

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

INGRID PENNELOPE SANTOS  
KAOANA FEDATTO

**PROCESSAMENTO E ANÁLISE DO POTENCIAL DE RESISTÊNCIA  
AO DESGASTE DE BROCAS DE AÇO RÁPIDO AISI M2 TRATADAS  
ATRÁVES DE BORETAÇÃO E TRD**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
(TCC 2)

CURITIBA  
2016

INGRID PENNELOPE SANTOS  
KAOANA FEDATTO

**PROCESSAMENTO E ANÁLISE DO POTENCIAL DE RESISTÊNCIA  
AO DESGASTE DE BROCAS DE AÇO RÁPIDO AISI M2 TRATADAS  
ATRÁVES DE BORETAÇÃO E TRD**

Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Mauro do Nascimento  
Co-Orientador : Prof. Dr. Milton Luiz Polli.

CURITIBA  
2016

## **TERMO DE ENCAMINHAMENTO**

Venho, por meio deste termo, encaminhar para apresentação o projeto de pesquisa “PROCESSAMENTO E ANÁLISE DO POTENCIAL DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE BROCAS DE AÇO RÁPIDO AISI M2 TRATADAS ATRÁVES DE BORETAÇÃO E TRD”, realizada pelas alunas INGRID PENNELOPE SANTOS e KAOANA FEDATTO, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Mauro do Nascimento  
UTFPR – DAMEC

Co-Orientador: Prof. Dr. Milton Luiz Polli.  
UTFPR - DAMEC

Curitiba, 02 de junho de 2016.

## TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos o projeto de pesquisa "PROCESSAMENTO E ANÁLISE DO POTENCIAL DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE BROCAS DE AÇO RÁPIDO AISI M2 TRATADAS ATRÁVES DE BORETAÇÃO E TRD", realizado pelo aluno(s) INGRID PENNÉLOPE SANTOS e KAOANA FEDATTO, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Eduardo M. do Nascimento  
DAMEC - UTFPR  
Orientador

Prof. Dr. Aloisio José Schuitek  
DAMEC - UTFPR  
Avaliador

Prof. Dr. Milton Luiz Polli.  
DAMEC – UTFPR  
Co-Orientador

Prof. Dr. Rodrigo Lupinacci Villanova  
DAMEC - UTFPR  
Avaliador

Curitiba, 02 de junho de 2016.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Eduardo Mauro do Nascimento e Prof. Dr. Milton Luiz Polli por toda paciência, orientação, dedicação e por seus ensinamentos durante, não somente na execução do presente trabalho, como durante todo o período universitário.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Villanova e ao Prof. Dr. Aloisio José Schuitek, por aceitarem a participar da avaliação deste projeto de pesquisa;

A todos os professores da UTFPR que tanto se esforçaram durante todos os quase 06 anos da faculdade para nos transmitir o melhor ensinamento no intuito de nos fazer grandes profissionais

Aos estagiários dos laboratórios de Materiais e Usinagem da UTFPR, pois sempre estavam prontamente dispostos a nos ajudar;

À Spectroscan, pela realização do teste de espectrometria no aço utilizado;

Aos nossos pais por nos fazerem quem somos, pelo apoio, pelo incentivo e por paciência para entender que somos turistas em casa porque queremos ter um futuro promissor e garantir que nossos filhos tenham a mesma educação que nos foi permitido.

Aos amigos sempre compreensivos que entenderam todas as nossas ausências e nos apoiaram, e que com certeza estarão na primeira fila para comemorar a nossa vitória.

## RESUMO

No presente trabalho foram avaliados os efeitos do processo de endurecimento superficial denominado boretação e tratamento termo reativo de deposição e difusão (TRD) nas principais propriedades em brocas de aço AISI M2, assim como o potencial de utilização das amostras submetidas a tal tratamento como ferramenta de corte. As amostras sofreram o tratamento superficial de boretação e TRD, seguido de têmpera e revenimento. Após os tratamentos foram realizadas a caracterização mecânica das camadas de boretos e carbonetos formada nas mesmas, através de análise microscópica (óptica e eletrônica), e microdureza. A formação camada de boretos e carbonetos foi comprovada e identificada com a técnica de difratometria de raios-X. As durezas obtidas chegaram a aproximadamente 2900 HV para TRD e 2000 HV para boretação. Por fim, foi analisado o potencial de utilização dos corpos de prova tratados pela boretação e TRD como ferramenta de corte através de testes de furação em um aço AISI 1045. Os resultados mostraram que a boretação e o TRD foram eficazes para obtenção de uma camada superficial de elevada dureza e espessura dentro do esperado, entretanto os corpos de prova apresentaram desgaste prematuro durante o ensaio de furação. Atribui-se ao resultado a elevada formação de trincas na camada endurecida, devido provavelmente ao resfriamento da têmpera imediatamente após a boretação e TRD.

**Palavras-chaves:** Boretação. TRD. Furação. Brocas. Desgaste. Aço rápido M2

## **ABSTRACT**

In this present study, we evaluated the effects of surface hardening process called boriding and reactive thermoreactive treatment of deposition and diffusion (TRD) in the main properties of steel drills AISI M2, as well as the potential use of samples subjected to such treatment as cutting tool. The samples were surface treatment of boriding and TRD, followed by quenching and tempering. After the treatments were carried out the mechanical characterization of layers of borides and carbides formed there in, through microscopic analysis (optical and electronic), microhardness. The layer borides and carbides were confirmed and identified with the diffraction X-ray technique. The microhardness has reached approximately 2.900 HV. Finally, we investigated the potential use of the bodies of the test piece treated by boronizing and TRD as a cutting tool by drilling test in a steel AISI 1045. The results showed that the boriding and TRD were effective for obtaining a surface layer of high hardness and thickness, but the bodies of the test piece showed premature wear during the drilling test. Assigns to the result to high formation of cracks in the hardened layer, probably due to the quenching cooling immediately after boriding and TRD.

**Palavras-chaves:** Boriding. TRD. Drilling. Drill. Wear. High speed steel M2

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Influência do tempo e da temperatura a na formação da camada de boretos .....	17
Figura 2– Camada borexada em aço M2 (a) 850 °c, 2h, (b) 950 °C, 4h .....	17
Figura 3 – Variação da espessura da camada de boretação em aço rápido M2 em decorrência do tempo e temperatura .....	18
Figura 4 - Esquema de um típico tratamento pelo método TRD .....	20
Figura 5 - Relação entre energia livre de formação de carbonetos e de óxidos dos elementos ferro-liga adicionados ao banho de bórax e os tipos de camadas formadas em um aço alto carbono a 1000°C.....	21
Figura 6 - Efeito da temperatura do banho, tempo de imersão e composição do substrato para formação de camadas de VC de 4µm e 7µm utilizando o método TRD.....	22
Figura 7 - Microdureza Vickers da camada de carbonetos em relação a outros métodos de endurecimento superficial.....	23
Figura 8 - Comparativo entre o ganho de peso em camadas obtidas pelo método TRD em um teste de oxidação a altas temperaturas. ....	24
Figura 9 – Mecanismos de desgaste em ferramentas em função da temperatura de corte .....	26
Figura 10 – Principais desgastes encontrados em brocas .....	29
Figura 11 – Gume postiço .....	30
Figura 12 - Desgaste de flanco .....	30
Figura 13 - Desgaste da gume transversal de corte.....	31
Figura 14 – Desgaste de cratera .....	31
Figura 15 – Desgaste de quina .....	32
Figura 16 - Fluxograma dos métodos do projeto.....	34
Figura 17 - Fluxograma da preparação dos corpos de prova.....	37
Figura 18 – Amostra em estado de fornecimento.....	38



Figura 19 – Broca tratadas recém retiradas do forno, quebradas apenas pelo manuseio. Broca com corrosão na haste, na qual foi inserido somente a área de corte. ....	39
Figura 20–Brocas após limpeza dos resíduos dos banhos de tratamento em aço M2 (a) Boretação, (b) TRD.....	40
Figura 21 -Tratamento de boretação .....	41
Figura 22 –Tratamento de boretação por cinco horas.....	42
Figura 23 – Tratamento de TRD.....	43
Figura 24 – Perfil de dureza de brocas tratadas por boretação (a) e TRD em (b).....	44
Figura 25– Difração por raio X da camada de boretação .....	45
Figura 26– Difração por raio X da camada de TRD .....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação de dureza entre camadas boretadas e camadas de outros tratamentos .....	18
Tabela 2 – Propriedades do boretos de ferro .....	19
Tabela 3 – Dureza a quente de aços rápidos.....	25
Tabela 5 – Resumo de tipos de desgaste .....	33
Tabela 6 – Composições dos banhos usados nos tratamentos termoreativos .....	36
Tabela 7–Parâmetros de corte para furação .....	36
Tabela 8–Composição química do aço rápido M2 .....	38
Tabela 9 – Microdureza Vickers para broca em estado de fornecimento.....	44
Tabela 10–Resultados das furações com brocas tratadas.....	46

## LISTA DE SIGLAS

AISI	Instituto Americano de Aço e Ferro (American Iron and Steel Institute)
ASM	Sociedade Americana para Metais (American Society for Metals)
CFE	Elementos Formadores de Carboneto (Carbide Forming Elements)
CNC	Comando numérico computadorizado (Computer Numeric Control)
CVD	Deposição Química de Vapor (Chemical Vapor Deposition)
EF	Estado de fornecimento
PVD	Deposição Física de Vapor (Physical Vapour Deposition)
SAE	Sociedade de Engenheiros Automotivos (Society of Automotive Engineer)
TRD	Tratamento Termo Reativo de deposição e difusão (Thermoreactive deposition)
TD	Toyota Diffusion
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## LISTA DE SIGLAS

t	Tempo de imersão	[s]
d	Espessura da camada	[cm]
$K_o$	Constante da taxa de crescimento da camada	[cm <sup>2</sup> /s]
T	Temperatura	[K]
Q	Energia de ativação	[kJ/kmol]
R	Constante do gás (vapor)	[J/kg-K]
M2	Classificação aço rápido	
KB	Largura da cratera	
KT	Profundidade da cratera	
$K_m$	Medida do desgaste de cratera	
VB	Medida do desgaste de flanco	
$VB_{m\acute{a}x}$	Medida do desgaste de flanco máximo	

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Boretação .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>TRD .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Aço rápido.....</b>	<b>24</b>
<b>2.4</b>	<b>Furação.....</b>	<b>25</b>
<b>2.5</b>	<b>Mecanismos de desgaste de ferramenta.....</b>	<b>26</b>
<i>2.5.1</i>	<i>Abrasão mecânica .....</i>	<i>26</i>
<i>2.5.2</i>	<i>Adesão.....</i>	<i>27</i>
<i>2.5.3</i>	<i>Difusão.....</i>	<i>27</i>
<i>2.5.4</i>	<i>Oxidação.....</i>	<i>27</i>
<i>2.5.5</i>	<i>Mecanismos de desgaste de ferramentas em aço-rápido.....</i>	<i>28</i>
<b>2.6</b>	<b>Tipos de desgaste em brocas .....</b>	<b>28</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>34</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais .....</b>	<b>34</b>
<b>3.2</b>	<b>Metodologia .....</b>	<b>35</b>
<i>3.2.1</i>	<i>Tratamento termo reativos em banhos de bórax .....</i>	<i>35</i>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>38</b>
<b>4.1</b>	<b>Boretação .....</b>	<b>39</b>
<b>4.2</b>	<b>TRD .....</b>	<b>42</b>
<b>4.3</b>	<b>Perfil de dureza.....</b>	<b>43</b>
<b>4.4</b>	<b>Difração de Raio-X.....</b>	<b>44</b>
<b>4.5</b>	<b>Teste de Furação .....</b>	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>50</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No intuito de suprir a demanda pela busca de novas tecnologias para reduzir custos, aumentar produtividade e melhorar a qualidade em processos da indústria metal-mecânica, os estudos para desenvolvimento de novos métodos e materiais para têm aumentado cada dia mais.

Para a melhoria e otimização dos processos em si e de seus ferramentais, inicialmente buscava-se o desenvolvimento de novas ligas e aços. Entretanto, devido às custos e tempo associados a isto, o estudo de tratamentos superficiais se mostraram mais vantajosos para melhoria de propriedades mecânicas dos metais. (Pinedo, 2004).

