					
Amostras retiradas do núcleo da ferramenta					
Amostras	1	2	3	Média	D.Padrão
Temperatura do Revenimento (°C)	607°C				
Dureza (HRC)	44,7	44,5	44,1	44,4	0,3
Impacto (J)	7,9	9	8,4	8,4	0,6
Aço VHSUPER [®]					
Amostras retiradas da superfície da ferramenta					
Amostras	1	2	3	Média	D.Padrão
Temperatura do Revenimento	634 °C				
Dureza (HRC)	46,7	44,5	45	45,4	1,2
Impacto (J)	7,7	6,3	12	8,7	3,0
Aço VHSUPER [®]					
Amostras retiradas do núcleo da ferramenta					
Amostras	1	2	3	Média	D.Padrão
Temperatura do Revenimento	637°C				
Dureza (HRC)	44,7	44,5	43,9	44,4	0,4
Impacto (J)	5,6	6,1	5,4	5,7	0,4
Aço TENAX 300 [®]					
Amostras retiradas da superfície da ferramenta					
Amostras	1	2	3	Média	D.Padrão
Temperatura do Revenimento	604°C				
Dureza (HRC)	45,2	44,8	45,5	45,3	0,4
Impacto (J)	16,2	15,4	11,1	14,2	2,7
Aço TENAX 300 [®]					
Amostras retiradas do núcleo da ferramenta					
Amostras	1	2	3	Média	D.Padrão
Temperatura do Revenimento	604°C				
Dureza (HRC)	45,5	45,8	44,8	45,4	0,5
Impacto (J)	10,1	15,4	15,4	13,6	3,1

Fonte: o autor

Tabela 9 – Comparação da diminuição da tenacidade nas regiões da superfície e núcleo da ferramenta tratada por processo industrial com relação ao valor da tenacidade dos aços com tratamentos térmicos em laboratório

Aço Ferramenta	Amostra	Impacto (J/cm ²)	Razão=Tenacidade posição / Tenacidade Laboratório
VH13 [®]	LABORATÓRIO	21,3	1,00
VH13 [®]	SUPERFÍCIE *	13,7	0,64
VH13 [®]	NÚCLEO *	8,4	0,49
VHSUPER [®]	LABORATÓRIO	21,3	1,00
VHSUPER [®]	SUPERFÍCIE*	8,7	0,41
VHSUPER [®]	NÚCLEO*	5,7	0,27
TENAX 300 [®]	LABORATÓRIO	45,3	1,00
TENAX 300 [®]	SUPERFÍCIE*	14,2	0,31
TENAX 300 [®]	NÚCLEO*	13,6	0,30

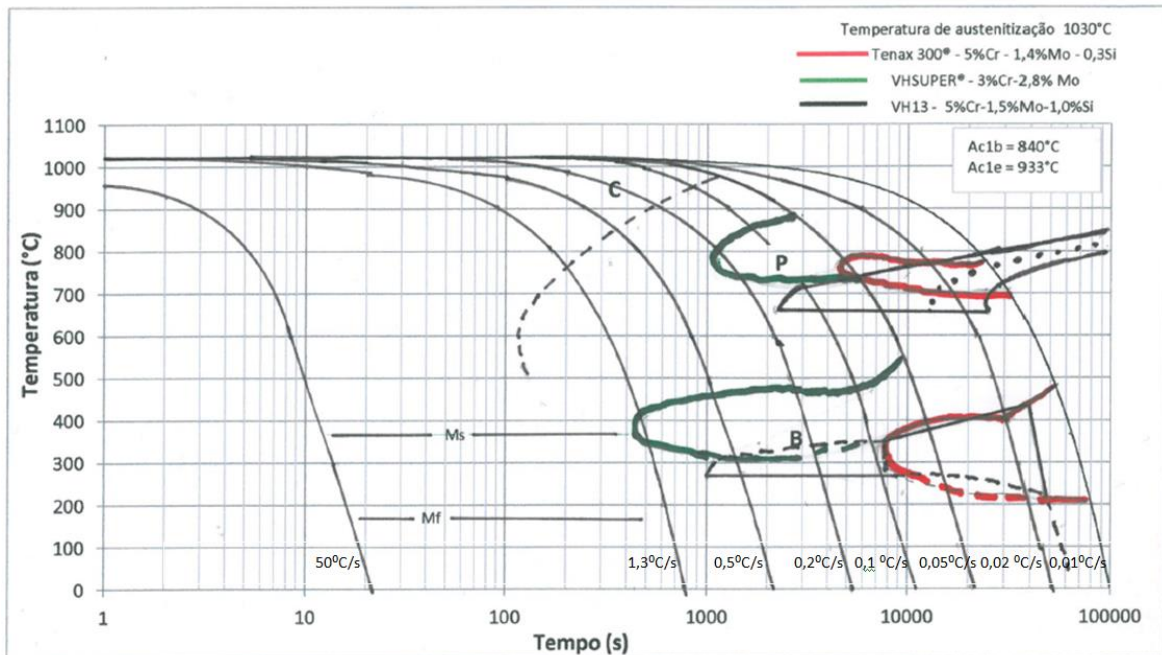
*Amostra da ferramenta tratada por processo industrial

Pelos resultados mostrados nas tabelas anteriores, algumas observações importantes podem ser feitas:

Existe uma queda expressiva da tenacidade para as regiões do núcleo e também da superfície da peça de grandes dimensões, que simula uma ferramenta real, e para as amostras de laboratório: os valores no núcleo da ferramenta são menores que a metade - fator de redução para 0,30 a 0,40 como mostra a Tabela 10.

Aparentemente, a redução é maior nos novos aços (TENAX 300[®] e VHSUPER[®]) em relação ao aço convencional H13. O que estes aços possuem de diferente é um menor teor de Si no TENAX 300[®] e também Cr no caso do VHSUPER, o que parece acelerar a redução da tenacidade. A diferença destes materiais, em relação ao H13, está na curva TRC, apresentada esquematicamente na Figura 6 e que é plotada de maneira sobreposta na Figura 25 abaixo.

Figura 25 – Curva TRC sobreposta dos aços VH13® VHSUPER® e TENAX 300®.



Fonte: Adaptado de (ROBERTS; KRAUSS; KENNEDY, 1998) – VILLARES METALS.

4.3 SEPARAÇÕES DAS CONTRIBUIÇÕES DA BAINITA E PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS EM CONTORNOS DE GRÃOS NA FRAGILIZAÇÃO DO AÇO.

Comparando as curvas da Figura 25, observa-se (como mencionado na revisão da literatura) que o resfriamento lento afeta basicamente dois microconstituintes: i) pode promover a precipitação de carbonetos em contornos de grão, região C da curva; ii) pode causar a presença ou aumento na quantidade de bainita, região B da curva. Desta forma, testes específicos foram realizados na Upper Áustria University of Applied Sciences, na Áustria, parceira da UNINOVE e com um laboratório específico para a área de materiais. As condições de tratamento térmico de têmpera foram realizadas em equipamentos de laboratório, que permite controlar as condições de resfriamento das amostras. Os parâmetros de têmpera para as condições de tratamento em laboratório foram: temperatura 1020°C – 30 minutos – com taxa de resfriamento 5,0°C/s, os de revenimento foram para o aço VH13 a temperatura de 610°C e taxa de resfriamento 1,0°C/s.

Para a simulação das condições de tratamento térmico industrial em laboratório foram escolhidos os parâmetros de têmpera 1020°C -30 minutos- com

taxa de resfriamento 0,2°C/s, os de revenimento e 610°C e taxa de resfriamento 1,0°C/s. Condições essas semelhantes às obtidas pela curva de resfriamento mostrada anteriormente na Figura 34.

Na Tabela 12 são mostrados os valores das energias obtidos nos ensaios de impactos para os aços VH13[®] e o VHSUPER[®]. A comparação com o experimento realizado no laboratório da UNINOVE é possível, pois os valores das durezas das amostras que foram submetidas ao ensaio de impacto estão em torno de 45 HRC. Ambos os laboratórios chegaram a resultados concordantes, mas a diferença obtida no H13 foi maior na comparação da peça industrial em relação à simulação da mesma.

Conforme ilustra a Figura 29, os testes de resfriamento lento e rápido foram divididos em etapas, para permitir separar os efeitos da formação de bainita e da precipitação de carbonetos. Os resultados obtidos mostram que o mecanismo mais forte de fragilização ocorre devido aos contornos por precipitação de carbonetos, praticamente não existindo efeito da bainita no aço H13. No aço VHSUPER[®], o efeito da precipitação de carbonetos continua sendo o mais relevante, porém ainda existe uma contribuição da formação de bainita. Sendo os menores teores dos elementos químicos Cr e Si silício presentes no aço VHSUPER[®] isso facilita a formação de bainita e, provavelmente, explica porque os aços novos (incluindo o TENAX 300) são mais sensíveis à fragilização por resfriamento lento.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios do aço VH13[®] em condições de tratamento em laboratório com resfriamento rápido e lento

