

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

TUANY KASIOROWSKI NEVES

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO AÇO AISI D2 ENDURECIDO
POR TRATAMENTO TERMO-REATIVO COMO FERRAMENTA DE
CORTE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(Tcc 2)

CURITIBA

2015

TUANY KASIOROWSKI NEVES

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO AÇO AISI D2 ENDURECIDO
POR TRATAMENTO TERMO-REATIVO COMO FERRAMENTA DE
CORTE**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Eduardo Mauro do Nascimento, Dr. Eng.

Co-orientador: Prof. Daniel Hioki, Dr. Eng.

CURITIBA

2015

TERMO DE ENCAMINHAMENTO

Venho, por meio deste termo, encaminhar para apresentação a Monografia do Projeto de Pesquisa de Avaliação do Potencial do Aço AISI D2 endurecido por tratamento termo reativo como Ferramenta de Corte, realizado pela aluna Tuany Kasiorowski Neves, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 – Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Eduardo Mauro do Nascimento, Dr. Eng.

Co-orientador: Prof. Daniel Hioki, Dr. Eng.

UTFPR - Damec

Curitiba, 10 de junho de 2015.

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a Monografia de Projeto de Pesquisa de Avaliação do Potencial do Aço AISI D2 endurecido por tratamento termo reativo como Ferramenta de Corte, realizada pela aluna Tuany Kasiorowski Neves, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 – Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Eduardo Mauro do Nascimento
DAMEC, UTFPR
Orientador

Prof. Daniel Hioki
DAMEC, UTFPR
Co-orientador

Prof. Milton Luiz Polli
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Prof. Rodrigo Lupinacci Villanova
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 10 de junho de 2015.

AGRADECIMENTOS

-Ao Prof. Dr. Eduardo Mauro do Nascimento e Prof. Dr. Daniel Hioki, pela paciência, orientação, dedicação e por seus ensinamentos.

-Ao Prof. Dr. Rodrigo Villanova e ao Prof. Dr. Milton Luiz Polli, por dedicar um pedaço do tempo para avaliar esse trabalho;

-Aos meus pais, Marli e Marcus, por terem me proporcionado o estudo e pelo apoio que sempre me deram;

-Ao meu namorado, Ney, pela compreensão, incentivo e apoio nesse período;

-Aos estagiários dos laboratórios de Materiais e Usinagem, pois sempre estavam disponíveis com simpatia para ajudar;

-Ao Antônio Marcos Corpa, que ajudou na afiação das Barras que foram necessários nesse trabalho;

-À empresa WHB Fundição que ajudou na usinagem de algumas peças;

-À Ana Caroline Crema, amiga e mestrande da Puc-PR, e Paulo Soares, Professor da Puc-PR, pela ajuda em alguns testes que não puderam ser realizados na UTFPR;

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

-Aos meus colegas Fernando Makita e Bruno Hunger, pela ajuda em todo o decorrer do trabalho.

RESUMO

NEVES, Tuany Kasiorowski. **Avaliação do potencial do aço AISI D2 endurecido por tratamento termo-reactivo de boretação como ferramenta de corte**. 2015. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia Mecânica, Curitiba, 2015

Neste trabalho, foram avaliados os efeitos do processo de endurecimento superficial denominado boretação nas principais propriedades do aço AISI D2, assim como, o potencial de utilização das amostras submetidas a tal tratamento como ferramenta de corte. Para tanto, primeiramente, corpos-de-prova foram usinados com geometria padrão para encaixe em um porta ferramenta, em seguida eles foram afiados para obtenção dos ângulos e arestas que caracterizam uma ferramenta de corte. Após essa preparação, as amostras sofreram o tratamento superficial de boretação, seguido de têmpera e revenimento. Na sequência, foi realizada espectrometria com emissão óptica para análise da composição química da amostra utilizada. Após foi realizado a caracterização mecânica da camada de boretos formada na boretação, através de análise microscópica (ótica e eletrônica), microdureza e adesão da camada endurecida de seções transversais dos corpos-de-prova. A camada de boretos foi comprovada e identificada com a técnica de difratometria de raios-X. Por fim, foi analisado o potencial de utilização dos corpos-de-prova tratados pela boretação como ferramenta de corte através de testes de torneamento. Os resultados mostraram que a boretação foi eficaz para obtenção de uma camada superficial de elevada dureza e espessura satisfatória, entretanto os corpos-de-prova apresentaram desgaste prematuro durante o ensaio de usinagem. Atribui-se ao resultado a espessura de 50 μm obtida na camada endurecida, visto que o processo de usinagem é muito severo necessitando de uma camada com maior espessura.