O tratamento superficial é a adição de revestimentos superficiais em peças metálicas para criar ferramentas com melhores propriedades, como resistência à corrosão, dureza, resistência ao desgaste e etc.

Existe um grande interesse da indústria na aplicação de revestimentos que reduzam o desgaste através do aumento da dureza a partir de um material tenaz. Alguns deles já são amplamente aplicados e conhecidos como PVD, CVD e nitretação. Há ainda alguns poucos explorados, mas que se mostram vantajosos pela facilidade de aplicação e pelo baixo custo, como boretção e termo-reativo de deposição e difusão (TRD)

O processo de boretção podem obter durezas de até 2000 HV. A camada boretada forma-se pela difusão do boro, fornecido pelo banho de tratamento, através do substrato do metal base, formando camadas de Fe<sub>2</sub>B e FeB (SINHA, 1991). As camadas podem apresentar espessuras de até 380 µm, dependendo do tempo e da temperatura do processo e da presença de elementos de liga no substrato. (OZBEK e BINDAL, 2002).

Já o TRD produz camadas de até 3000 HV de dureza. Neste, elementos como nióbio, vanádio ou cromo, são dissolvidos em uma solução composta por um sal, elementos formadores de carbeto e agente redutor, que combinam-se quimicamente com o carbono do substrato, formando a camada que pode medir até 15 µm. (ARAI, 1992).

## 1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é analisar o desgaste e a vida útil de brocas de aço rápido do tipo AISI M2 com tratamento superficial em boretação e termo-reativo de deposição e difusão (TRD) após processo de furação de aço SAE 1045. Os resultados obtidos com as brocas tratadas serão comparados com os das ferramentas sem tratamento superficial, ou seja, em estado de fornecimento (EF). O resultado esperado é um aumento da resistência ao desgaste da ferramenta e consequentemente da vida útil.

## 1.2 Justificativa

A furação é um dos processos mais utilizados na indústria manufatureira. (DINIZ et al, 1999). A introdução de um tratamento superficial sobre a ferramenta de corte deste processo pode melhorar suas propriedades mecânicas, assim como seu desempenho, e aumentar seu tempo de vida útil. Desta forma, desperdícios podem ser reduzidos, assim como tempos de parada para trocas de ferramentas, o que pode torná-las mais eficientes.

Para vencer a elevada competitividade do mercado buscam-se processos mais eficazes que garantam menor utilização de recursos, redução de tempo de trabalho, garantindo a qualidade do produto final não seja prejudicada.

A motivação da escolha desta pesquisa vem da possibilidade de estudar tratamentos térmicos pouco explorados em ferramentas de ampla utilização na indústria. Os processos se mostram atrativos pela facilidade de aplicação e baixo custo.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Boretação

Segundo Vicente Chiaverini (1986), a boretação é um processo termoquímico que consiste no endurecimento superficial pelo elemento boro, que por difusão na liga metálica, forma o boreto de ferro com dureza que pode chegar até 2000 HV.

A boretação é um processo de endurecimento superficial termoquímico, no qual átomos de boro transferem-se de um meio (pastoso, líquido ou gasoso) para o substrato de um material por uma difusão, obtendo-se geralmente camadas de  $Fe_2B$  e  $FeB$ . Por ter raio atômico relativamente menor, o boro consegue difundir-se em uma grande variedade de materiais, produzindo uma camada de boretos com alta dureza, resistência mecânica e baixo coeficiente de atrito (ASM, 1991).

Na boretação em banho salino a peça a ser tratada deve ser imersa em um meio com boro, por exemplo, o Bórax ( $Na_2B_4O_7$ ), juntamente com um elemento redutor (Fe-Al, Al, entre outros). A redução que ocorre entre o meio e o elemento redutor permite a difusão do átomo de boro na peça. A temperatura do tratamento varia de 800 a 1050 °C. Após o banho, os corpos de prova devem ser temperados e revenidos.

Como se trata de um processo de difusão, a espessura da camada de boretos é proporcional ao tempo e à temperatura do processo, como mostra a Figura 1.



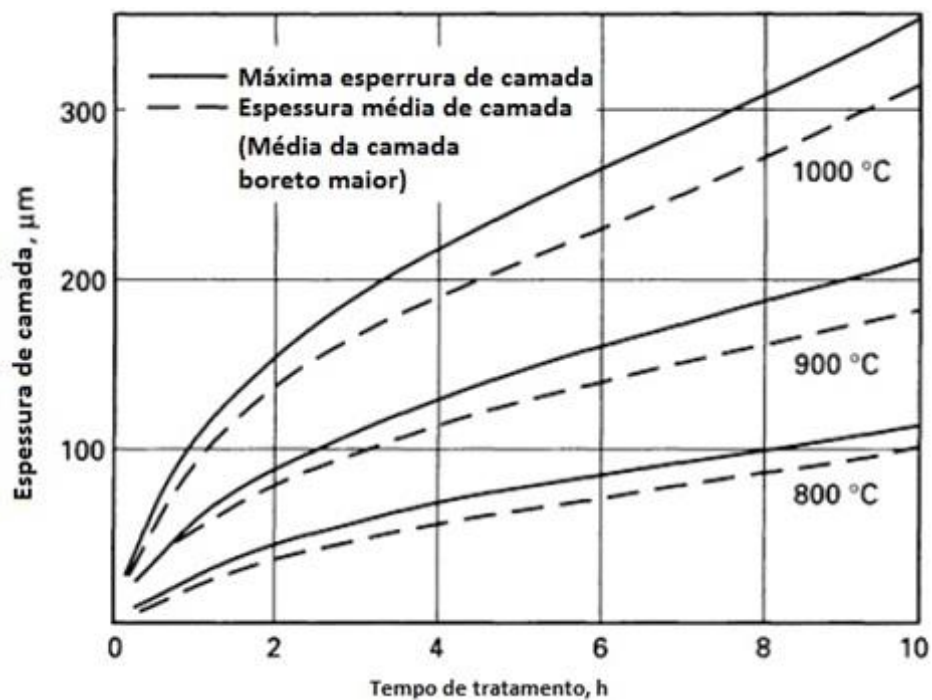


Figura 1- Influência do tempo e da temperatura a na formação da camada de boretos  
 Fonte: Adaptado de ASM Handbook vol.4(1991)

A Figura 2 e Figura 3 mostram como a variação de temperatura e de tempo influenciou na espessura da camada boretada em um material M2.

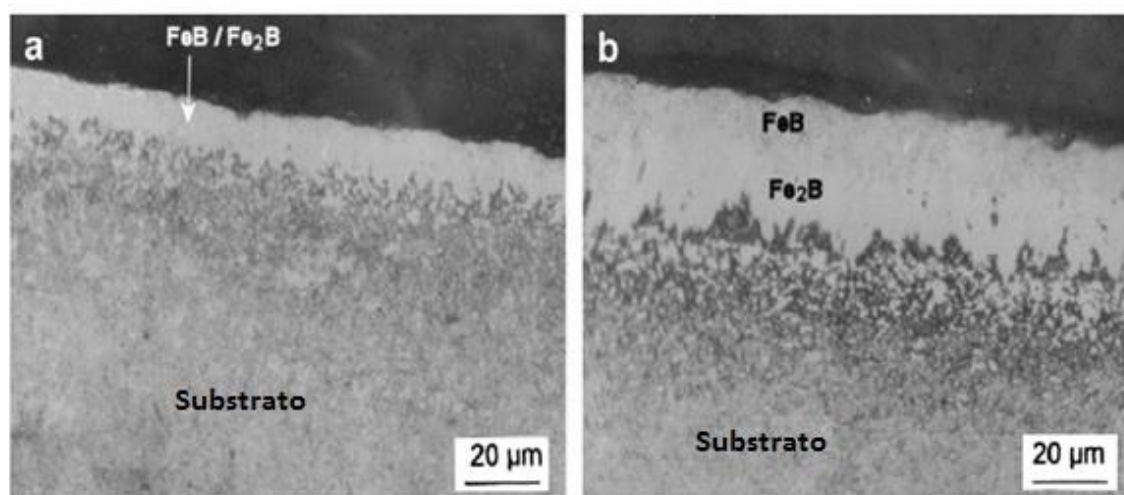
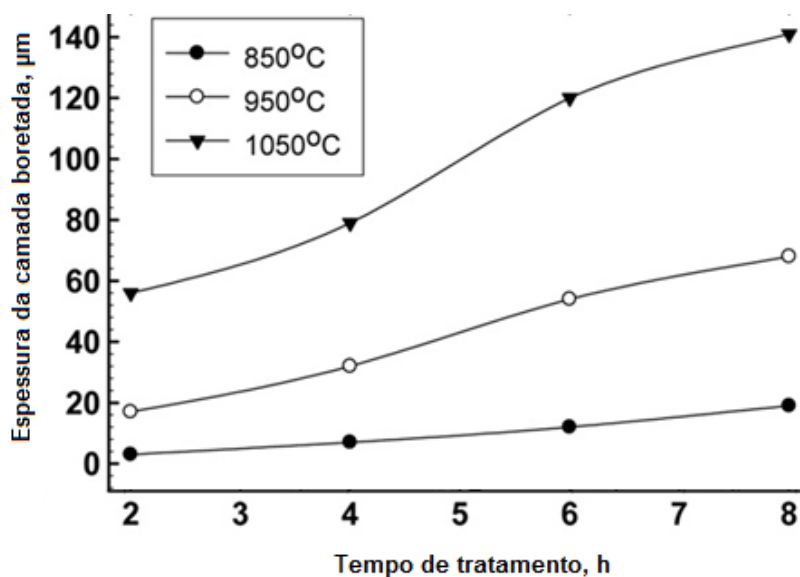


Figura 2— Camada boretada em aço M2 (a) 850 °c, 2h, (b) 950 °C, 4h  
 Fonte:Ozbek(2011)



**Figura 3 – Variação da espessura da camada de boretção em aço rápido M2 em decorrência do tempo e temperatura**

Fonte: Adaptado de Ozbek (2011)

Pela Figura 3, um tratamento a 1000 ° C por 5 horas formaria uma camada de aproximadamente 60 μm.

As camadas formadas dependem diretamente da composição química do substrato do material que sofre a boretção. Entretanto, a presença de elementos de liga pode ocasionar a formação de outros tipos de boretos. Uma das principais vantagens da camada formada por esse método é a elevada dureza, muito superior a outros métodos, como pode ser visto na Tabela 1 (ASM, 1991).

**Tabela 1 - Comparação de dureza entre camadas boretadas e camadas de outros tratamentos**

Material	Microdureza kg/mm <sup>2</sup> ou HV
Aço AISI H13 boretada	1800
Aço AISI A2 boretado	1900
Aço temperado	900
Aço A2 temperado e endurecido	630-700
Aço nitretado	650-1700
Metal Duro, WC +Co	1160-1820 (30Kg)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiC + ZrO <sub>2</sub> Cerâmico	1738 (30Kg)
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
Diamante	>10.000

Fonte: Adaptado de ASM Handbook vol.4(1991)

A formação de uma fase simples de  $\text{Fe}_2\text{B}$  é preferível à camada de dupla fase com  $\text{FeB}$ . Isso se deve ao fato do  $\text{FeB}$  ser mais frágil e também porque os dois boretos têm coeficiente de expansão térmica diferentes e quando formam a camada dupla, alternam tensões de compressão e de tração, podendo levar a formação de trincas (ASM, 1991). A Tabela 2 mostra as distintas propriedades entes as camadas de  $\text{FeB}$  e  $\text{Fe}_2\text{B}$

**Tabela 2 – Propriedades do boretos de ferro**

	<b>FeB</b>	<b>Fe<sub>2</sub>B</b>
<b>Microdureza</b>	19 a 21 GPa	18 a 20 GPa
<b>Modulo de elasticidade</b>	590 GPa	285 a 295 GPa
<b>Coefficiente de expansão térmica</b>	23 ppm/°C - 200°C a 600°C	7,65 ppm/°C - 200°C a 600°C 9,20 ppm/°C - 100°C a 800°C
<b>Densidade</b>	6,75 g/cm <sup>3</sup>	7,43 g/cm <sup>3</sup>
<b>Percentual de boro</b>	16,23%	8,83%
<b>Estrutura atômica</b>	Ortorrômica	Tetragonal

Fonte: Adaptado de ASM Handbook vol.4(1991)

Há ainda a influência dos elementos de liga; normalmente quanto maior a quantidade dos mesmos, maior será a quantidade de obstáculos que os átomos de boro precisam ultrapassar e, portanto, menor será a camada boretada. Assim, os elementos carbono e silício não se dissolvem na camada de boretos ( $\text{Fe}_2\text{B}$  e  $\text{FeB}$ ) e acumulam-se abaixo dessa camadas formando outros compostos. Já o cromo associa-se ao boro, formando uma camada de boretos ainda mais mista. O substrato também pode influenciar a morfologia da camada boretada. Aços de baixo carbono tentem a formar uma camada irregular em forma de dente (ASM, 1991).