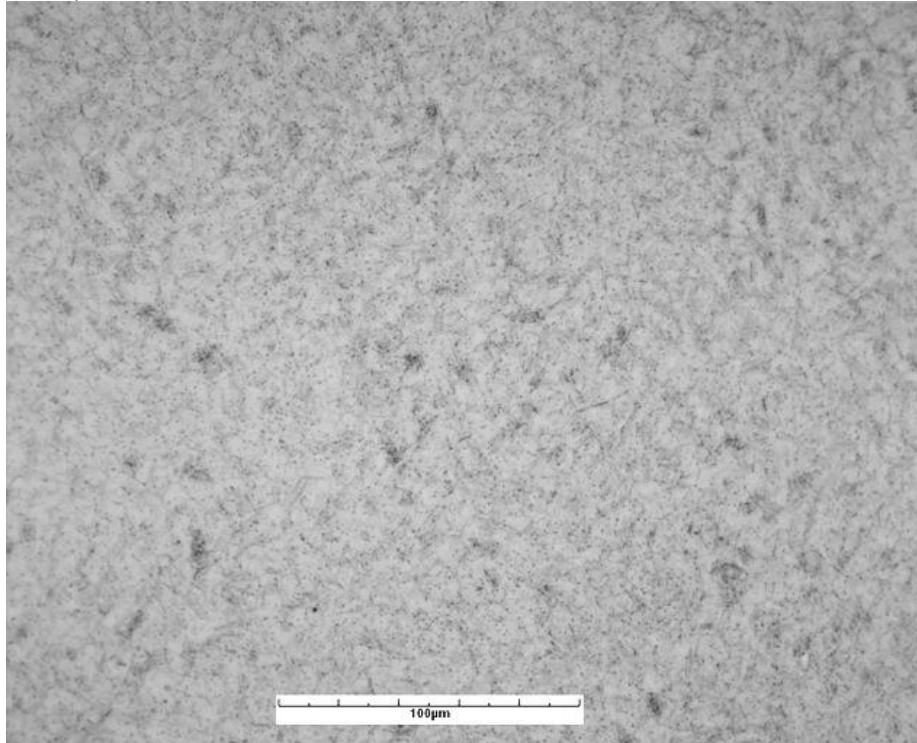
AÇO FERRAMENTA	AMOSTRA	IMPACTO (J/cm ²)	Razão= Tenacidade posição / Tenacidade Laboratório
VH13 [®]	LABORATÓRIO	13,3	1,0
VH13 [®]	NÚCLEO SIMULADO	10,0	0,75
VHSUPER [®]	LABORATÓRIO	18,3	1,0
VHSUPER [®]	NÚCLEO SIMULADO	7,1	0,40

Nota: O ensaio de impacto foi realizado com corpo de prova reduzido (3 x 4 x 27 mm). Laboratório University of Applied Sciences UPPER – Áustria. Fonte: o autor

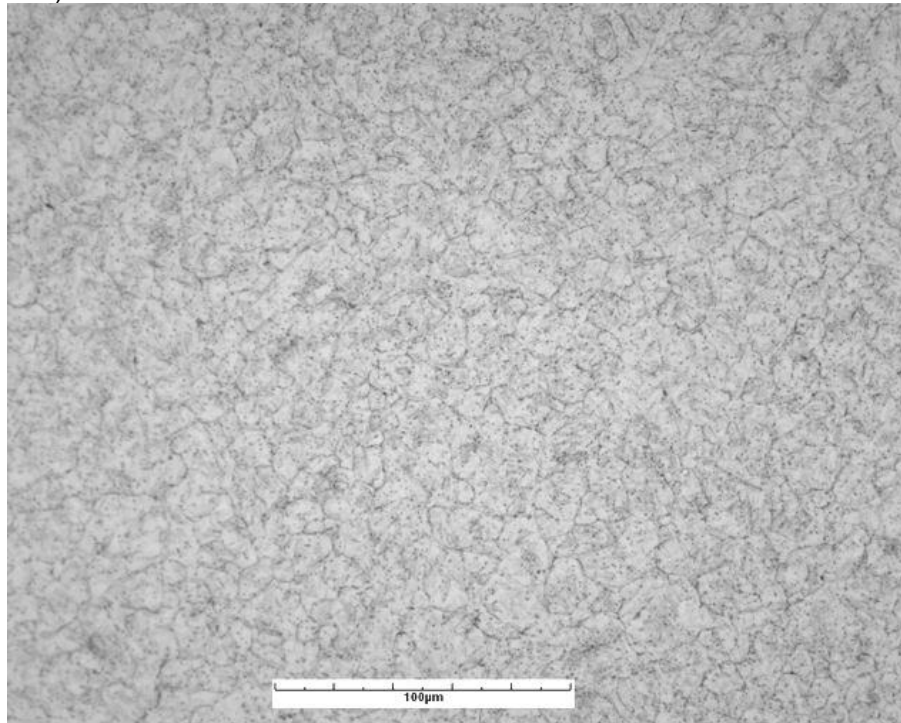
Observações das imagens obtidas por microscopia óptica constata-se que alterações microestruturais ocorreram com o resfriamento lento durante a têmpera de aços ferramenta, principalmente a precipitação de carbonetos pró-eutetóides em contornos de grão. Isto é acentuada na Figura 26 nas imagens a direita da amostra do aço que teve menor taxa de resfriamento.

Figura 26 – Diferenças causadas na microestrutura do aço VHSUPER® pela presença de carbonetos nos contornos de grãos como mostra a imagem da amostra do núcleo

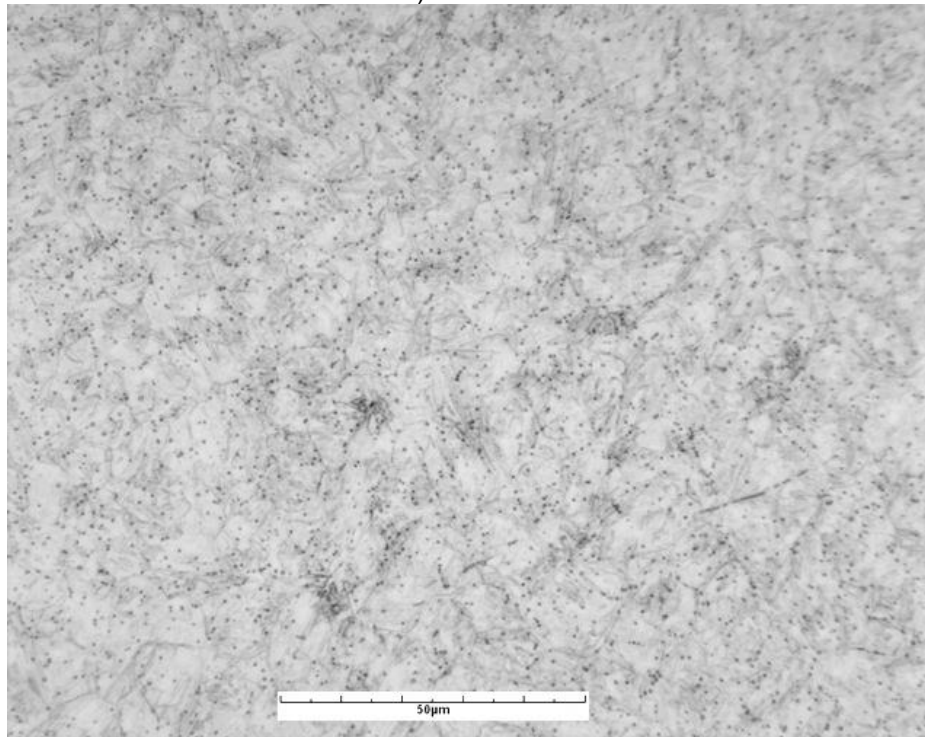
a) Laboratório



b) Núcleo da ferramenta industrial



a) Laboratório



b) Núcleo da Ferramenta Industrial

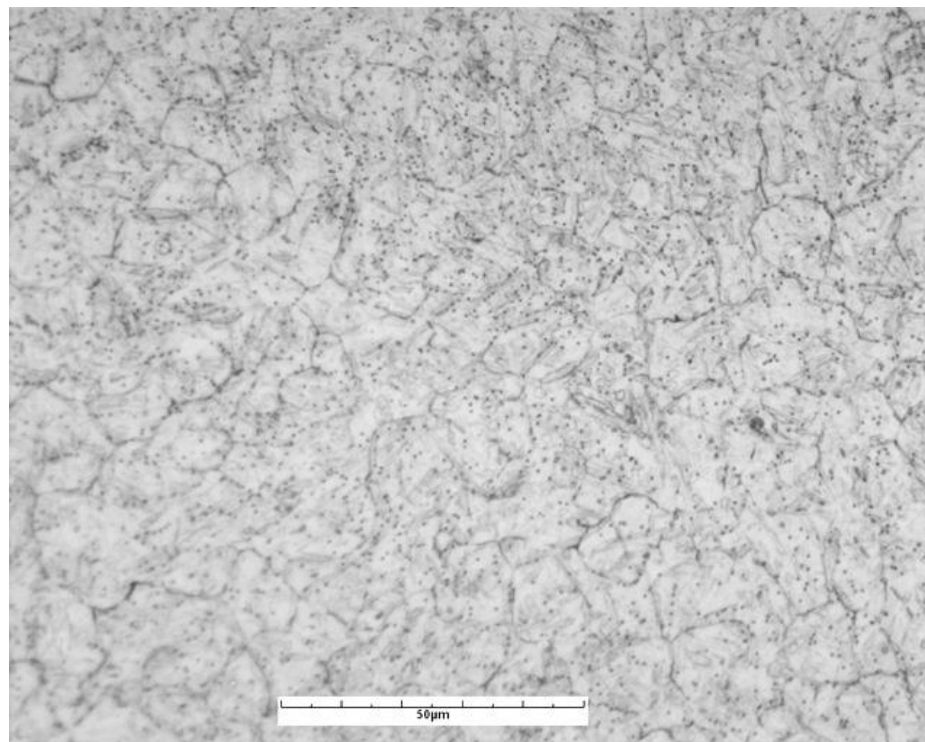
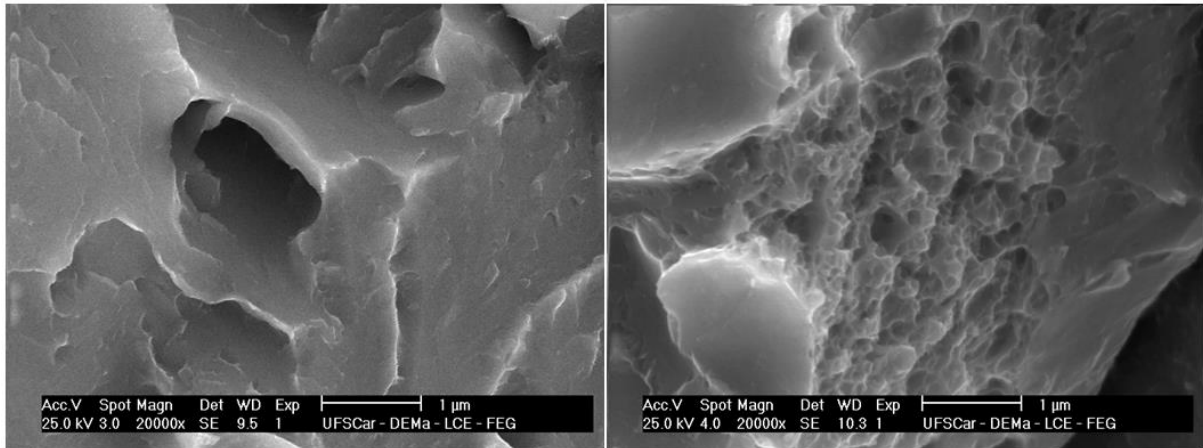