Palavras-chave: aço AISI D2, usinagem, ferramenta de corte, boretação.

ABSTRACT

NEVES, Tuany Kasiorowski. **Avaliação do potencial do aço AISI D2 endurecido por tratamento termo-reactivo de boretação como ferramenta de corte**. 2015. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia Mecânica, Curitiba, 2015

In this work, the effects of the superficial hardening process of boriding were evaluated on the main properties of AISI D2 steel, as well as the potential use of the samples subjected to such treatment as cutting tool. To do so, first, specimens were machined with standard geometry for fitting into a tool holder, and then they were sharpened to obtain the angles and edges featuring a cutting tool. After this preparation, the samples underwent surface treatment of boriding, followed by quenching and tempering. Subsequently, it was performed a spectrometry with optical emission for analysis of the chemical composition of the sample used. After that, the mechanical characterization of borides layer formed in boriding was done through microscopic analysis (optical and electronic), microhardness and adhesiveness of the hardened layer of cross-sections of the specimens. The boride layer was confirmed and identified with the technique of X-ray diffraction. Finally, it was analyzed the potential use of the specimens treated by boronizing as a cutting tool by using turning tests. The results showed that the boronizing was effective for obtaining a surface layer of high hardness and satisfactory thickness, however the specimens showed premature wear during the machining test. Is attributed to the result a thickness of 50 μM obtained in the hardened layer, since the process of machining is very severe requiring a layer with increased thickness.

Palavras-chave: AISI D2 steel, machining, cutting tool, boriding, hardness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Microdureza Vickers da camada de carbonetos em relação a outros métodos de endurecimento superficial.....	12
Figura 2 – Profundidade de boretação por horas a temperaturas específicas	13
Figura 3 - Camadas em um processo de boretação.	14
Figura 4 – Medição do desgaste da ferramenta de usinagem.	18
Figura 5 - Curva de revenido do aço D2.	19
Figura 6 – Fluxograma da metodologia experimental	20
Figura 7 – Composição química do aço D2	21
Figura 8 – Dimensões da barra usinada	21
Figura 9 – Posicionamento dos ângulos e superfícies em uma ferramenta de corte.	22
Figura 10 – Ângulos de afiação da ferramenta de corte.....	23
Figura 11 – Qualidade da adesão segundo norma VDI 3198.....	27
Figura 12 – Torno mecânico da marca Nardini, modelo MS 205, para realização dos testes de usinagem.	28
Figura 13 - Barra para usinagem	29
Figura 14 - Microscopia do aço D2 após banho de boretação, têmpera em óleo e revenimento.....	31
Figura 15 - Camada de boretos do aço D2 temperado em óleo e revenido	32
Figura 16 – Espessura da camada endurecida por boretação.....	33
Figura 17 – Gráfico de difração de raio-X do aço D2 após banho de.....	34
Figura 18 – Microscopia eletrônica por varredura do aço D2 submetido ao banho de boretação, temperado e revenido.	35