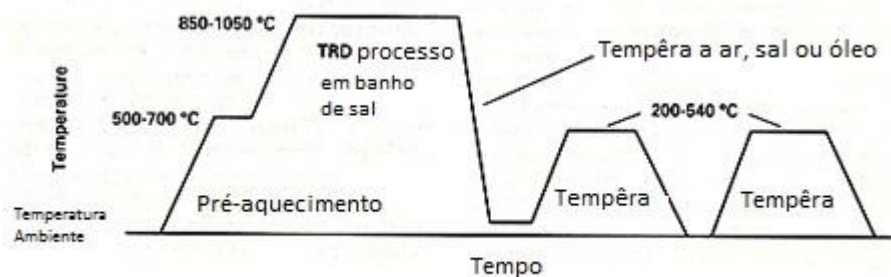
## 2.2 TRD

O método termo-reativo de deposição e difusão (TRD) consiste na formação de finas camadas superficiais de carbonetos, nitretos ou carbonitretos com a finalidade de melhorar as propriedades tribológicas da peça tratada. A formação das camadas se dá pela difusão dos átomos de carbono e nitrogênio do substrato até a superfície, e pela deposição de elementos formadores de carbonetos/nitretos (CFE) como o vanádio, cromo, nióbio, molibdênio, tântalo e tungstênio. O carbono ou

nitrogênio difundido até a superfície reage quimicamente com os elementos formadores de carbonetos ou nitretos para produzir a camada tratada.

O processo do TRD pode ser feito através da imersão de um corpo de prova em um banho de sais fundido ou através de leitos fluidizados. O banho de sais fundidos conta ainda com a adição dos elementos formadores de carbonetos, na forma de ferro-liga, e de um agente redutor ( $B_4C$  ou alumínio). Este método de imersão da peça no banho de sais fundido foi desenvolvido no Japão, nos Laboratórios Centrais de Pesquisa e Desenvolvimento da Toyota em 1970 e posto em prática na indústria japonesa em 1971 (ARAI, 1992). Este também ficou conhecido como método TD (*Toyota Diffusion*).

Antes do corpo de prova ser processado pelo método TRD, ele deve ser pré-aquecido a fim de reduzir tensões residuais do processo de fabricação e também diminuir o tempo de imersão no banho. Após o pré-aquecimento, o corpo é processado pelo método TRD. Depois de concluídas as etapas de pré-aquecimento e processamento pelo TRD, o corpo é temperado no ar, meio salino ou óleo para o endurecimento do substrato. A conclusão do ciclo de se dá pelo revenimento do corpo de prova a fim de reduzir possíveis tensões residuais e também aumentar a tenacidade do substrato. A Figura 4 é a representação gráfica do processo.



**Figura 4 - Esquema de um típico tratamento pelo método TRD**  
**Fonte: Adaptado de ASM Handbook vol. 4 (1991)**

A reação química que forma os carbetos se dá pela alta temperatura do banho pelo contato na superfície do corpo de prova entre os elementos formadores de carbetos/nitretos e o carbono/nitrogênio resultantes da difusão no substrato, e também pela baixa energia livre (afinidade) de formação dos carbetos/nitretos. A Figura 5 demonstra a relação entre a energia livre de formação de carbonetos, a energia livre de formação de óxidos e os tipos de camadas formadas em um aço.

Para o banho no bórax, o ideal é que a energia livre de formação dos carbetos seja baixa, enquanto que a energia livre de formação de óxidos sejam maiores que a do  $B_2O_3$ .

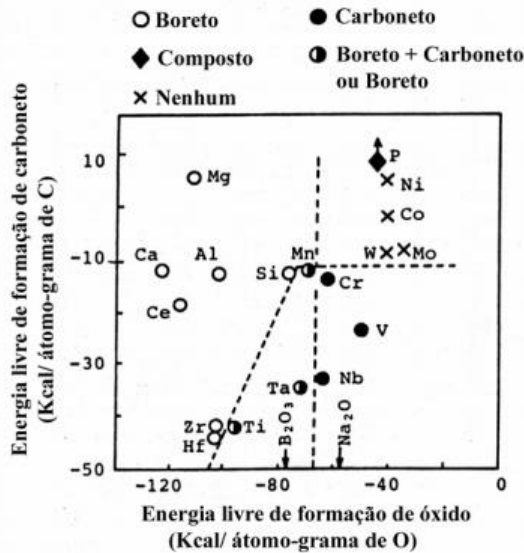


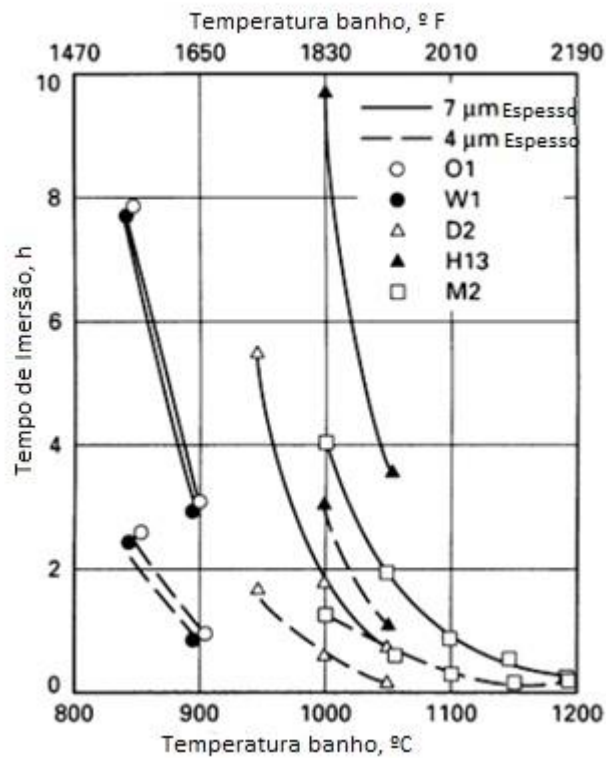
Figura 5 - Relação entre energia livre de formação de carbonetos e de óxidos dos elementos ferro-liga adicionados ao banho de bórax e os tipos de camadas formadas em um aço alto carbono a 1000°C.

Fonte: Arai(1992.)

Nota-se que o Ti, Ta e Mn possuem baixa energia de formação de carbetos, porém a energia de formação de óxidos também é baixa, a consequência disto é que pode ocorrer a redução do  $B_2O_3$ , liberando átomos de boro no banho, tornando possível a formação de boretos. Caso o elemento adicionado no banho possua alta energia de formação de carbonetos e alta energia de formação de óxidos, nenhuma camada é formada (Arai *et al.*, 1987).

O agente redutor que é utilizado no banho de sais pode ser o alumínio ou o  $B_4C$ . Quando o ferro-liga (geralmente na forma de pó) é adicionado no cadinho, óxidos de CFE são inicialmente formados (Khoee *et. al.*, 1994). Isto ocorre na interface banho/ar e é potencializada quando se agita o banho (Child *et. al.*, 1984). A principal função do agente redutor é reagir com os óxidos formados para liberar os átomos dos CFEs tornando possível a formação da camada de carbonetos. Experimentos conduzidos por Child, *et al.* (1984) demonstraram que um banho contendo Bórax ( $Na_2B_4O_7$ ) e o óxido de vanádio ( $V_2O_5$ ), sem a adição do agente redutor, não gerou camada de carboneto de vanádio.

Como este é um processo que envolve a difusão dos átomos de carbono/nitrogênio no substrato, as temperaturas do banho devem ser elevadas e seus valores ficam entre 850°C e 1050°C. O tempo de imersão também deve ser levado em conta e seus valores podem variar de 0,5h até 10h. A espessura da camada formada varia de 5µm a 15µm e depende do tempo de banho, de temperatura, de concentração de carbono no substrato e também do elemento formador de carbeto/nitreto (CFE). A Figura 6 mostra um exemplo da dependência da espessura da camada formada em relação à temperatura do banho, ao tempo de imersão e também à composição química do substrato.



**Figura 6 - Efeito da temperatura do banho, tempo de imersão e composição do substrato para formação de camadas de VC de 4µm e 7µm utilizando o método TRD.**

**Fonte: Adaptado de Arai, *et al.* (1991)**

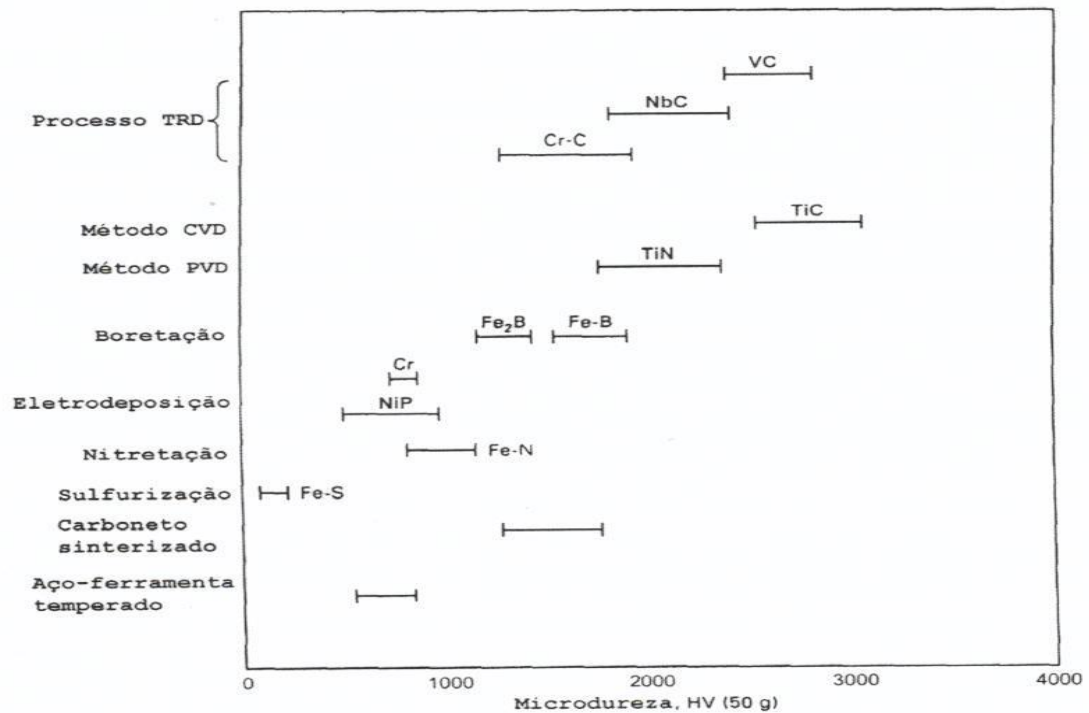
Nota-se com a Figura 6 que o parâmetro que mais influencia a espessura da camada de carbonetos, neste caso o VC, é a temperatura.

Assim como em vários tratamentos que utilizam a difusão de carbono/nitrogênio, a equação que governa o crescimento da camada formada é a seguinte:

$$\frac{d^2}{t} = K_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (1)$$

Onde  $d$  é a espessura da camada (cm),  $t$  é o tempo de imersão (s),  $K_0$  é a constante da taxa de crescimento da camada ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),  $Q$  é a energia de ativação ( $\text{KJ}/\text{Kmol}$ ),  $T$  é a temperatura absoluta (K) e  $R$  é a constante universal dos gases (Arai, 1990). Da equação acima nota-se que a espessura da camada independe da composição química do banho, desde que o mesmo contenha CFE suficiente para suprir o processo.

Os carbonetos obtidos pelo método TRD são o carboneto de vanádio (VC), carboneto de cromo ( $\text{Cr}_7\text{C}_3 + \text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) e carboneto de nióbio (NbC). A Figura 7 expõe um comparativo das microdurezas Vickers das camadas obtidas pelo método TRD em relação a outros métodos de endurecimento superficial.