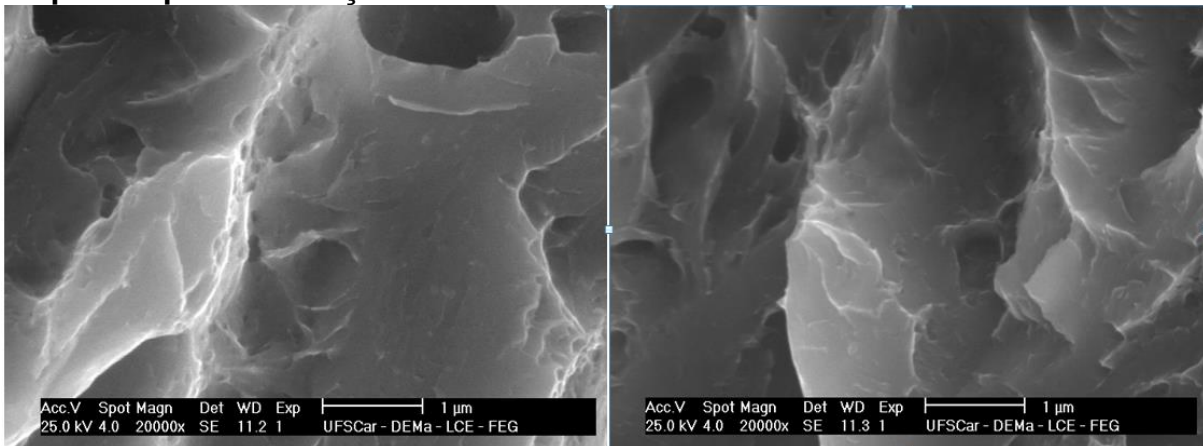
Figura 27 – Imagens obtidas Microscópio eletrônico de varredura dos corpos de provas do aço VH13®



Detalhe das regiões das fraturas, mostrando a presença de carbonetos nas regiões de fratura frágil (seta) com ruptura intergranular – e a presença clara de cavidades, sem carbonetos com fratura por clivagem (Figura lado esquerdo)

Fonte: Laboratório de Materiais da Universidade Federal de São Carlos.

Figura 28 – Imagens obtidas MEV- microscópio eletrônico de varredura dos corpos de provas do aço VHSUPER®



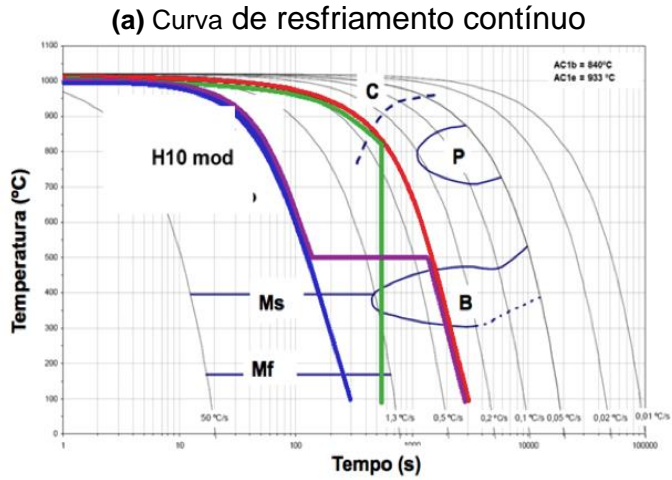
Detalhe da evolução da fratura, para uma temperatura de revenido fixa de 610°C

Fonte: Laboratório de Materiais da Universidade Federal de São Carlos.

Figura 29 – Separação dos efeitos de fragilização

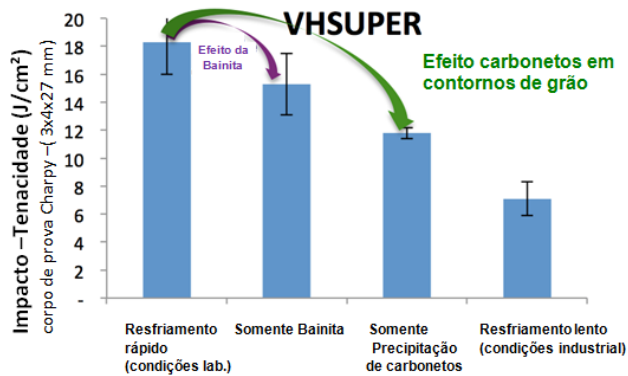
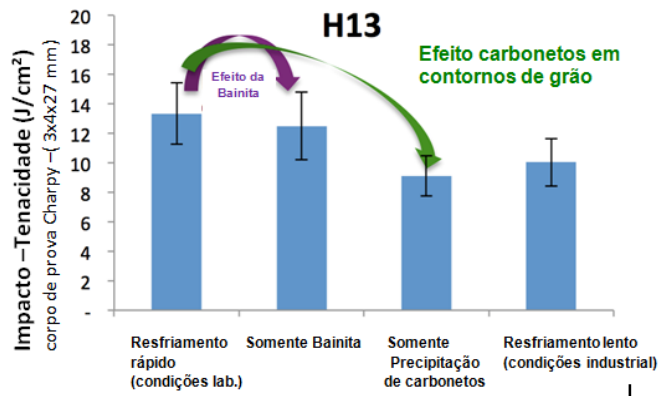
a) Separação dos efeitos da bainita e da precipitação de carbonetos em contornos de grãos: curva industrial, vermelha, foi quebrada em duas situações – uma representando apenas a formação de carbonetos em contornos de grão e outra com apenas formação de bainita.

b) Resultado gráfico para a contribuição da fragilização pela bainita e pelos carbonetos nos aços VH13® e VHSUPER®.



- Curva azul: Condição de Laboratório
- Curva vermelha: Condição Industrial
- Curva verde: Somente carbonetos
- Curva rocha: Somente Bainita

(b)



Fonte: O autor - ensaios realizados na University of Applied Science UPPER – Austria

4.4 IMPLICAÇÕES PARA O CONTROLE DE QUALIDADE DE FERRAMENTAS INDUSTRIAIS

Os resultados apresentados nos itens 4.1 a 4.3 proporcionou, com rigorosidade experimental, mostrar o efeito da fragilização por um resfriamento lento na têmpera. Portanto, como mostrado por (Moraes & Mesquita, 2012), que apenas o controle da dureza não é suficiente para a qualidade final da ferramenta. Como mostrado no item 2.2 e 2.3 do presente trabalho, a tenacidade, propriedade fundamental para o desempenho da ferramenta, diminuiu a menos da metade do valor quando do tratamento térmico industrial, e a dureza praticamente permaneceu a mesma obtida no tratamento térmico realizado em laboratório.

Estas constatações trazem muitas implicações para o controle da qualidade dos produtos e também para as estratégias de produção de ferramentas, em termos de: i) controle do processo de resfriamento durante o tratamento térmico industrial; ii) utilização de blocos de prova (também chamados de cupons) para testes de tenacidade; iii) estratégia de construção das ferramentas, em termos da usinagem e do projeto das mesmas. Desta forma, os três pontos acima são discutidos no presente item, a luz dos conceitos de qualidade e também dos resultados experimentais do presente trabalho.