Figura 19 - Gráfico de dureza com identações do microdurômetro.....	36
Figura 20 – Indentações para análise de adesividade do aço. (a) carga aplicada de 60 kgf; (b) carga aplicada de 100 kgf; (c) carga aplicada de 150kgf	37
Figura 21 – Indentação de 60 kgf para o aço AISI D2 submetido a tratamento de boretação	38
Figura 22 - Indentação de 100 kgf para o aço AISI D2 submetido a tratamento de boretação.....	39
Figura 23 - Indentação de 150 kgf para o aço AISI D2 submetido a tratamento de boretação.....	39
Figura 24 – Ferramenta 1 submetido ao banho de boretação, resfriado ao ar e revenido.....	40
Figura 25 – Ferramenta 4 submetido ao banho de boretação, resfriado ao óleo e revenido ao ar.	41
Figura 26 – Barra 2. Antes e depois da usinagem.	42
Figura 27 – Ferramenta 3. Antes e depois da usinagem.	42
Figura 28 – Desgaste da ferramenta 2 resfriada ao ar.....	43
Figura 29 – Desgaste da ferramenta 3 resfriada ao ar.....	44
Figura 30 – Cavaco das ferramentas resfriadas ao ar.	45
Figura 31 – Ferramenta 5. Antes e depois da usinagem.	45
Figura 32 - Ferramenta 6. Antes e depois da usinagem.	46
Figura 33 – Cavaco da ferramenta resfriada em óleo.....	47
Figura 34 – Desgaste da ferramenta 5 resfriada em óleo.....	48
Figura 35 – Desgaste da ferramenta 6 resfriada no óleo.....	48
Figura 36 – Depressões formadas nas ferramentas resfriadas ao ar.	49
Figura 37 – Força de corte na presença de desgastes de flanco e de cratera.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diferença entre as principais camadas formadas no tratamento de boretação.....	14
Tabela 2 – Processo de endurecimento e suas respectivas composições	23
Tabela 3 – Têmpera e Revenimento das amostras	25
Tabela 4 – Parâmetros para cada tipo de ferramenta.....	28
Tabela 5 – Composição química do aço D2.....	31
Tabela 6 – Média das durezas das amostras do aço D2 submetidas à boretação, temperadas em ar.....	36
Tabela 7 – Degaste e coloração do cavaco das barras utilizadas no teste de usinagem.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – American Iron and Steel Institute

B₂O₃ – Trióxido de Boro

C – Carbono

CFE – Elementos formadores de Carboneto

Cr – Cromo

Cr₇C₃ / Cr₂₃C₆ – Carboneto de cromo

CVD – Deposição Química de Vapor

Fe – Ferro

HV – Unidade de medida de dureza Vickers

K₀ – Constante da taxa de crescimento da camada (cm²/s)

K_t – Profundidade da cratera (desgaste de ferramentas)

m/min – Unidade de velocidade de corte (metro/minuto)

min – Minuto

mm – Milímetro

mm/volta – Unidade de avanço da ferramenta (milímetro/volta)

Na₂B₄O₇ – Borato de sódio (Bórax)

NbC – Carboneto de nióbio

PVD – Deposição Física de Vapor

Q – Energia de ativação (KJ/Kmol)

R – Constante universal dos gases

R_a – Rugosidade média

R_p – Rugosidade máxima

R_t – Rugosidade total

T – Temperatura absoluta (K)

TD – Toyota Diffusion

TiC – Carboneto de Titânio

TiCN –Carbonitreto de Titânio

TiN – Nitreto de Titânio

TRD – Tratamento termo-reativo de deposição e difusão

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

W – Tungstênio

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1. Contexto do Tema	8
1.2. Caracterização do Problema	9
1.3. Objetivos.....	9
1.4. Justificativa	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	10
2.1. Introdução.....	10
2.2. Tratamentos Superficiais	10
2.3. Tratamento de Boretação.....	11
2.4. Ferramentas para usinagem	15
2.4.1. Características de um material para usinagem.....	15
2.4.2. Tipos de Desgaste.....	15
2.4.2.1. Lascamento.....	16
2.4.2.2. Desgaste no Flanco	16
2.4.2.3. Desgaste na face	16
2.4.3. Critério de fim de vida.....	17
2.5. Características do aço D2	18
3. METODOLOGIA.....	20
3.1. Metodologia e Materiais	20
3.2. Determinação da composição química do aço D2.....	24
3.3. Preparação das amostras	24
3.4. Tratamento de Boretação.....	24
3.5. Têmpera e Revenimento	25
3.6. Teste de Difração	25
3.7. Microscopia ótica e Espessura da camada.....	26
3.8. Microscopia eletrônica por varredura (MEV).....	26
3.9. Teste de dureza Vickers.....	26
3.10. Teste de adesividade VDI 3198	26
3.11. Usinagem	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1. Espectrometria de emissão ótica	31
4.2. Caracterização do aço após tratamento	31
4.3. Boretação do aço AISI D2.....	32
4.4. Dureza Vickers	35
4.5. Adesividade da camada	37
4.6. Ferramentas de Corte	40
4.7. Usinagem	41
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
6. PROJETOS FUTUROS	53
7. REFERÊNCIAS	54

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto do Tema

A busca recorrente por uma maior eficiência dentro do setor industrial visando aumentar a produtividade e, ao mesmo tempo, reduzir os custos de fabricação não é algo novo. Com a entrada do capitalismo como modelo predominante do sistema econômico e intensificada após a revolução industrial, a tendência de criar novos materiais e métodos de desenvolvimento de produto com os principais objetivos de máximo lucro e menor gasto tem sido crescente.