**Figura 7 - Microdureza Vickers da camada de carbonetos em relação a outros métodos de endurecimento superficial.**

**Fonte: Adaptado de Arai, et al. (1991)**

É possível observar que a dureza obtida pela camada de carboneto de vanádio (VC) atingiu durezas semelhantes às daquelas do carboneto de titânio, que é produzido pelo método PVD e CVD. As camadas de carbonetos também apresentam alta resistência à corrosão já que as os carbonetos formados são quimicamente estáveis. A aplicação do carboneto de cromo é mais vantajosa quando se deseja uma resistência a oxidação em altas temperaturas (Figura 8).

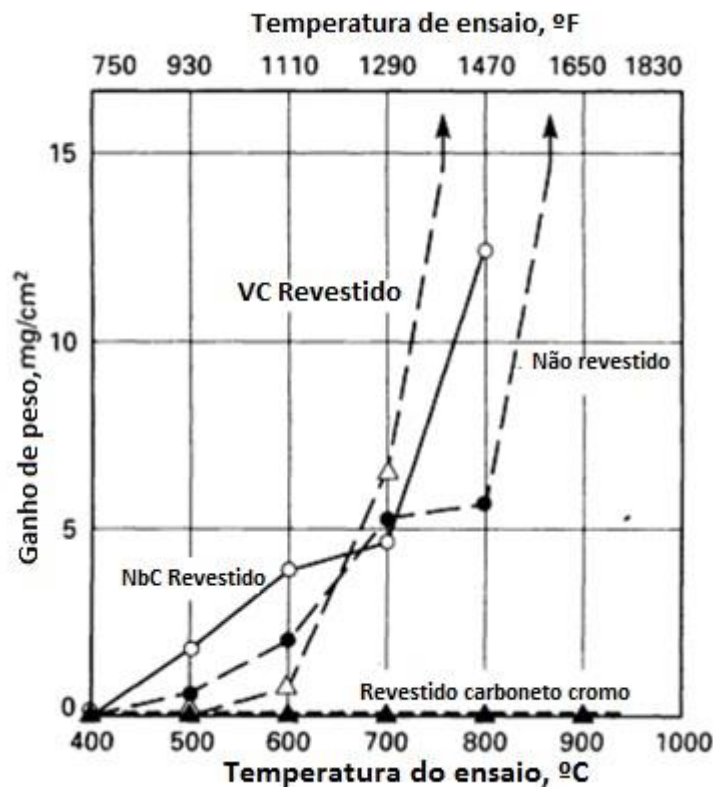


Figura 8 - Comparativo entre o ganho de peso em camadas obtidas pelo método TRD em um teste de oxidação a altas temperaturas.

Fonte: Adaptado de Arai, *et al.* (1991)

A gama de aplicações das camadas de carbonetos obtidas pelo método TRD é variada. Geralmente são aplicadas em situações onde a ferramenta necessita de uma alta resistência ao desgaste.

### 2.3 Aço rápido

Os aços rápidos têm grande importância dentro do grupo de aços para ferramentas, porque são eles que apresentam um bom comportamento sob ponto de vista de amolecimento pelo calor, mantêm sua dureza a temperaturas mesmo em temperaturas mais elevadas, característica esta obtida pelos elementos de liga tungstênio, cobalto e molibdênio. É um material tenaz e também possui elevada resistência ao desgaste. (CHIAVERINI, 1986)

Como estas ligas são aplicadas principalmente em operações de usinagem, o seu característico fundamental é a capacidade de corte, capacidade esta que está



diretamente ligada a dureza do aço. A Tabela 3 mostra a dureza a quente de alguns aços rápidos.

Tabela 3 – Dureza a quente de aços rápidos

Tipo	Dureza Rockwell C			
	À temperatura ambiente	A 593°C	A 620°C	A 635°C
M1	66	63	57,5	...
M2	65,5	62,5	58,0	56,5
M3	66	62,5	56,5	...
M10	65,5	62	57,0	...
M35	66,5	63	57,5	...
T1	66	62,5	57,5	...
T2	65,5	63	59,5	59
T9	66	64	61,5	60
T4	66	64	57,5	...
T5	65,5	63	60,0	59,5
T6	65,5	63	61,5	60
T8	66	63,5	60,5	59

Fonte: Chiaverini (1986)

Este aço possui elevada dureza no estado temperado e consiste de martensita, austenita retida e carbonetos residuais. Todos os aços rápidos possuem em sua composição cromo e vanádio. Devido ao seu alto teor de carbono e ao elevado teor de elementos de ligas formadores de carbonetos, este material possui uma resistência ao desgaste superior a de outros tipos de aços, o que lhe confere maior durabilidade dependendo da aplicação. (CHIAVERINI, 1986)

## 2.4 Furação

A furação é a operação de usinagem que utiliza brocas como ferramentas, que tem por objetivo abrir, alargar ou finalizar furos de peças por desbaste. (CHIAVERINI, 1986).

É um dos processos mais utilizados na indústria manufatureira. A maior parte das peças de qualquer tipo possui pelo menos um furo e, uma pequena parcela, já vem com o furo pronto do processo de obtenção da peça bruta (fundição, forjamento, etc.) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

## 2.5 Mecanismos de desgaste de ferramenta

Segundo Ferraresi (1977), o desgaste de uma ferramenta depende da ação de uma série de fenômenos distintos, podendo estar ligadas à natureza do material usinado, às propriedades da ferramenta e também às condições de usinagem, como aspecto dos cavacos, velocidade e força de corte e temperatura do processo.

Esses mecanismos são os seguintes: abrasão mecânica, adesão, difusão e oxidação. A Figura 9 mostra estes se comportam em função da temperatura de corte.

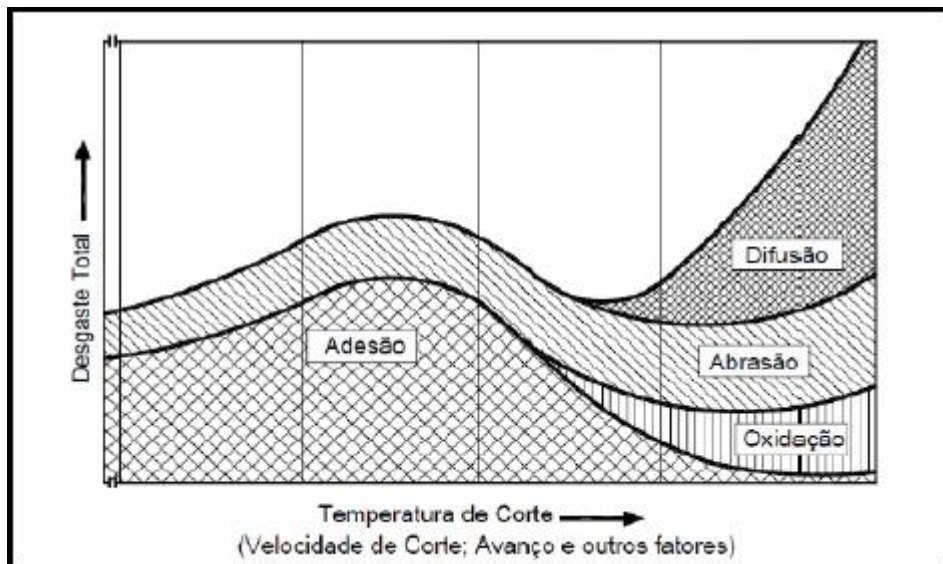


Figura 9 – Mecanismos de desgaste em ferramentas em função da temperatura de corte  
Fonte: KONIG e KLOCHE (1997)

### 2.5.1 Abrasão mecânica

A abrasão mecânica é um mecanismo de desgaste é muito comum. Os desgastes de cratera e de flanco podem ser ocasionados por esse mecanismo de desgaste. Esse mecanismo ocorre devido ao atrito da ferramenta e a peça usinada, por isso o desgaste frontal é mais proeminente, já que é a parte da ferramenta em contato efetivo com o material duro a ser usinado. Quanto maior a dureza a quente do material da ferramenta, maior resistência ao desgaste abrasivo terá (DINIZ, 2003).

### 2.5.2 Adesão

Duas superfícies metálicas em contato sob determinada pressão, velocidade e temperatura irá ter uma afinidade molecular que fará com que as superfícies tendam a continuar unidas por aderência (DINIZ, 2003).

Devido a esse fenômeno pode haver a formação da aresta postiça de corte, mas não em todos os casos. Além da formação da aresta postiça de corte há também a formação do desgaste ao entalhe devido a esse fenômeno (DINIZ, 2003).

Em geral, a zona de escorregamento, o corte interrompido, a profundidade de usinagem irregular ou a falta de rigidez promovem o fluxo irregular do cavaco e, portanto, facilitam o mecanismo de desgaste por aderência (DINIZ, 2003).

### 2.5.3 Difusão

A difusão entre ferramenta e cavaco é um fenômeno microscópico ativado pela temperatura na zona de corte. A difusão no estado sólido consiste na transferência de átomos de um metal duro a outro (DINIZ, 2003).

A condição na zona de corte é favorável às reações de difusão. Essas reações podem afetar o mecanismo do desgaste de duas maneiras:

- a) Desgaste devido à transferência do material da ferramenta ao cavaco, em consequência das reações de difusão.
- b) Desgaste da ferramenta devido à fragilização da estrutura do metal duro, em consequência das reações de difusão, seguido de uma abrasão mecânica (FERRARESI, 1977).

Esse mecanismo de desgaste tem grande influência na formação do desgaste de cratera quando se utilizam elevadas altas velocidades de corte.

### 2.5.4 Oxidação

Durante a usinagem ocorre o aquecimento da área de corte, em condições normais inclusive, junto à aresta cortante formando uma película de óxido

(FERRARESI, 1977). Isso ocorre devido à presença de água ou ar nessa região com alta temperatura que promovem a oxidação dos metais.

Dependendo da composição do metal utilizado nas ferramentas há maior ou menor influência desse fenômeno devido às propriedades dos componentes. Ele ocorre principalmente na saída do contato cavaco-ferramenta devido à presença maior do oxigênio.

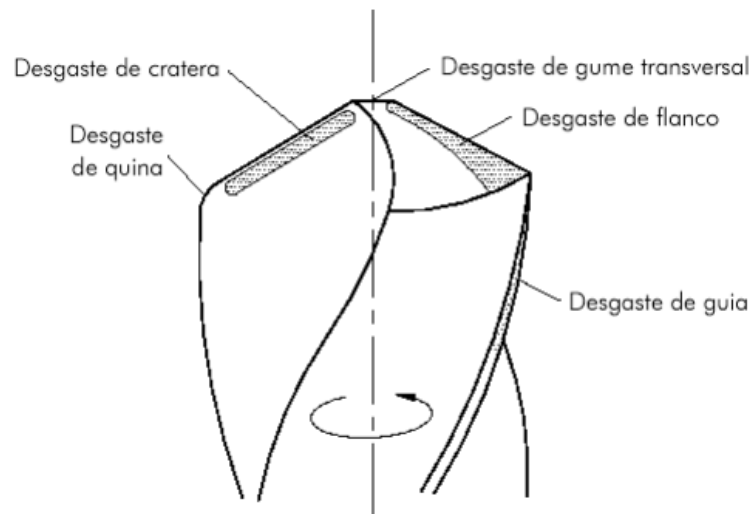
### **2.5.5 Mecanismos de desgaste de ferramentas em aço-rápido**

Ferramentas de aço rápido são muito utilizadas na usinagem da indústria metal-mecânicas que requerem uma elevada tenacidade da cunha cortante. As velocidades de corte usuais do aço rápido atingem velocidades de 45m/min. Essas ferramentas possuem usualmente três tipos de cavaco: de cisalhamento, cavaco contínuo com aresta postiça de corte, e cavaco contínuo sem aresta postiça de corte (FERRARESI, 1977). Dependendo do cavaco formado durante a usinagem podemos deduzir qual o grau de deformação do material usinado, devido a essa distinção existirem diferentes zonas de contato e, conseqüentemente, diferentes mecanismos de desgaste.

O desgaste pode ser relacionado com o tipo de cavaco formado. Por exemplo, durante a usinagem na presença do cavaco de cisalhamento com o aumento de velocidade, quando é atingido o desgaste máximo começa a formação da aresta postiça de corte e o cavaco passa a ser cavaco contínuo com aresta postiça. Para baixas velocidades não se observam grandes diferenças entre ferramentas de aço rápido e metal duro para baixas velocidades, mas com velocidades maiores a diferença se evidencia.