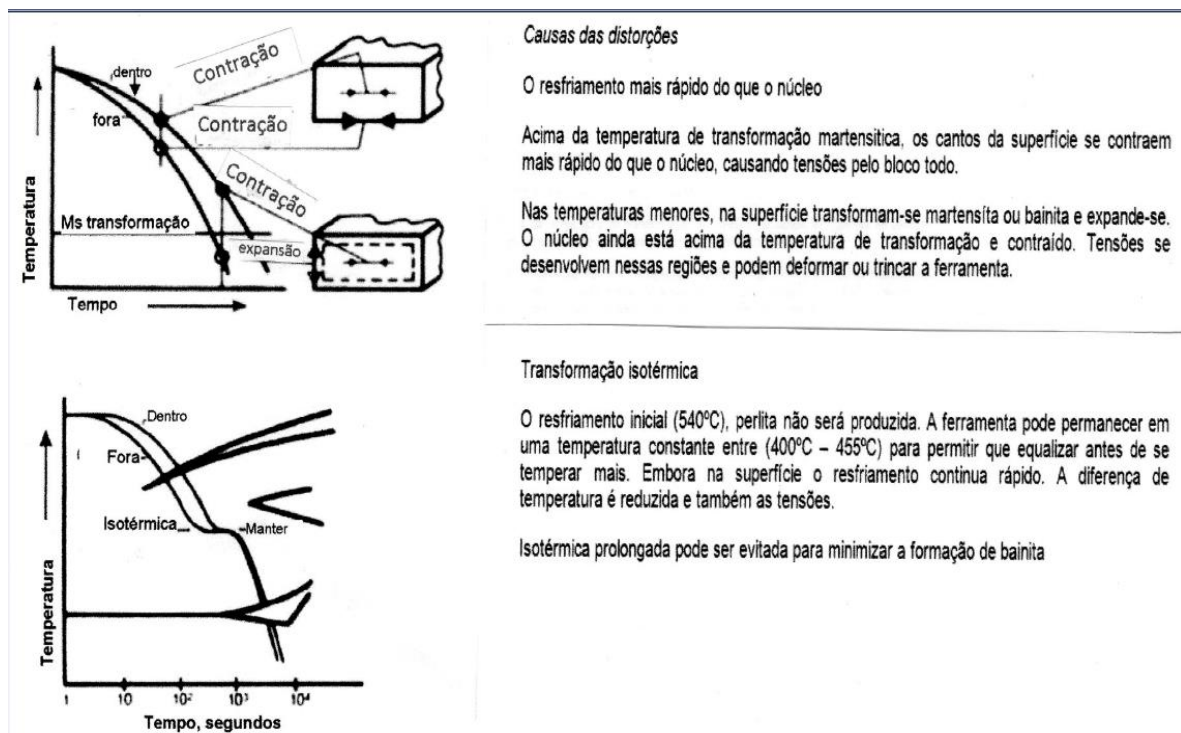
4.4.1 Controle do Processo de Tratamento Térmico

Atualmente, a maior parte dos tratamentos térmicos de moldes e matrizes é realizada com têmpera a óleo ou com nitrogênio sob alta pressão, em fornos com aquecimento sob vácuo. Neste último tratamento, a velocidade de resfriamento pode ser controlada por meio da pressão do gás ou da velocidade de circulação dele dentro do forno. E a medida é usualmente feita pela introdução de termopares na peça, utilizando os furos existentes (para refrigeração da ferramenta quando em uso) (NADCA, 2006). A taxa de resfriamento mínima, estabelecida pela NADCA, é de 28°C/min.

Como prevenção, para se evitar que o aço da ferramenta seja submetido a uma taxa de resfriamento inapropriada faz-se o controle da taxa de resfriamento colocando termopares junto à ferramenta com a intenção de acelerar o resfriamento

da peça através do monitoramento adequado do meio refrigerante. Porém, o resfriamento demasiadamente rápido pode causar distorções ou trincas nas ferramentas, pela expressiva diferença de temperaturas entre superfície e núcleo (ver Figura 30). Desta forma, a NADCA sugere que seja utilizada a têmpera controlada (step-quenching) toda vez que esta diferença superar 110°C.

Figura 30 – Origem das distorções e esquema de têmpera controlada para evitar distorções



Fonte: NADCA 2006

Na figura 30 são mostradas as curvas de resfriamento contínuo da superfície e a do núcleo da ferramenta e sinaliza as diferentes contrações que o material sofre devido a gradientes de temperaturas ao longo do resfriamento e também pela expansão quando da formação da martensita. Fatores esses que podem ocasionar a variação dos valores da tenacidade entre o núcleo e a superfície. Já as diferentes contrações do material propiciam a formação de trincas.

Portanto, pode-se ver que existe na NADCA recomendação tanto para a velocidade de têmpera quanto para evitar distorções. Porém, como não tem peso de norma, a NADCA é pouco conhecida e pode acabar por não ser seguida. Isto porque

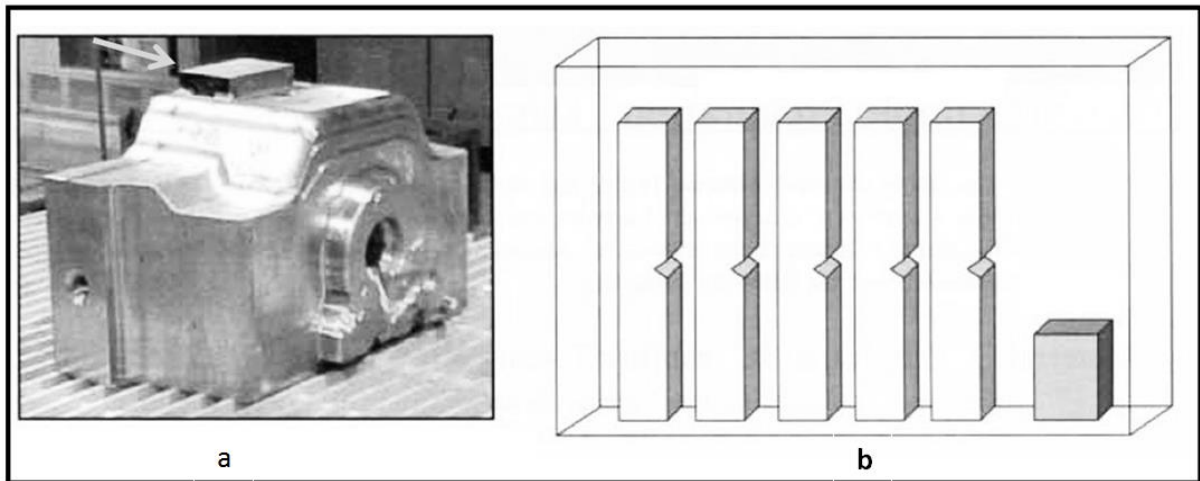
uma forma de controlar as distorções e evitar a trinca da matriz é simplesmente reduzir a velocidade de resfriamento. Muitas empresas de tratamentos térmicos têm controles precários da taxa de resfriamento na têmpera (MORAES, 2013) e controlam a qualidade apenas pela dureza. Desta forma, podem temperar com condições amenas, promovendo a dureza necessária sem riscos de distorções ou trincas.

4.4.2 Utilização do teste de impacto como controle da qualidade

Previsto pela NADCA, o teste de impacto em corpos de prova afixado à ferramenta “cupom” (como mostrado na Figura 31) é uma forma conveniente de testar o resultado do processo de resfriamento como um todo na qualidade final da peça obtida, sem necessidade de destruição da mesma, este procedimento seria interessante como controle adicional da qualidade, mas ainda é pouco aplicado no Brasil.

Igualmente difícil seria estabelecer os limites mínimos de aceitação (apesar de a NADCA definir alguns valores), porque como mostrado pela presente dissertação a queda na tenacidade é contínua com a redução da taxa de resfriamento e, assim, dependerá do tamanho da ferramenta tratada e do tipo do aço. Assim, faz-se necessária a criação de um banco de dados, com limites de aceitação por aços ou tamanhos de peças, o que torna obviamente o trabalho mais complexo. Mesmo assim, a obtenção dos valores pelo tratador térmico, mesmo que não ligadas a uma aceitação, podem ser utilizadas como parâmetro de controle interno, a fim de propiciar uma qualidade adequada do desempenho da peça, ou seja, no sentido de qualidade como adequação ao uso e não apenas no cumprimento da especificação (neste caso, a dureza).

Figura 31 – Exemplo de ferramenta na qual foi colocado o cupom



a) localização do copo de provas (cupom); b) corpos de prova para o ensaio de impacto, retirados após a têmpera. Conforme NADCA, 2006. Fonte: (MESQUITA 2010)

Para a validação e controle dos processos de tratamento térmicos de ferramentas de grandes dimensões nos quais a determinação das condições de aquecimento como as de resfriamento da ferramenta devem contar com as novas tecnologias computacionais.

Atualmente temos técnicas de simulação assistida por computador. Uma forma especial de simulação é através de modelos matemáticos. Na simulação para comprovar a capacidade do processo nos novos projetos de ferramentas utiliza-se o aprendizado de processos anteriores dos quais se tem experiência operacional. No caso de características de processo verdadeiramente novas, essa abordagem não é disponível. Conseqüentemente, os projetistas e planejadores dos processos podem reduzir o risco através da simulação. Pode-se aplicar a simulação em projeto de menor escala e testá-lo. Com o aprendizado adquirido utilizam-se os resultados do teste para prever quais serão os resultados com as operações em larga escala. Para o controle da qualidade das características do núcleo da ferramenta, já que não é possível retirar uma amostra para teste, pode-se através de medições efetuadas na superfície da ferramenta durante o tratamento térmico e entrar, com os valores dessas medições, num programa de simulação e obter a correlação dos valores em varias regiões da ferramenta.

A validação do processo de tratamento térmico é importante, pois o resultado da qualidade da ferramenta não pode ser verificado por monitoramento ou medição sem que seja necessária à realização de ensaios destrutivos (ensaio de impacto de

amostra do núcleo da ferramenta) a organização deve validar o processo. Para a validação é necessário entre outras as seguintes providências: aprovação de equipamentos e qualificação dos recursos humanos envolvidos; padronização de métodos e procedimentos específicos.