## **2.6 Tipos de desgaste em brocas**

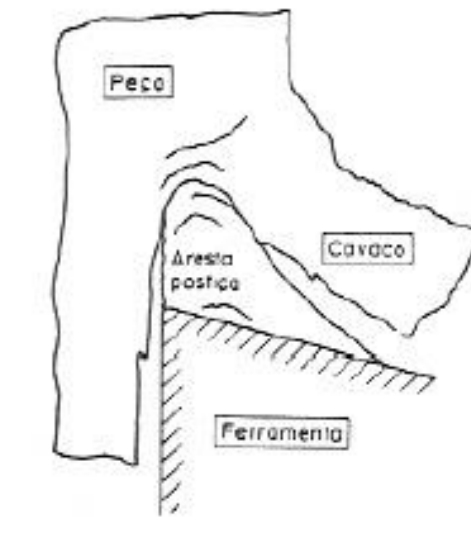
Alguns tipos de desgaste de brocas serão descritos neste item. A Figura 10 mostra os principais. Convencionalmente mede-se o desgaste da ferramenta no plano ortogonal da ferramenta.



**Figura 10 – Principais desgastes encontrados em brocas**  
**Fonte: Bork (1995)**

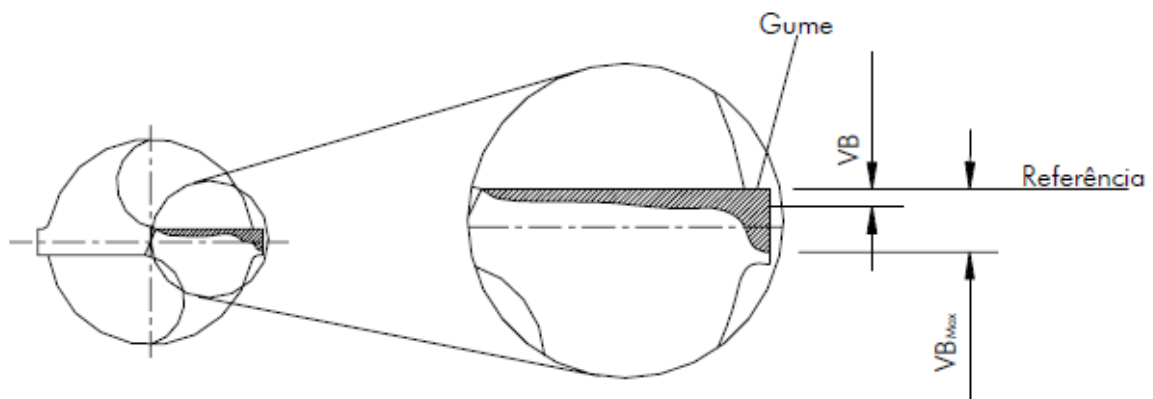
a) Gume postiço: Forma-se na superfície de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta como mostrado na Figura 11, uma camada de cavaco que, permanecendo aderente à aresta de corte, modifica seu comportamento com relação à força de corte, acabamento superficial da peça e desgaste da ferramenta (DINIZ, 2003). Decorrente do mecanismo de adesão, o grande problema do gume postiço decorre principalmente quando este atinge dimensões críticas e provoca o cisalhamento da sua parte dianteira.

Seu processo de formação ocorre devido à pressão na zona de aderência de corte, que faz com que o cavaco e a ferramenta se soldem por um momento e o cavaco acaba se prendendo na superfície de saída da ferramenta. Com a porção do cavaco aderido à ferramenta, ele acaba se deformando e, com isso, encruando. Com o aumento de sua resistência mecânica se torna a chamado gume postiço, tendo a tendência de aumentar no decorrer da usinagem até o cisalhamento. As partes cisalhadas podem ser eliminadas com o cavaco ou aderidas à superfície da peça prejudicando o acabamento superficial da mesma. Além disso, esse cisalhamento do gume postiço pode levar partículas da ferramenta no processo (DINIZ, 2003).



**Figura 11 – Gume pósigo**  
**Fonte: Diniz (2003)**

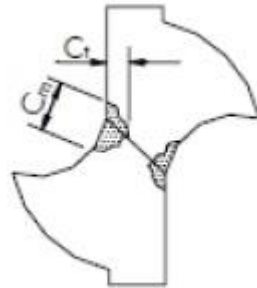
b) Desgaste frontal ou de flanco ( $VB$ ,  $VB_{\text{máx}}$ ): Ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre ferramenta e peça. É o tipo de desgaste mais comum. Todo processo de usinagem causa desgaste frontal (DINIZ; MARCONDES; COPPINI,1999). A Figura 12 mostra o desgaste frontal. Quanto maior a velocidade de corte maior é o desgaste de flanco.



**Figura 12 – Desgaste de flanco**  
**Fonte: SCHROETER (1999)**

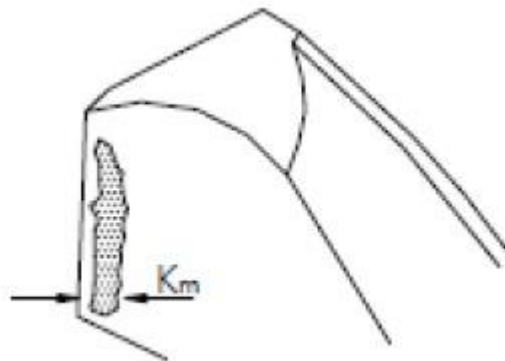
c) Desgaste do gume transversal de corte: A deformação plástica da aresta de corte mostrado na Figura 13 é um dano causado por forças de corte excessivas e altas temperaturas. Estes fatores causam a deformação plástica, que reduz o acabamento do furo e pode resultar na quebra das

arestas de corte (Diniz; Marcondes; Coppini, 1999). Para evitar esse tipo de desgaste é necessário um material com maior dureza a quente e maior resistência à deformação plástica.



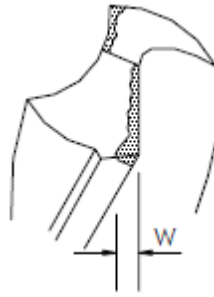
**Figura 13 – Desgaste da gume transversal de corte**  
**Fonte: Kanai (1978)**

d) Desgaste de cratera ( $K_m$ ): É o tipo de desgaste que ocorre na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito entre ferramenta e cavaco (DINIZ; MARCONDES; COPPINI,1999). Esse desgaste pode ocasionar quebra de ferramenta. O desgaste é mostrado pela Figura 14.



**Figura 14 – Desgaste de cratera**  
**Fonte: Kanai (1978)**

e) Desgaste de quina ( $W$ ) – Nas quinas predominam as solicitações térmicas devidas à maior velocidade de corte, ao corte dos gumes principais e ao calor gerado pelo atrito dos cavacos contra a superfície de saída, assim como o atrito das guias da ferramenta contra a parede do furo (Figura 15) (SCHROETER et al., 1999).



**Figura 15 – Desgaste de quina**  
**Fonte: Kanai (1978).**

f) Lascamento: É um tipo de avaria da ferramenta, pois ao contrário dos desgastes frontal e de cratera que retiram continuamente partículas muito pequenas da ferramenta, no lascamento partículas maiores são retiradas de uma só vez (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999). Com maior ocorrência quando há material frágil ou aresta de corte pouco reforçada.

g) Trincas: As trincas são fissuras na ferramenta de corte que podem ocorrer devido às variações térmicas ou mecânicas. Quando às trincas tem origem térmica (variação da temperatura), elas ocorrem perpendicularmente à aresta de corte e quando tem origem mecânica são paralelas à aresta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

h) Quebra: Todos os desgastes anteriores podem ocasionar a quebra da ferramenta. Algumas vezes, a quebra pode ocorrer inesperadamente devido à alguns fatores como: ferramenta muito dura (em geral, quanto mais resistente ao desgaste é a ferramenta, menos tenaz e menos resistente ao choque ela é), carga excessiva sobre a ferramenta, raio de ponta, ângulo de ponta ou ângulo de cunha pequenos, corte interrompido, parada instantânea do movimento de corte, entupimento dos canais de expulsão de cavacos ou dos bolsões de armazenamento dos cavacos (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Resumidamente, podemos observar na Tabela 5 os tipos de desgaste, suas possíveis causas e ações para a minimização do desgaste.



Tabela 4 – Resumo de tipos de desgaste

Tipo de desgaste e/ou avaria	Possíveis causas	Ações para minimização
Desgaste de flanco	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de corte muito alta ou muito baixa;</li> <li>• Resistência ao desgaste insuficiente;</li> <li>• Abrasão;</li> <li>• Aresta postiça de corte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução da velocidade de corte;</li> <li>• Seleção de matérias mais resistentes ao desgaste;</li> <li>• Aumento da velocidade de corte se o desgaste for associado ao gume postiço de corte</li> </ul>
Desgaste de entalhe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oxidação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleção de fluido de corte com agentes oxidantes;</li> <li>• Redução da velocidade de corte</li> </ul>
Desgaste de cratera	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difusão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleção da classe da ferramenta que possua cobertura de <math>Al_2O_3</math></li> </ul>
Deformação plástica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altas temperaturas combinadas com altas pressões na região de corte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleção de material com maior dureza a quente;</li> <li>• Redução da velocidade de corte.</li> </ul>
Trincas de origem mecânica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variação excessiva de esforço na aresta de corte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleção de ferramentas mais tenazes;</li> <li>• Redução da velocidade de avanço;</li> <li>• Aumento da estabilidade.</li> </ul>
Trincas de origem térmica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excessiva Variação de temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleção da ferramentas mais tenazes;</li> <li>• Aplicação do fluido de corte em abundância.</li> </ul>
Lascamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ferramenta muito frágil</li> <li>• Geometria da ferramenta muito fraca</li> <li>• Choques da ferramenta com a peça</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleção de ferramentas mais tenazes;</li> <li>• Aumento do ângulo de ponta, raio de ponta e/ou ângulo de cunha;</li> <li>• Suavização do primeiro contato da ferramenta com a peça.</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Diniz (2003)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos utilizados no presente trabalho para alcançar os objetivos estão resumidos na Figura 16.

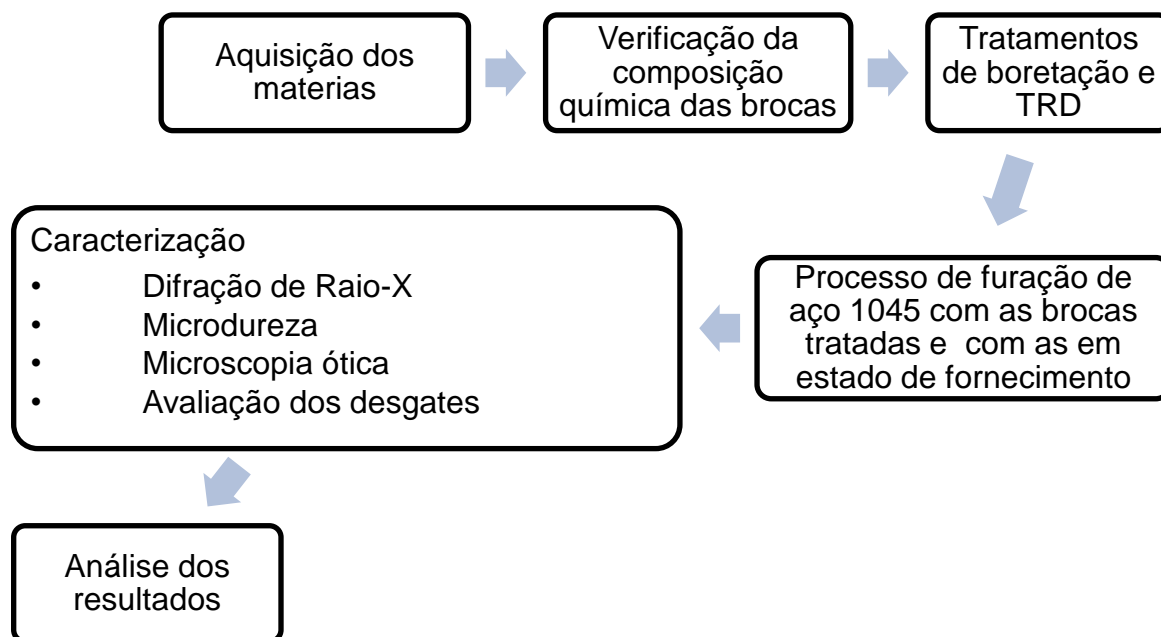


Figura 16 – Fluxograma dos métodos do projeto.  
Fonte: Autoria própria (2015)

A avaliação dos desgastes será feita pela análise da ponta da ferramenta numa imagem ampliada através de uma lupa própria para esse tipo de análise. É realizada na broca no estado de fornecimento e tratada, antes e após a bateria de furos para uma comparação.

#### 3.1 Materiais

As ferramentas utilizadas para tratamento foram brocas de aço rápido ABNT NBR 6189, tipo M2 com diâmetro de 5 mm, do fabricante Vonder e dois bits do mesmo material. Esse aço M2 pertence de acordo com a norma AISI-SAE ao sub-grupo molibdênio.

Para a realização do tratamento de boretação foi utilizado o composto de borato de sódio deca-hidratado ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) do fornecedor Synth e alumínio como agente redutor. O banho de TRD foi preparado também com uma composição

de borato de sódio e alumínio, acrescentando-se também o FeV (ferro vanádio). Para ambos, os materiais foram inseridos em um cadinho fornecido pela UTFPR.

O material usinado pelo processo de furação é o aço SAE 1045 adquirido na empresa Armaço, na forma de discos com diâmetro de 75,4 mm e 35 mm de espessura.

Para a análise metalográfica foram utilizados para preparação das amostras os seguintes materiais.

- Baquelite;
- Lixas de granulação 220, 320, 400 e 600;
- Alumina 0,1  $\mu\text{m}$ ;
- Nital 2%

## **3.2 Metodologia**

Após a aquisição dos materiais, foi realizada uma avaliação química da broca a fim de determinar se atende a real composição química de aço rápido M2. Para isto o material foi encaminhado a empresa Spectroscan para realização de espectrometria óptica. Resultado informado na Tabela 8

Em seguida foram encaminhadas para tratamentos de boretação e TRD no laboratório de materiais da UTFPR. Basicamente o que difere entre eles é a composição dos banhos. Cada tratamento foi aplicado a oito brocas e um bit, este foi utilizado no presente estudo somente para facilitar o a análise por difração de Raio-X.

### **3.2.1 Tratamento termo reativos em banhos de bórax**

O tratamento termo reativo ocorreu em banhos compostos de bórax fundido com adição de ferro liga e alumínio ou apenas de alumínio, conforme mostrado na Tabela 6.

**Tabela 5 – Composições dos banhos usados nos tratamentos termoreativos**

Material	Composição do banho (% massa)
1. Ferro-liga + Alumínio	70% Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> + 15% Fe-V + 15%Al)
2 Alumínio	85% Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> + 15%Al)

Fonte: Aatoria própria (2016)

Em ambos, para a fusão da mistura, o banho foi aquecido a 950°C no forno. Primeiramente é aquecido o Boráx® até sua completa fusão, o material foi inserido aos poucos no cadinho para que não houvesse algum tipo de vazamento do material no forno. Após o alumínio deve ser fundido para boretação, e alumínio e ferro vanádio para TRD. O alumínio atua como agente redutor para reagir com os óxidos e possibilitar a formação de carbonetos.

A técnica empregada nos tratamentos consiste em, após a preparação do banho, manter os corpos de prova imersos a 1000°C por cinco horas na solução. As amostras são imediatamente em um banho de óleo em temperatura ambiente após a retirada do forno. Para a boretação, duas brocas foram retiradas após duas horas de tratamento para análise da influência do tempo no processo.

Após estas etapas realizou-se um duplo revenimento a 550° C para ambos os processos por duas horas.

As brocas passaram por um processo de limpeza após os tratamentos, que consiste em retirar manualmente os resíduos mais espessos e posterior fervura em água

Das brocas tratadas, algumas foram separadas para preparação dos corpos de prova, outras foram encaminhadas para o procedimento de furação de discos de aço SAE 1045 a ser realizado no centro de usinagem CNC da UTFPR no equipamento Tormach CNC modelo PCNC1100 Series 3.

A bateria de testes de furação utilizou os parâmetros da Tabela 7.

**Tabela 6–Parâmetros de corte para furação**

Parâmetros	Valores
Velocidade de corte (m/min)	25
Avanço eixo principal(mm/min)	0,06
Profundidade (mm)	25

Fonte: Aatoria própria (2016)

Teve-se o cuidado de utilizar os mesmos parâmetros, o mesmo operador e o teste foi realizado de maneira ininterrupta para evitar que outras variáveis influenciassem no resultado.

A preparação dos corpos segue a sequência da Figura 17.



**Figura 17 – Fluxograma da preparação dos corpos de prova.**

**Fonte: Autoria própria (2016)**

Seguindo o fluxograma acima, os equipamentos utilizados foram: cortadora metalográfica Arotec Arocor 60, embutidora Struers Predopress, lixadeira metalográfica Struers e politriz metalográfica Struers.

Sendo os corpos preparados, estes foram encaminhados para análises por microscopia ótica e de perfil de dureza que foram realizadas nos equipamentos Olympus BX51M e micodurômetro Shimadzu modelo HMV-2, respectivamente.

Para a medição da microdureza Vickers foi utilizada uma carga de 0,1 N para boretação, TRD e EF durante 10 segundos. Foi coletado 03 medições de cada posição e uma média delas foi considerada.

Os ensaios de difração de raio-X foram realizados na superfície planas dos bits no equipamento o da marca Shimadzu do modelo XRD-7000, configurado com o tubo de raio-x de radiação cromo-alfa – confirmar utilizando uma voltagem de 40 V e corrente de 30 mA. O ângulo de varredura variou de 20° a 120°.

A profundidade da camada tratada também foi medida no microscópio Olympus modelo BX51RF.

Todas as caracterizações foram realizadas com as brocas tratadas e com as em estado de fornecimento

Tantos os tratamentos, processo de usinagem e análises experimentais foram realizados nos laboratórios da UTFPR.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A composição química da broca de aço rápido M2 utilizada no presente trabalho foi determinada através de espectroscopia de emissão ótica realizada na SpectroScanTecnologia de Materiais Ltda. E é apresentado na Tabela 8, onde se verifica que a composição química obtida está próxima à da composição nominal.

Tabela 7–Composição química do aço rápido M2

Aço rápido M2	C(%)	Si(%)	Mn(%)	Cr(%)	Mo(%)	W(%)	V(%)
Nominal	0,9	0,3	0,3	4,20	5,0	6,20	1,90
Obtida	0,924	0,396	0,20	3,79	4,89	5,62	1,94

Fonte: SpectroScan (2016)

A Figura 18 mostra a metalografia da amostra em estado de fornecimento. Os aços rápidos são constituídos basicamente de duas fases, uma matriz tenaz e materiais de reforços presentes em uma segunda fase dispersa, composta por carbeto. A amostra perfaz o perfil, do aço AISI M2, isto é, microestruturas com pequenos precipitados de carbonetos de molibdênio dispersos sobre a matriz (austenita e martensita).

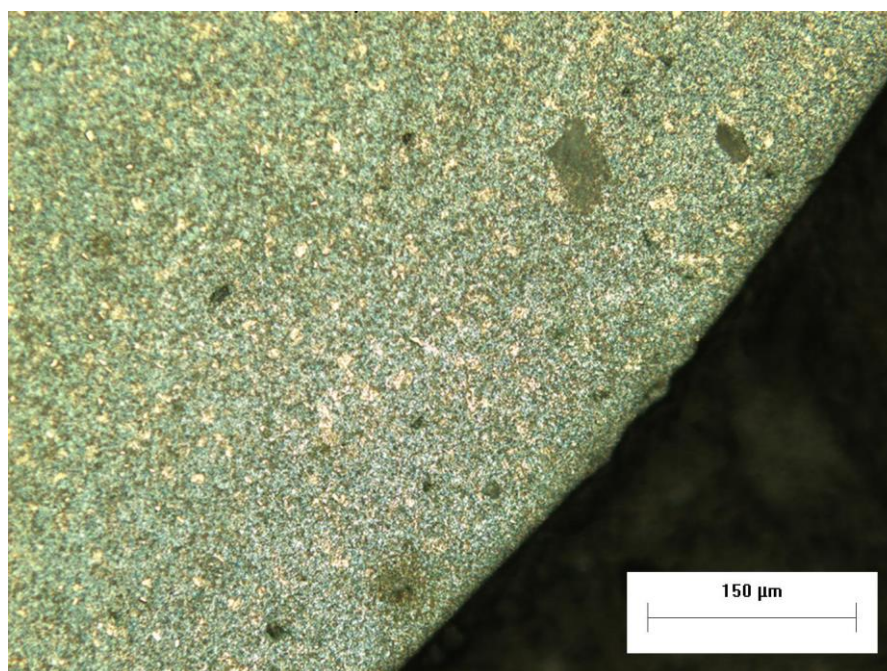


Figura 18 – Amostra em estado de fornecimento

Fonte: Autoria própria (2016)

#### 4.1 Boretação

No primeiro banho, para evitar a fragilização da haste das brocas, optou-se por inserir apenas o corpo das mesmas. Neste banho a região de contato na superfície do banho com a haste foi praticamente toda corroída como mostra a Figura 19 e, além disso, algumas das brocas quebraram logo após a retirada do banho. As condições de elevada temperatura (aceleram reações químicas) e ambiente salino potencializam a ocorrência da corrosão.



**Figura 19 – Broca tratadas recém retiradas do forno, quebradas apenas pelo manuseio. Broca com corrosão na haste, na qual foi inserido somente a área de corte.**

**Fonte: Aatoria própria (2016)**

Um novo banho foi preparado desta vez com as brocas totalmente imersas. Já pode ser percebida logo no fim do tratamento uma fragilidade das ferramentas visto que algumas também já saíram quebradas do banho e outras se quebraram com um simples manuseio de limpeza.



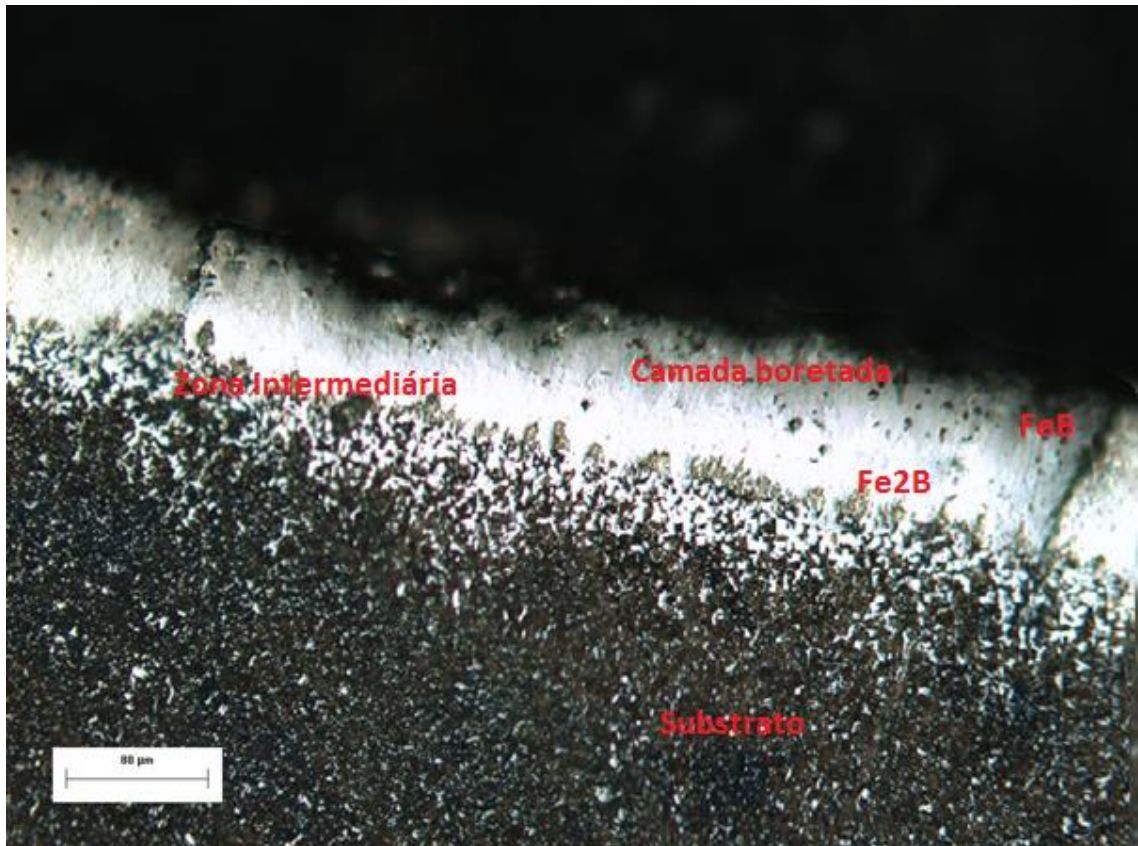
**Figura 20–Brocas após limpeza dos resíduos dos banhos de tratamento em aço M2 (a) Boretação, (b) TRD**

**Fonte: Autoria própria (2016)**

A Figura 20 mostra as brocas tratadas após limpeza. Após ambos os tratamentos elas estavam com vários resíduos sobre elas, conforme Figura 19.