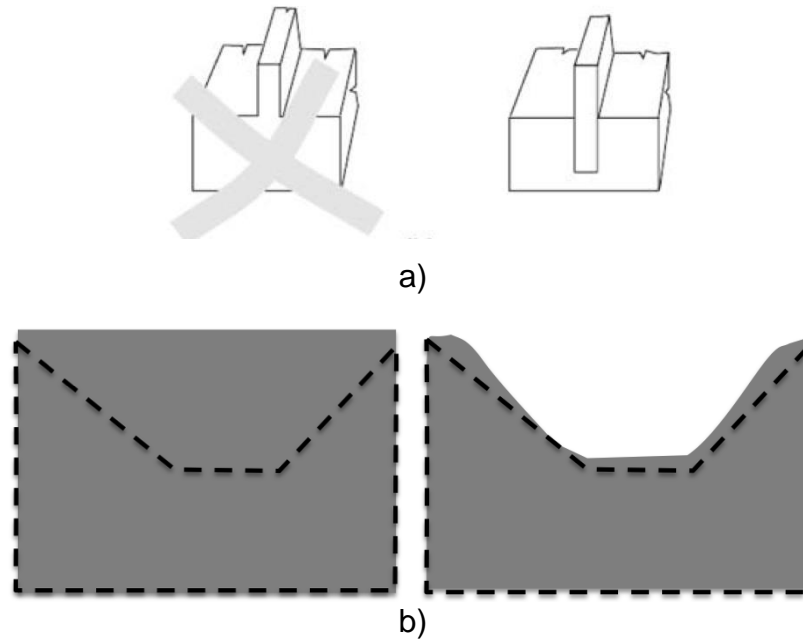
4.4.3 Projeto de ferramentas com base na taxa de resfriamento

Ferramentas industriais normalmente são projetadas utilizando puramente aspectos mecânicos, de forma a estarem adequadas à obtenção da peça em questão. Por outro lado, é também importante que o projeto utilize o conceito mostrado aqui de acelerar a velocidade de resfriamento.

A primeira maneira de utilizar este conceito seria utilizar menores ferramentas possíveis – significando ferramentas compostas, não inteiriças. Um exemplo é mostrado na Figura 32a, sugerida para evitar distorções (MESQUITA, 2008), mas que serve claramente para o mesmo fim aqui – ou seja, uma ferramenta pode ser dividida em várias peças e, com isso, a velocidade de resfriamento durante a têmpera (individual) de cada peça pode ser superior. Desta forma, a qualidade final da ferramenta pode aumentar consideravelmente.

Outra consideração importante para o tratamento térmico de aços ferramenta de alta liga, como os estudados no presente trabalho, é a usinagem de materiais advindos de blocos pré-temperados. Apesar de acelerar o tempo de fabricação, isto reduz muito a velocidade de resfriamento na têmpera das regiões de trabalho Figura 32b. Explicando melhor, se a ferramenta é usinada quase a dimensão final e tratada, a região de trabalho ficará muito próxima da superfície e, assim, do contato com o gás que promove o resfriamento. Por outro lado, se a têmpera é realizada em um bloco e a ferramenta é usinada partindo deste bloco, as regiões internas (resfriadas lentamente) serão as regiões de trabalho e, portanto, podem promover um desempenho menor. Apesar de também existir esta recomendação na NADCA e em algumas empresas este conceito de usinar antes da têmpera existir de maneira tácita, a literatura ou mesmo normas específicas não citam este aspecto para o tratamento térmico de ferramentas.

Figura 32 – Considerações de melhorias no projeto da ferramenta



a) utilizando ferramentas segmentadas;

b) não utilizando bloco pré-temperados, mas usinando antes da têmpera: compare a produção da ferramenta final partindo de um bloco (linha tracejada inscrita no bloco cinza) contra a ferramenta usinada a partir de um bloco pré-esboçado antes do tratamento térmico.

FONTE: Adaptado de (Mesquita, 2008)

4.4.4 Considerações finais sobre o impacto do presente trabalho nas recomendações de tratamentos térmicos

O presente trabalho mostrou que vários aspectos importantes para a qualidade de uma ferramenta industrial podem não ser verificados, por falta de controle específico da qualidade. Desta forma, as recomendações aqui presentes, especialmente nos itens 4.4.1 a 4.4.3, podem ser reunidas em uma recomendação brasileira de tratamento térmico de ferramentas, contendo vários aspectos da NADCA, mas também adicionando pontos como a estratégia da construção das ferramentas e uma revisão no controle da sua qualidade apenas baseado na dureza.

5 CONCLUSÕES

O estudo experimental do presente trabalho, além da discussão de sua aplicação na indústria, leva às seguintes conclusões:

- A taxa de resfriamento durante a têmpera possui pouca influência na dureza final obtida, mas muito impacto na tenacidade e, portanto, na qualidade de ferramentas industriais.
- A propriedade mais afetada é a tenacidade, que diminui com a diminuição da taxa de resfriamento.
- Resultados de simulações industriais e de laboratório indicam que o fator mais importante para a redução da tenacidade é a precipitação de carbonetos em contornos de grão.
- Nos novos aços (de baixo Si ou baixo Cr) a formação de bainita também possui um efeito na redução da tenacidade após têmperas mais lentas, mas a precipitação de carbonetos ainda mostra ser o efeito principal.
- A constatação da influência da taxa de resfriamento traz implicações importantes no controle da qualidade de ferramentas industriais, em três principais pontos: i) nos métodos de controle da velocidade de resfriamento e distorções, ii) no ensaio de impacto além da dureza como medida de controle de qualidade e iii) no projeto das ferramentas, visando maximizar a troca de calor durante a têmpera.
- Considerando a lacuna existente nos controles dos processos de tratamento térmico em escala industrial, que levam em consideração como variável de controle apenas a dureza, as constatações da presente dissertação poderiam ser utilizadas como base para uma recomendação de norma de tratamento térmico para ferramentas industriais.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Elaboração de um procedimento de controle de qualidade em ferramentas industriais tratadas a vácuo.

- Estudo da fragilização por têmpera lenta nos mesmos aços, ou em diferentes aços, com peças de várias dimensões.
- Avaliações de custo, considerando a perda de qualidade e o ganho de produtividade a partir de uso de ferramentas obtidas de usinagem de blocos pré-tratados.
- Desenvolvimento de projeto de simulação, aquisição de dados em tempo real utilizando modelos matemáticos e físicos com objetivo de controlar as características internas das ferramentas industriais de grandes dimensões durante o tratamento térmico.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9001:2008 Sistemas de gestão da qualidade – Requisitos; subitem 8.2.3. Monitoramento e medição de processos.** São Paulo: ABNT, 2008.

_____. **NBR 6189:1982 – Aços ferramenta.** São Paulo: ABNT, 1982.

_____. **NBR NM ISO 6508-1:2008 Referência Internacional NM ISO 6508-2, Materiais Metálicos - Ensaio de Dureza Rockwell - escala C. Método de Ensaio.** São Paulo: ABNT, 2008.

_____. **NBR NM- 281-1: 2003 – Ensaio de impacto por pêndulo Charpy - ensaios.** São Paulo: ABNT, 2003.

AMERICAN IRON AND STEEL SOCIETY. **Tool Steels:** Steel Products Manual. Apr, 1988.

BARBOSA, C. A.; BACALHAU, J. B. Aços para moldes para plástico com 40 HRC e elevada usinabilidade VP ATLAS. In: 10^o Encontro da Cadeia Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes. **Anais...**, ABM Associação Brasileira de Metalurgia e Mineração: São Paulo, 2012.

BERNS, H. Strength and Toughness of Hot Working Tool Steels. In: KRAUSS, G.; NORDBERG, H.; **Tool Materials for Molds and Dies:** Application and Performance. Illinois, EUA: The Colorado School of Mines Press, 1987. p. 45-65.

BYRER, T. G.; SEMIATIN, A. L.; VOLLMER, D. C. **Forging Handbook.** Cleveland, Ohio: ASM, 1985. p. 195-217.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais:** uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

CHIAVENATO, I.; História da Administração. São Paulo: Saraiva, 2009.

CHIAVERINI, Vicente. **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas,** São Paulo: ABM- Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica – Processo de Fabricação e Tratamento:** São Paulo: McGraw- Hill, 1986.

GALLO, C. et al. R. Nucleação de trincas em moldes de injeção de alumínio com tratamento de superfícies duplex. **Tecnol. Metal. Mater. Miner.,** São Paulo, v. 8, n. 3, p. 153-159, jul.-set. 2011.

GABARDO, J. F.; OKIMOTO, P. C. Estudo de tratamentos térmicos aplicados às ferramentas fabricadas com aço AISI H13 visando ao aumento da sua vida útil. In: 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. 2011. **Anais...**, Caxias do Sul, 2011.

GONÇALVES, C. S. et al. **Journal of ASTM International**, 2011, v. 8, n. 4, p.1-9.

HOLLOMON, J. H.; JAFFE, L. D. Time-Temperature Relations in Tempering Steel, Trans. **AIME**, v. 162, p. 223-249, 1945.

ISO INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION ISO 6505-3:2005- Metallic Materials- Rockwell hardness test:Part 3: Calibração.2005.

JESPERSON, H.; NILSSON, C. The Influence of the Cooling Rate during Quenching and Preheating Temperature on the Toughness of a Hot-work Tool. **Mineração e Metalúrgica revista**, BHM Berg - Springer-Verlag Wien 2012, v. 157, p. 401-405.

JUNIOR, JAIME A. SPIM. Tópicos Avançados em Tratamentos Térmicos dos Aços, São Paulo: ABM – Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2010.

JURAN, J.M. **Planejamento para a qualidade**, São Paulo: PIONEIRA, 1990.

KAYE, A.; STREET, A. **Die Casting Metallurgy**. Londen: Butterworth, 1982.

LAUE, K.; STENGER, H. **Extrusion: processes, machinery, tooling**. Ohio: ASM, 1981.

LESKOVSEK, V.; SUSTARSIC, B.;JUTRISA, G. The influence of austenitizing and tempering temperature on the hardness and fracture toughness of hot-worked H11 tool steel. **Journal of Materials Processing Technology**, 2006.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. **Técnicas de Pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

MESQUITA, R. A. **Aços para Moldes e Matrizes**. Apostila de Curso, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2004.

_____. **O Controle da qualidade no tratamento térmico de aços ferramenta**. XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. São Carlos, Brasil, 2010.

MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C. A. **A importância da tenacidade em aços ferramentas para trabalho a frio**. In: 4º. Encontro da Cadeia Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes. Joinville, maio 2006.

_____. Novos Aços para Trabalho a Quente. In: 1º Encontro de Integrantes da Cadeia Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 2003, São Paulo. **Anais...**, 2003. p. 131-140.

_____. O controle da qualidade no tratamento térmico de aços ferramenta. In: XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Anais...**, São Carlos, Brasil, 2010.

_____. Failure Analysis in Tool Steels, p. 311-355. In: CANALE, L. C. F.; MESQUITA, R. A. ; TOTTEN, G. E. **Failure Analysis of Heat Treated Steel Components**. Ohio: American Society for Metals, 2008. v. 1.

_____. **Uma avaliação das propriedades de desgaste e tenacidade em aços para trabalho a frio**. In: 2º Encontro da Cadeia Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes, São Paulo, Brasil, ABM. 2004.

MESQUITA, R. A.; HADDAD, P. T. Propriedades Fundamentais dos Aços Ferramenta para Matrizes de Forjamento. In: Catálogo de Tecnologia da Villares Metals, 2013. Disponível em: <www.villaresmetals.com.br/tecnologia/materiastecnicas/artigo>. Acesso em: 15 nov. 2013.

MESQUITA, R. A.; LEIVA, D. R.; BARBOSA, C. A. **Estudos de tratamento térmico nos aços ferramenta VH13ISO e VF800AT**. In: 3º Encontro da Cadeia Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes. São Paulo, Brasil, 2005.

MESQUITA, R. A.; FRANÇA, L. C.; BARBOSA, C. A.; Análise de casos e aplicações de aço TENAX 300 e VHSUPER. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v. 2, n. 1, p. 70, jul.-set. 2005.

MESQUITA, R. A.; MORAES, P. **Tratamento Térmico de Moldes e Matrizes e Seus Aspectos de Qualidade**. Exacta (São Paulo. Impresso), v. 10, p. 281-288, 2012.

MORAES, P. A. V.; MESQUITA, R. A., **Diagnóstico Sobre a Gestão da Qualidade em Empresas Brasileiras de Tratamento Térmico de Ferramentas Industriais**. In: 68º CONGRESSO INTERNACIONAL ANUAL DA ABM. 2013. Anais..., Belo Horizonte, 2013.

MAÑAS, Antonio Vico. **Gestão da Qualidade – Tópicos Avançados** – São Paulo , Ed. Cengage Learning, 2011.

NADCA – North American Die Casting Association. **Special Quality Die Steel & Heat Treatment Acceptance Criteria for Die Casting Dies**, n. 229/2006 –Ed. North American Die Casting Association, Holbrook Wheeling, Illinois, 2006.

OKUNO, T. Effect of Microstructure on the Toughness of Hot Work Tool Steels, AISI H13, H10 and H19. **Journal of the Iron Steel Institute of Japan**, v. 27, n. 1, 1987.

PAYSON, P.; NEHRENBURG, A. E. The Metallography and Properties of High Alloy Hot Work Steels. **AISI Yearbook**. p. 540, 1948.

QAMAR, S. Z.; SIDDIQUI, R.A.; PERVEZ, T. **Effect of Heat Treatment On Mechanical Properties of H13 Steel**, 13^o International Reserch/Expert Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”, p. 98, 2009, Hammamet, Tunisia.

ROBERTS, G.; KRAUSS, G.; KENNEDY, R. **Tool Steels**. 5. ed. Materials Park, Ohio: ASM International, 1998.

ROSE, A. Atlas Zur Warmebehandlung der Stahle, Ed. Dusseldorf Verlog Stahleisen, Alemanha, 1972.

ROTONDARO, Roberto Gilioli. **Gestão da Qualidade – Teoria e Casos** – Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

SARTORI, CARLOS HUNBERTO. **Conceitos Básicos de Tratamento Térmico de Aço Ferramenta**. 2^o Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes. São Paulo: ABM, 2004.

SERIACOPI, V. **Simulação Numérica Campo de Tensões na Microestrutura do Aço Ferramenta AISI H13 Durante o Forjamento a Quente**, 43 p. Dissertação (mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2013.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010.

SILVA, E. L.; MENESES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 5. ed. Florianópolis: UFSC, 2005.

SJÖSTRÖM, J; BERGSTRÖM, J. Thermal fatigue testing of chromium martensitic hot-work tool steel after different austenitizing treatments. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 153-154, p. 1089-1096, 2004.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**, Butterworth-Heinemann, 2000, p. 175-182.

THELNING, K. E. **Steel and its Heat Treating**, 2nd ed. Butterworths, London, 1984.

VALES, S. S. **Estudo da Influência do Tratamento Criogênico no Aço AISI H13**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais [São Carlos]) - Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

VILLARES METALS. **Recomendações sobre temperaturas de tratamento térmico do aço VF800AT**. Out, 2001.

<<http://www.villaresmetals.com.br/tecnologia/materiastecnicas/artigo>>. Acesso em: 17 mar. 2013.

_____. 2013. Disponível em: <<http://www.villaresmetals.com.br/tecnologia/materiastecnicas/artigo>>. Acesso em: 15 nov. 2013.

UDDEHOLM TOOLING AB. Klarenfjord, B.; Sandberg, O. **Steel Material For Hot Work Tools**. Int. CI C22C38/18, 38/22, 38/24. PCT: WO 9950468. 10 Jul.1999.

UDDEHOLM TOOLING. Melhoria da produtividade em matrizes de fundição sob pressão. Disponível em: <<http://www.uddeholm.com>>. Acesso em: 5 jun. 2014.

UMINO, M. et al. Effect of Silicon Content on Tempered Hardness, High Temperature Strength and Toughness of Hot Working Tool Steels. **Tetsu-to-Hagane** (Journal of the Iron and Steel Institute of Japan), v. 89, n. 6. June 2003. p. 673-679.

WILSON, R. **Metallurgy and heat treatment of tool steels**. London: McGraw-Hill, 1975,p.163-81.

ZANCO, F.R.; F.R.; ROSA, R.L.S.; GREGO, G.R.; SANCHETO, G.B. **Aplicação de indicadores de qualidade em uma empresa do setor de fundição**. 18º Simpósio de Engenharia de Produção (SIMPEP), Bauru, 2011,p.4-9.

APÊNDICE 1

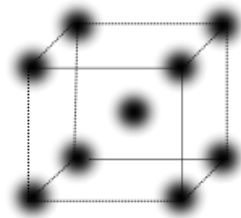
Fundamentos de Tratamentos Térmicos dos Aços

Entende-se por tratamento térmico, a aplicação de ciclos de aquecimento e resfriamento em elementos metálicos, com o objetivo único de obter-se mudança de natureza microestrutural, tendo-se como consequência a obtenção de propriedades físico-químico-mecânicas desejadas, (SARTORI, 2004).

Os tratamentos térmicos envolvem processos nos quais os parâmetros de temperatura e tempos devem ser controlados conforme especificações que garantam a obtenção de características mecânicas apropriadas à aplicação do aço.

O ferro puro no estado sólido possui três fases de equilíbrio: fase α , γ e δ . As fases α e γ são a base para todo o entendimento da estrutura e propriedades do ferro e, conseqüentemente, do aço, essa liga situam-se nas faixas aproximadamente de 0,008% a 2,11% de Carbono, (CHIAVERINI, 2008). O carbono é um elemento colocado no ferro e forma uma solução sólida. Essa solução sólida é a fase α , nela os átomos de ferro estão arrançados numa estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) conforme Figura a, essa estrutura também é chamada de ferrita. A ferrita pode ser considerada como sendo o ferro puro, e a solubilidade do carbono nessa estrutura é bastante baixa, na temperatura ambiente.

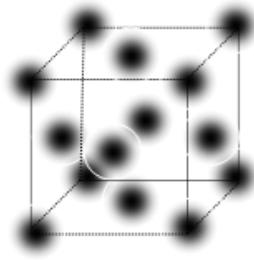
Figura a – Estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC)



Fonte: O autor

Quando o aço é aquecido acima dos 912°C forma-se a austenita ferro γ com arranjo cristalino cúbico de face centrada (CFC) Figura b, até a temperatura de 1394°C.

Figura b – Estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC)



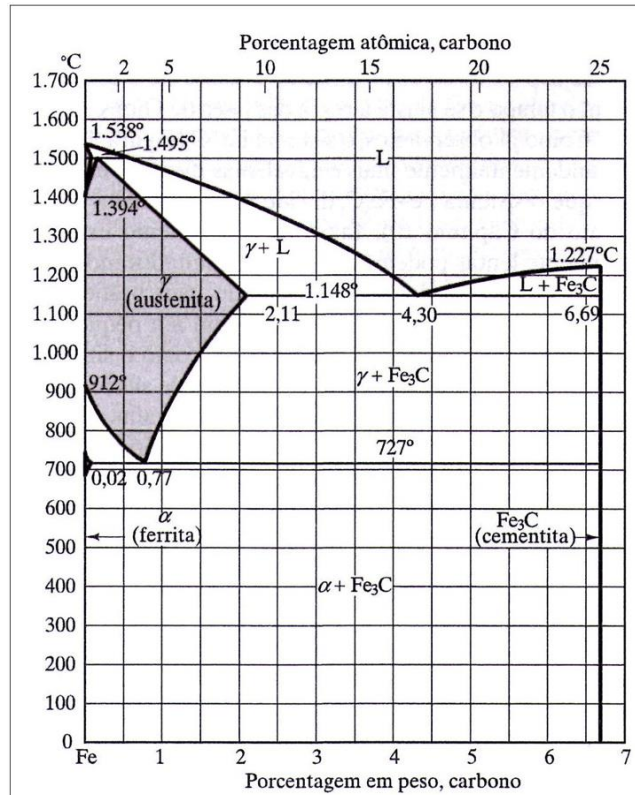
Fonte: O autor

A austenita corresponde a uma solução sólida supersaturada de carbono em estrutura cúbica de face centrada, transformação de uma fase para outra envolve movimento de átomos por difusão. Durante o aumento de temperatura, enquanto os átomos vibram mais energicamente, uma pequena fração deles se recolocará no reticulado, Representa uma estrutura mecanicamente mole e dúctil, pelo fato de possuir espaços interatômicos maiores que a ferrita. O diagrama de fases resumem os estados em equilíbrio e, com tais, esses estados (e as microestruturas associadas) devem permanecer estáveis e inalteradas com o tempo. No entanto, essas estruturas em equilíbrio levam tempo para se desenvolver, e a aproximação do equilíbrio pode ser representada em uma escala de tempo. No aquecimento do aço ocorre à transformação da fase α (ferrita) para a fase γ (austenita) por nucleação e crescimento, entende-se por nucleação o surgimento de novos e diminutos cristais. O mesmo ocorre no resfriamento quando, por uma reação de nucleação e crescimento, a austenita é transformada em ferrita. (SHACKELFORD, 2008).