Para aquelas que não estavam danificadas, após a preparação da amostra, foram encaminhadas para as primeiras análises através da microscopia ótica e podem ser verificadas a partir da Figura 21 para boretação.





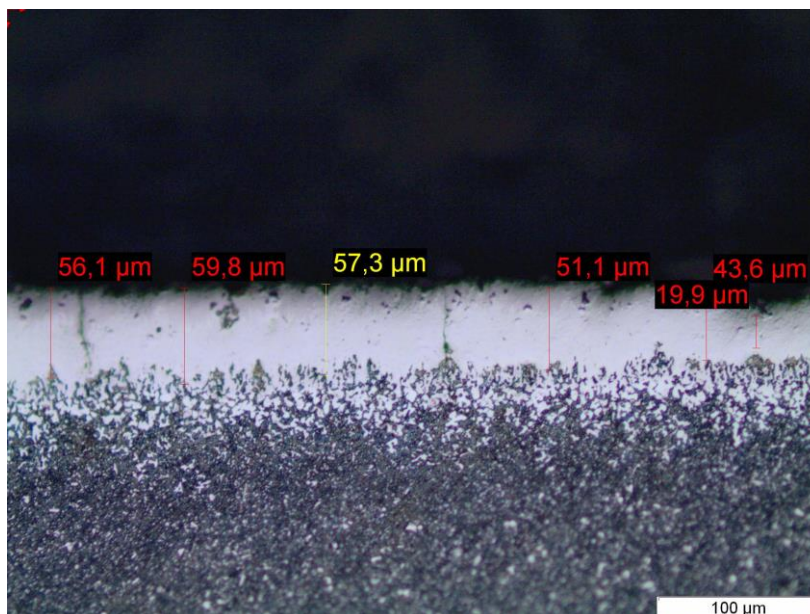
**Figura 21 - Tratamento de boretção**  
**Fonte: Aatoria própria (2016)**

Pode ser percebido pela figura três regiões distintas: uma camada boretada; uma zona intermediária entre a camada e o substrato, e o substrato.

O substrato possui uma estrutura martensítica. A camada boretada possui uma interface irregular com este.

Foi realizada a análise da espessura de camada no tratamento de boretção como mostrado na Figura 22.

É válido mencionar a presença de várias trincas no decorrer da camada boretada, que podem ter surgido pelos grandes gradientes térmicos formado no interior da camada durante o severo resfriamento. O estado de tensão desta provavelmente estava elevado.



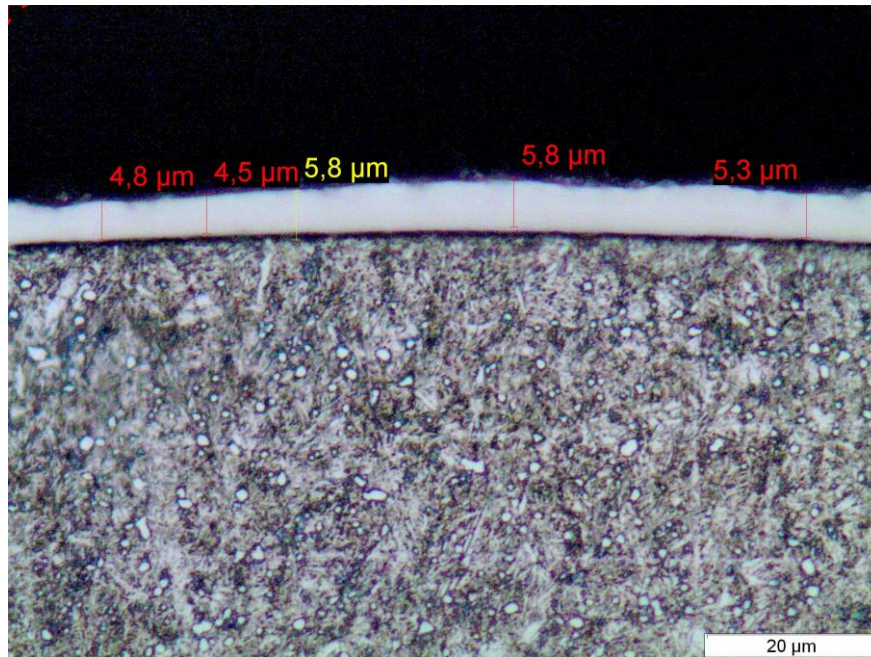
**Figura 22 – Tratamento de boretação por cinco horas**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

É possível verificar que a camada de boretação ficou com uma espessura média de 54  $\mu\text{m}$  para um tratamento a 1000°C durante cinco horas. Segundo mostrado na Figura 3, este valor ficou dentro do esperado que era entre 40 $\mu\text{m}$  e 80 $\mu\text{m}$  para as mesmas condições.

## 4.2 TRD

Um banho foi preparado com as brocas totalmente imersas, utilizando da experiência adquirida no tratamento com a boretação.

Para o tratamento com o TRD as brocas apresentaram a mesma fragilidade do banho com boretação, quebrando após o banho ou durante o manuseio e no processo de limpeza. As brocas que permaneceram intactas foram direcionadas para a realização das análises.



**Figura 23 – Tratamento de TRD**  
**Fonte: Autoria própria (2016) (tirar esta foto)**

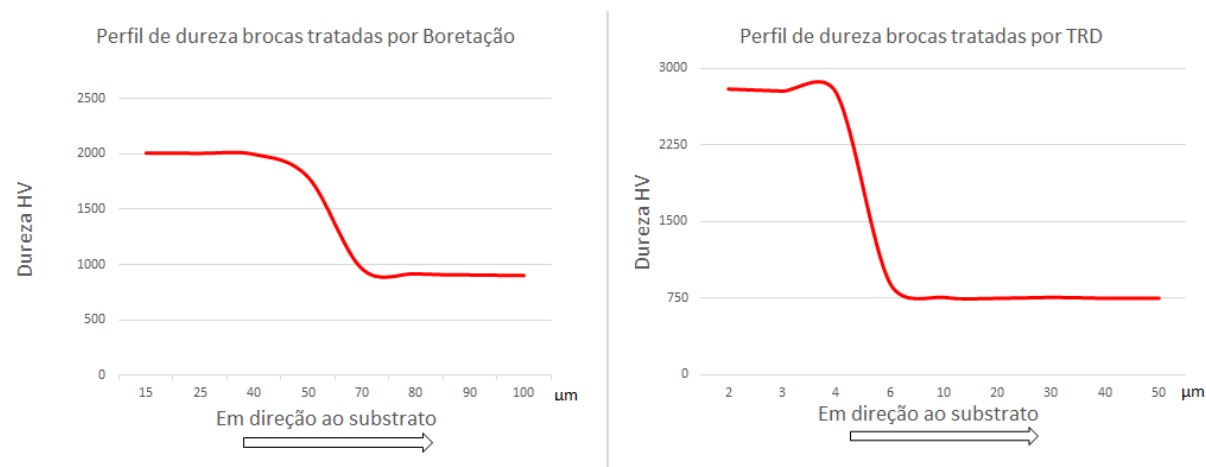
A camada tratada e o substrato podem ser facilmente observados na Figura 23. Há uma distinta e plana interface sem uma zona de transição. O substrato possui uma estrutura martensítica com carbonetos precipitados. Martensita é extremamente dura e frágil.

A espessura de camada do tratamento ficou em aproximadamente 5 $\mu$ m. Pode-se concluir a partir da Figura 6 que este resultado obtido corrobora a teoria de Arai (1991)

### 4.3 Perfil de dureza

Quando analisado o perfil de dureza dessas camadas, verificou-se que as durezas medidas estão muito próximas das esperadas para cada tratamento. A dureza do tratamento de boretação esperada pela literatura fica entre 1000 e 2000HV e o tratamento de TRD fica entre 2000 e 3000 HV. Na Figura 24 está o perfil de dureza para os dois tratamentos medidos nas amostras.

Para a medição das amostras, foram realizadas penetrações desde as extremidades da amostra, onde estão presentes as camadas, até o núcleo das mesmas.



**Figura 24 – Perfil de dureza de brocas tratadas por boretação (a) e TRD em (b).  
Fonte: Autoria própria (2016)**

Para a boretação, a dureza chegou a atingir 2010 HV e já para o outro tratamento, 2888 HV.

Pode-se perceber a queda brusca da dureza logo após a zona de difusão dos tratamentos, mostrando que o substrato é bem mais mole em relação às camadas.

Levando em consideração que as brocas em estado de fornecimento apresentavam uma dureza em seu corpo de aproximadamente 1000 HV, conforme Tabela 9, os resultados encontrados chegaram a ser quase 3 vezes superiores, como mostra a figura acima para TRD.

**Tabela 8 – Microdureza Vickers para broca em estado de fornecimento**

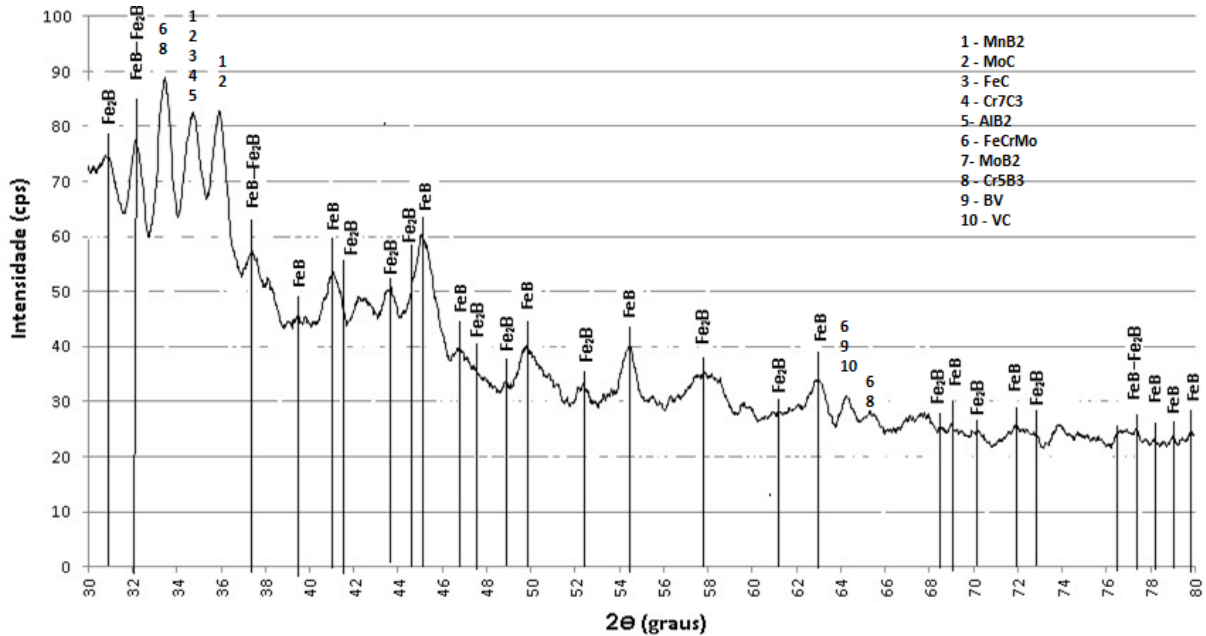
<b>Parte da broca</b>	<b>Microdureza HV (Carga 0,1 N)</b>
Corpo	890
Haste	300

**Fonte: Autoria própria (2016)**

Os valores da tabela acima foram obtidos pela média de três medições. Essas durezas foram avaliadas ao longo de toda a amostra, para verificar que o valor é linear em toda a peça.