No ferro-carbono as fases presentes são previstas pelo diagrama de fases ferro-carbono mostrado na Figura c. O conhecimento do tratamento térmico dos aços implica primeiramente no conhecimento detalhado da formação de fases das ligas Fe-C, o qual apresenta a formação das fases observadas na liga Fe-C, como função da temperatura e da composição de carbono presente na mistura. Neste diagrama são consideradas duas regiões, uma até 2,0% que correspondem aos aços e outra acima desse valor, que corresponde aos ferros fundidos. Uma região importante é a denominada de campo austenítico, onde, independente da porcentagem do carbono do aço, a microestrutura é composta de austenita, apresentando uma estrutura cristalina cúbica de face centrada.

Esta microestrutura uma vez resfriada, pode se transformar em martensita, perlita, bainita, que dependendo da velocidade de resfriamento poderá produzir uma gama de propriedades mecânicas (VALES, 2010).

Figura c – Diagrama de fases Ferro-Carbono, com a fase metaestável Fe₃C

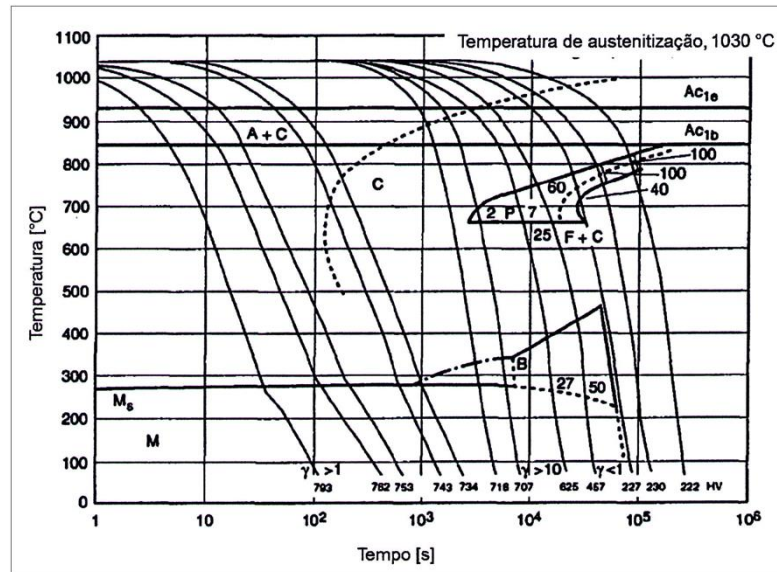


Fonte: SHACKELFORD (2008)

É necessário que o material a ser tratado seja aquecido a uma temperatura que permita que as transformações internas ocorram, e essa temperatura, em geral deve ser superior à temperatura de recristalização do material. No caso dos aços essa temperatura é a temperatura crítica, ou seja, a temperatura na qual as fases precipitadas como a ferrita e cementita se dissociam na fase austenítica. O resfriamento subsequente completa as alterações estruturais e confere ao material as propriedades mecânicas desejadas, (JUNIOR, 2010).

A figura d representa o diagrama TRC – Diagrama de resfriamento contínuo para o tradicional aço AISI H13. Esse é o aço mais famoso e que deu origem a todos os outros:

Figura d – Diagrama de resfriamento contínuo TRC para o aço AISI H13



Sendo A=austenita; C= carbonetos; F= ferrita; B= Bainita; P= perlita; M= martensita; Ac1b= mínima temperatura para a existência da austenita; e Ac1e= temperatura máxima para a ocorrência de carboneto na microestrutura. (ROBEETS; KRAUSS; KENNEDY, 1998)

A linha C, tracejada indica o início da precipitação de carbonetos da solução austenítica supersaturada, antes da ocorrência da transformação eutetóide de transformação.

Na Figura d, é mostrado a fase austenítica que foi resfriada a partir de 1030°C, temos a indicação A corresponde a austenita; C correspondente aos carbonetos; F a ferrita; B a bainita; P a perlita; M a martensita . Sendo Ac1b a mínima temperatura para a existência da austenita e Ac1e a temperatura máxima para a ocorrência de carboneto na microestrutura (ROBERTS; KRAUSS; KENNEDY, 1998). Para cada curva de resfriamento contínuo tem-se o valor da dureza do aço e observa-se que a dureza do aço diminui conforme o aumento do tempo de resfriamento do material.

O carbono é muito mais solúvel na austenita, a solubilidade máxima do carbono na ferrita é de apenas 0,0218 a 727°C, entretanto, na austenita, podem ser dissolvidos até 2,11% de carbono a 1148°C. Para a composição com 0,4% de C, por

exemplo, teremos na temperatura ambiente as fases α + Fe₃C. Isto porque o carbono que não consegue permanecer em solução sólida forma, juntamente com o ferro, o carboneto Fe₃C. Contudo acima de 750°C, o diagrama de equilíbrio mostra apenas a presença de austenita. Todo carbono que não era solúvel na ferrita, foi solubilizado na austenita.

A cementita Fe₃C se forma quando o limite de solubilidade do carbono na ferrita α é excedido abaixo de 727°C, mecanicamente a cementita é muito dura e frágil, a resistência de alguns aços é aumentada substancialmente pela sua presença (CALLISTER, 2007).

Transformação martensítica

Partindo de um aço aquecido e estabilizado na temperatura de austenitização forma-se a fase γ , não somente os carbonetos são parcialmente dissolvidos, mas também a rede cristalina é alterada, transformando-se de ferrita para austenita graças ao reposicionamento dos átomos de carbono no reticulado cristalino. Se for submetido a um resfriamento rápido a partir da temperatura de austenitização, chamado de têmpera ocorre uma modificação na estrutura cristalina do aço, pois não haverá tempo suficiente para que todo o carbono saia da estrutura da austenita e se decomponha nas fases de equilíbrio α , e Fe₃C. Eles se fixam em posições onde não dispõem de espaço suficiente, e o resultado disso é uma alta microtensão que explica o aumento de dureza ocorrendo à formação rápida do microconstituente martensita com estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC), (SARTORI, 2004).

A transformação martensítica não depende do tempo apenas da temperatura para ocorrer. A porção de austenita não transformada é denominada austenita retida.

Austenitização e têmpera

A têmpera é o resfriamento rápido do aço de uma temperatura superior à sua temperatura crítica, no caso dos aços essa temperatura na qual as fases precipitadas como ferrita e cementita se dissociam na fase austenítica. O

resfriamento subsequente em um meio como óleo, água, ar, entre outros completa as alterações estruturais e confere ao material as propriedades mecânicas desejadas.

Com a estrutura martensítica, para isso o resfriamento deve ser rápido o suficiente para se evitar assim a transformação da austenita em perlita e ferrita.

O diagrama TRC, Figura d, diagrama de transformação por resfriamento contínuo, corresponde a uma representação de curvas que delimita as regiões de temperatura e tempo nas quais há a formação de microestruturas em função da velocidade de resfriamento. Com resfriamento lento teremos as fases formadas de ferrita e perlita, em uma morfologia esferoidizada ou perlítica. Nos resfriamentos mais rápidos será obtida a martensita. Para resfriamentos intermediários, surgem outras morfologias, como perlita e bainita. Os elementos de liga, em geral, aumentam a facilidade de formação de martensita, tornando-a possível mesmo em resfriamentos não muito bruscos, como nos aços de alta liga. Por isso, diz-se que os elementos de liga aumentam a temperabilidade do aço, ou seja, o aço deve apresentar suficiente “capacidade de endurecimento” ou adequada “profundidade de endurecimento”, (CHIAVERINI, 2008).

O resultado da têmpera é o aumento da resistência e dureza do aço, pela formação da martensita e como consequência tem-se a redução da ductilidade, da tenacidade e o aparecimento de apreciáveis tensões internas. Tais inconvenientes são atenuados ou eliminados pelo revenimento. O tratamento térmico de revenimento aplica-se nos aço imediatamente após a têmpera, a temperaturas inferiores à temperatura crítica, resultando em modificação da estrutura obtida na têmpera, (CHIAVERINI, 1986).

O tratamento térmico de têmpera ou endurecimento é uma variável importante na vida útil da ferramenta. A velocidade ou severidade do meio de resfriamento depende do tamanho da ferramenta, pois está relacionada com a velocidade de remoção do calor na têmpera a partir da temperatura de austenitização, ou seja, quanto maior melhor. É importante que se observe o patamar (500°C), onde se deve fazer uma breve parada para que a temperatura superficial fique próxima da do núcleo. Velocidades baixas de resfriamento podem reduzir a tenacidade à fratura. A alta velocidade de resfriamento é preferível para otimizar a vida útil da ferramenta. A ferramenta deve ser revenida imediatamente após resfriamento ainda quente com a

temperatura entre 50-70°C, O tratamento térmico de têmpera ou endurecimento como visto na apresentação das propriedades dos materiais é uma variável importante na vida útil da ferramenta. A velocidade ou severidade do meio de resfriamento depende do tamanho da ferramenta, pois está relacionada com a quantidade de calor a ser removido a partir da temperatura de austenitização, ou seja, quanto mais rápido melhor.

A dureza é uma das propriedades mecânica mais comumente analisada e controlada em ferramentas, por ser um indicador importante devido a sua correlação com a resistência mecânica do material. Porém, o efeito da dureza no desempenho depende do tipo da aplicação do aço ferramenta. Portanto as variáveis do processo de tratamento térmico como: temperatura, tempos, taxas de aquecimento e resfriamento, equipamentos utilizados assim como todos os recursos do processo envolvido influenciam de modo significativo na qualidade da ferramenta influenciando no desempenho e durabilidade da mesma (MESQUITA, 2010). O aço ferramenta utilizado na confecção da ferramenta desempenha também um papel muito importante, e que as características do material da ferramenta influenciam, grandemente a sua vida útil. Apesar da enorme variedade de parâmetros que regem o desempenho da ferramenta existem algumas propriedades fundamentais do material que governam o desempenho de um material em todas as aplicações. Estas propriedades são a tenacidade que impede a fratura instantânea das arestas da ferramenta e a dureza que deve ser suficientemente alta para impedir o desgaste (LESKOVSEK; SUSTARSIC; JUTRISA, 2006).

Revenimento

O revenimento é o tratamento térmico realizado logo após a têmpera, a uma dada temperatura durante um período de tempo específico resultando em modificação da estrutura obtida na têmpera, (JUNIOR, 2010). A alteração estrutural que se verifica no aço temperado em consequência do revenido melhora a ductilidade, corrige dureza e fragilidade do material, aumentando sua tenacidade, além de aliviar ou remover as tensões internas, esse tratamento térmico permite, através de processos de difusão, a formação da martensita revenida. A matensita revenida pode ser quase tão dura e resistente quanto à martensita após a têmpera,

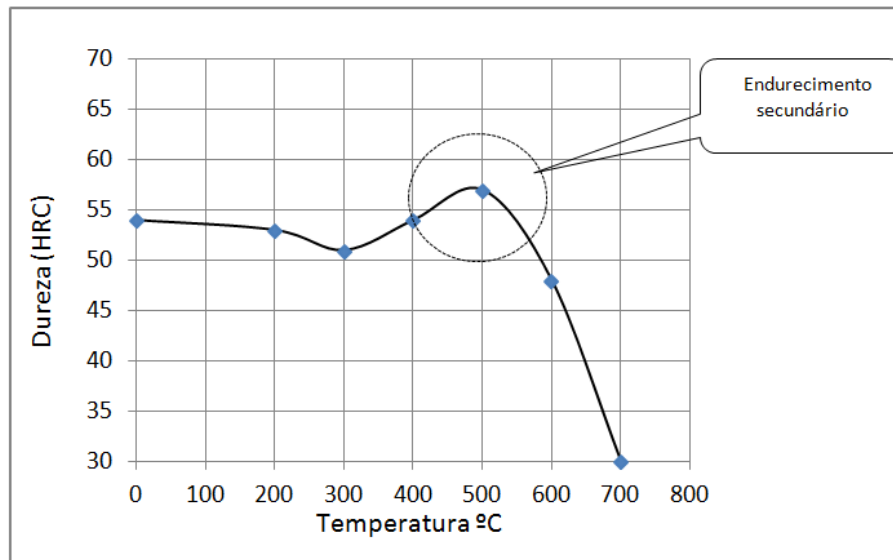
entretanto com uma ductilidade e uma tenacidade substancialmente melhoradas, (VALE, 2011). O revenimento constitui em se aquecer a ferramenta uniformemente em temperatura controlada e a permanência nesta temperatura por um tempo determinado.

Dependendo da temperatura, pequenas ou grandes transformações na estrutura martensítica resultam e que são a seguir descritas:

Entre 100 °C e 200°C – não há modificações estruturais sensíveis, entre 260°C e 260°C – nessa faixa, o aço começa a perder mais dureza, embora não se verifique nenhuma modificação estrutural notável, entre 260°C e 360°C – inicia-se uma precipitação de carbonetos finos, a qual origina uma estrutura com a aparência de um agregado escuro onde ainda se nota a origem martensítica, essa estrutura é chamada de “troostita”. Entre 360°C e 730°C – nessa faixa ocorrem as maiores transformações estruturais e mecânicas. Quanto mais elevada a temperatura de revenido, mais grossas se tornam as partículas de cementita precipitada. O comportamento de aço altamente ligado no revenido sofre alterações porque aços contendo titânio, cromo, molibdênio, vanádio, nióbio ou tungstênio podem apresentar na faixa de temperatura entre 500°C a 600°C o fenômeno de “endurecimento secundário”; ou seja, aumento de dureza, devido à precipitação de carbonetos de liga e, eventualmente, transformação em martensita da austenita retida, (CHIAVERINI, 2008).

Na Figura 2, é mostrada a região da curva de revenimento em que ocorre o endurecimento secundário, nem todos os aços têm este comportamento. Isso ocorre notadamente em aços de alta liga como os aços ferramenta, (VALES, 2001). Além da presença de endurecimento secundário, há outra característica importante no revenido dos aços ferramentas, que os diferencia dos aços carbono: O revenido múltiplo, aplicados nos casos em que é necessária uma tenacidade elevada, é absolutamente indispensável à aplicação de dois ou mais revenidos, (SARTORI, 2004).

Figura e – Representação esquemática da curva de revenimento do aço H13.



Fonte: adaptado de (SARTORI, 2004).

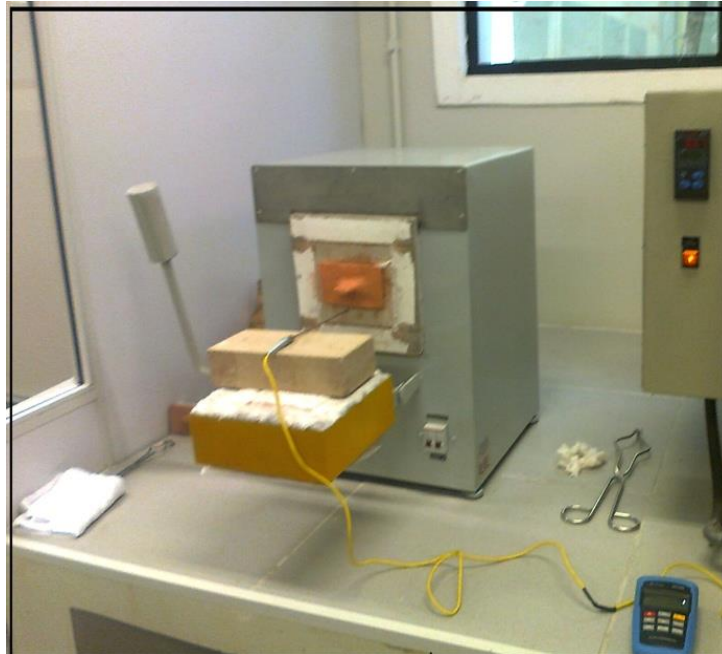
Os revenidos múltiplos em aços com alta porcentagem de austenita retida têm a função de concluir completamente as transformações microestruturais iniciadas na têmpera (transformar a austenita retida), de modo a conferir ao aço ferramenta a melhor combinação de resistência mecânica com tenacidade, uma complicação adicional é a estabilização da austenita se houver um tempo de atraso entre a têmpera e o revenido, dificultando a transformação da austenita em martensita, (VALES, 2011).

APÊNDICE 2

Equipamentos e instrumentos utilizados

As atividades de preparação das amostras, tratamentos térmicos e medições de dureza foram desenvolvidos no Laboratório de Materiais da UNINOVE. Nas figuras f, g, h, i, j e k são mostrados detalhes desse laboratório.

Figura f – Forno Grion utilizado no tratamento de revenimento



Laboratório UNINOVE Campus Santo Amaro

Figura g – Forno Trend utilizado no tratamento de têmpera



Laboratório UNINOVE Campus Santo Amaro

Figura h – Porta de cerâmica refratária com abertura para inserção de termopar



Figura i – Durômetro e Fornos Trend e Grion



(a) Durômetro Wilson Instruments

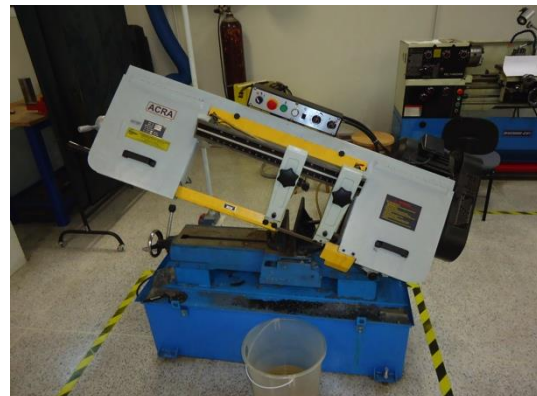


(b) Fornos Trend e Grion

Figura j – Serra fita mesa e Serra fita automática laser



(a) Serra fita mesa



(b) Serra fita automática laser

Figura k – Serra policorte com refrigeração forçada e Polimetrix



(a) Serra policorte com refrigeração forçada
Fonte: Laboratório UNINOVE – campus Santo Amaro



(b) Polimetrix