#### **4.4 Difração de Raio-X**

Em relação aos compostos químicos formados, a Figura 25 obtida pela difração de raio-X mostra que as brocas tiveram sucesso nos resultados obtidos.



**Figura 25– Difração por raio X da camada de boretção**

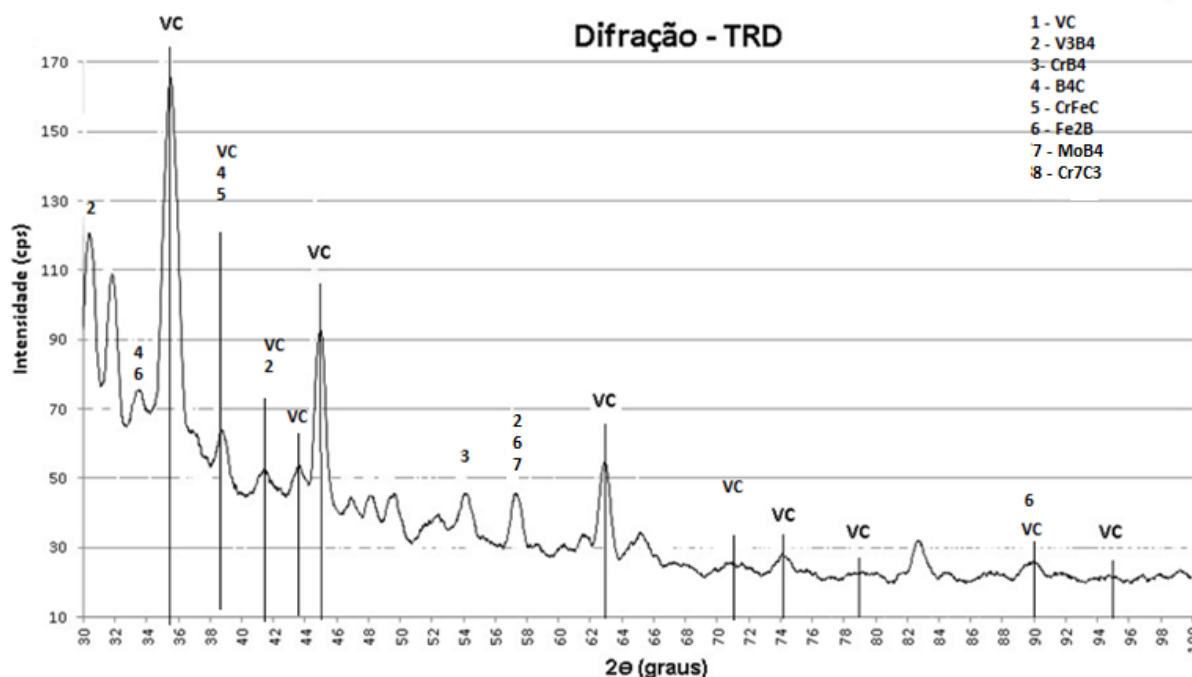
**Fonte: Autoria própria (2016)**

Pela difração por raio-X da camada boretada, no eixo X temos os ângulos e os picos representam os componentes que esperamos encontrar na camada, o  $\text{Fe}_2\text{B}$  e o  $\text{FeB}$ , nos ângulos, conforme a teoria, temos os componentes que podem ser formados pelo tratamento.

A formação de uma camada única de  $\text{Fe}_2\text{B}$  é preferível à uma dupla camada, com fase  $\text{FeB}$ . Isso se deve ao fato do  $\text{FeB}$  ser mais frágil e também porque os dois boretos têm coeficiente de expansão térmica diferentes e quando formam a camada dupla, alternam tensões de compressão e de tração, podendo levar a formação de trincas.

Outro ponto a ser analisado é que as duas fases apresentam propriedades mecânicas distintas, com diferenças significativas em seus módulos de elasticidade e coeficientes de expansão térmica. Portanto, estes fatores podem interferir na furação, visto que pode haver trinca na interface das duas fases e provocar a quebra da ferramenta.

Já para TRD, o resultado da difração por raio-X pode ser encontrado na Figura 26. Os picos de VC, principal componente esperado formado pelo tratamento, e outros compostos estão identificados na figura.



**Figura 26– Difração por raio X da camada de TRD**

Fonte: Autoria própria (2016)

#### 4.5 Teste de Furação

Foi realizado uma bateria de testes de furação e os resultados são demonstrados na Tabela 10.

**Tabela 9–Resultados das furações com brocas tratadas**

Broca nº	Tratamento	Nº Furos/Observação
1	Boretção 2h	8 furos
2	Boretção 5h	Quebra no primeiro furo
3	Boretção 5h	Quebra no primeiro furo
4	Boretção 5h	Quebra no segundo furo
5	Boretção 5h	Quebra no primeiro furo
6	TRD 5h	Quebra no primeiro furo
7	TRD 5h	Quebra no segundo furo

8	Estado fornecimento	20 furos sem quebrar
---	---------------------	----------------------

**Fonte: Autoria própria (2016)**

É notável perceber que tanto as brocas em TRD, quanto em boretação, no tratamento de cinco horas ficaram extremamente fragilizadas, não conseguindo passar do segundo furo sem quebrar. Mesmo o duplo revenimento não foi suficiente para diminuir as tensões internas ocasionadas pela tempera. Todas as quebras ocorreram entre o corpo e haste da broca.

A broca tratada com duas horas de boretação conseguiu realizar oito furações, tendo melhor desempenho no teste, mas mesmo assim com resultados muito inferiores. Como o objetivo do trabalho era comparar a vida útil da broca tratada com a broca em estado de fornecimento, o teste da broca em EF foi interrompido em vinte furações, pois o desempenho das brocas tratadas ficou muito aquém do esperado.

Alguns fatores devem ser analisados com mais atenção e podem ser as causas da não obtenção de um resultado conforme esperado.

Primeiramente, o material e tamanho das brocas de certa forma deixa o estudo mais severo. Diâmetros maiores e materiais mais tenazes, como aço ferramenta, poderiam ser utilizados para o estudo de aplicação destes tratamentos.

Pelo tipo de quebra que ocorreu nas brocas, é evidente que esta não foi provocada somente pelas camadas que foram formadas. O substrato foi modificado e provavelmente sua tenacidade foi comprometida.

A fragilidade e diminuição da tenacidade podem ter surgido pelos grandes gradientes térmicos formado no interior da camada durante o severo resfriamento: grande e rápida variação de temperatura ocasionada pelo resfriamento a óleo, gerando um elevado estado de tensão.

Para o tratamento em si alguns cuidados deveriam ser tomados. A começar por uma preparação do metal que poderia ter sido normalizado antes do tratamento. Isto refinaria a estrutura do aço, removendo a austenita retida, que em tempera tende a se expandir mais e gerar um estado de tensões que dificulta a usinagem e pode provocar uma quebra antecipada da ferramenta.

Outro cuidado é na imersão das brocas nos banhos. Estas devem ser colocadas horizontalmente no cadinho, para evitar empenamento, e somente seu corpo deve ser imerso, evitando assim a fragilização desnecessária da haste.

Com as espessuras de camadas encontradas, pode-se notar que as brocas tiveram suas dimensões modificadas, como raio de aresta, e isto impacta negativamente a furação. Não pode ser considerada como causa da quebra, visto que esta ocorreu no primeiro contato entre ferramenta e material a ser usinado, mas no caso de a ferramenta ter resistido se teriam outras conseqüências, que segundo o autor Caspar Stemmer (1995) podem ser:

- Podem ocorrer vibrações torcionais, lascamentos dos gumes ou quebra das brocas, devido a forças transversais desequilibradas que aumentam a pressão entre uma guia e parede de furo, produzindo maior atrito , calor e desgaste;
- Os gumes podem se desgastar desuniformemente e cavacos saem com dimensões desiguais

Desta forma, elas deveriam ser afiadas após os tratamentos, mas somente o de boretação, visto que uma reafiação das tratadas por TRD (pequena espessura de camada) retiraria toda a camada formada.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo a produção de camadas de carbonetos e de boretos no aço AISI M2, por meio de tratamento termo reativo em banhos de bórax e as suas caracterizações principalmente em termos da determinação de suas composições químicas e avaliação de sua vida útil através de ensaios de furação. Conforme os resultados, chegou-se às seguintes conclusões:

A espessura de camada atingiu o valor coerente com o esperado para ambos os tratamentos, variando de 5,24  $\mu\text{m}$  em TRD a 53,6  $\mu\text{m}$  em boretação.

As durezas estão dos objetivos, atingindo 2010 HV para boretação e 2888 HV para TRD;

Os componentes químicos FeB e VC foram gerados pelos tratamentos e identificados nas camadas através da difração raio-X.

Os ensaios de furação não apresentaram resultados satisfatórios, visto que os tratamentos levaram a fragilização excessiva das amostras, diminuindo a vida útil em relação ao estado de fornecimento.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se para trabalhos futuros analisar mais profundamente a influência de cada um dos parâmetros sobre os resultados de forma que se possa obter o que foi esperado no início do projeto, ou seja, aumento da vida útil da ferramenta. São eles:

- Tipo de têmpera → Mudar para um resfriamento a ar para diminuir a fragilização;
- Tempo e temperatura → Diminuir tempo e temperatura para diminuir as camadas formadas.
- Composição química do banho → Modificar percentual de alumínio para preparação do tratamento e desta forma diminuir a liberação dos átomos dos CFEs, dificultando a formação da camada de carbonetos.
- Normalização do material antes do tratamento.
- Imersão horizontal das ferramentas somente do corpo, para evitar empenamento e fragilização das hastes;
- Reafiação das brocas tratadas por boretação;

## 7 REFERÊNCIAS

ARAI, T. **Tool materials and surface treatments**. Journal of Materials Processing Technology, 35, Elsevier, p. 515-528, 1992

ARAI, T. **TRD Method**. Proceedings of the Japan International Tribology Conference, p. 1965-1970, 1990.

ARAI, T.; FUJITA, H.; SUGIMOTO, Y.; OHTA, Y. **Diffusion carbide coatings formed in molten Borax systems**. J. Mater. Eng., v.9, n.2, p. 183-189, 1987.

ARAI, T.; HARPER, S. **Thermoreactive Deposition/Diffusion Process for Surface Hardening of Steels**. ASM Handbook., ASM International, Materials Park, Ohio, v.4,p, 448-453, 1991.

ASM HANDBOOK, **Volume 4 – Heat treating**. ASM Internacional, 1991.

BORK, Carlos Alberto. **Otimização de variáveis de processo para a furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541**. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. USFC. Florianópolis, 1995.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7 ed. São Paulo: ABM, 1996.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica** Vol. III. 2.ed. São Paulo: Editora McGrawHill LTDA, 1986.

CHIAVERINI, Vicente. **Tratamentos térmicos das ligas ferrosas**. 2.ed. São Paulo: Editora ABM Associação Brasileira de Metais, 1987.

DINIZ, Anselmo E.; MARCONDES, Francisco C.; COPPINI, Nivaldo L. **Tecnologia de usinagem dos materiais**. 5. ed., São Paulo: MM Editora LTDA., 1999.

DINIZ, Anselmo. **Tecnologia de Usinagem dos Materiais**. 4.ed., São Paulo: ARTLIBER EDITORA LTDA., 2003.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais** Vol. I. 1.ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1977.

GASPARINI, J.; JUSTEN, M. **Avaliação do desgaste de camadas de carbonetos e boretos produzidas no aço AISI 4340 por meio de tratamento termo-reativo**. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Mecânica. UTFPR. Curitiba, 2015.

KANAI M. et al. **Statistical characteristics of drill wear and drill life for standardized performance tests**. Cirp Annals manufacturing technology, v. 27, p. 61-66, 1978.

KÖNIG, Wilfried; KLOCKE, Fritz. **Fertigungsverfahren Drehen, Fräsen, Bohren**, 5. ed., Aachen: Editora Springer, 1997

OZBEK, I.; BINDAL C. **Kinetics of borided AISI M2 high speed steel**. Vacuum Journal, v.84, p. 391-397, 2011

SCHROETER, R.B. ET AL. **Estudo comparativo de desempenho de brocas DIN 338**. Produção técnica, Florianópolis, 32 F. 1999.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de corte II**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.