Focando-se especificamente em ferramentas para fabricação de produtos, tem-se em mente que todo processo de usinagem, nas quais elas são usadas, gera desgaste e perda de desempenho ao longo do ciclo de vida. Logo, a escolha da ferramenta adequada em conjunto com a máquina, tomando-se como base análises que apontem para um resultado ótimo, é fundamental.

Dureza a altas temperaturas, resistência ao desgaste e tenacidade são as principais propriedades exigidas de um material quando se trata de ferramentas de corte, e o aço rápido é uma alternativa que une as qualidades citadas sem cobrar muito por isso. Dessa forma, empresas de pequeno porte, com recursos mais escassos e que possuem máquinas de baixa potência e robustez, encontram no aço rápido a sua solução. Assim, abre-se uma oportunidade para testar materiais alternativos, tratá-los termicamente a fim de melhorar suas propriedades com um custo acessível e criar uma alternativa ao aço rápido.

Dentre os tratamentos térmicos e termoquímicos utilizados para tal fim, pode-se citar: nitretação, carbonitretação, aspersão térmica, deposição química de vapor (CVD), deposição física por vapor (PVD), boretação e tratamento termo reativo de deposição e difusão (TRD).

O processo de boretação é um tratamento termoquímico que, através de um banho no metal base, forma uma camada de boretos, melhorando as propriedades superficiais de materiais ferrosos e não-ferrosos. Em ligas ferrosas, o tratamento é aplicado visando melhorar a dureza superficial e a resistência ao desgaste (CAMPOS et al., 2008; CAMPOS-SILVA et al., 2010)

1.2. Caracterização do Problema

Através do tratamento de boretação, o aço AISI D2 pode se tornar uma opção interessante no mercado de ferramentas para usinagem. Tendo um endurecimento secundário notável, seu potencial servindo como ferramenta de corte foi testado neste trabalho, já que não há muitos dados relacionados a este tipo de caso.

1.3. Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste na obtenção de camadas de boretos e carbonetos no aço AISI D2, por meio de tratamento com banho de bórax, e na caracterização, principalmente em termos da determinação de suas composições e da avaliação de seu comportamento quanto ao desgaste, com intuito de verificar o potencial deste material para ser utilizado como uma ferramenta de usinagem.

1.4. Justificativa

O aço escolhido para ser o material base de análise do presente trabalho foi o aço AISI D2, pois o mesmo apresenta tal como o aço rápido a vantagem de tratamento térmico mais simples e um endurecimento secundário que pode ser utilizado para potencializar uma ferramenta de corte. Este beneficia a dureza a quente evitando que haja o amolecimento em altas temperaturas. Como a literatura não apresenta um estudo utilizando este material como uma ferramenta de usinagem foi importante analisarmos o seu potencial, visto que confirmado a possibilidade do uso para esta finalidade as empresas de usinagem de pequeno porte poderão usufruir de um material com elevado custo/benefício.

Em se tratando do aspecto multidisciplinar, houve a necessidade tanto dos conhecimentos de Tecnologia dos Materiais quanto de Processos de Fabricação, ambos amplamente estudados na área de Engenharia Mecânica. A caracterização do aço, usada para avaliar os resultados obtidos, em conjunto com o processo de usinagem, que foi feita em um torno, são os principais passos que determinaram o caminho deste estudo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Introdução

Uma operação de usinagem pode ser definida como um processo mecânico de remoção de material. Utilizada em larga escala na indústria em virtude da franca expansão das cadeias produtivas que exigem flexibilidade e produtividade aliado ao menor custo possível, cabe ressaltar a importância da vida útil de uma ferramenta, que pode ser definida como o tempo que a mesma trabalha efetivamente até perder sua capacidade de corte (Stoeterau, 2007).

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.

Para se chegar a um resultado satisfatório na peça usinada, as condições de usinabilidade, a facilidade de um material a ser usinado sem alterar suas propriedades mecânicas, são fundamentais, porém não suficientes. A escolha da ferramenta, do equipamento, das condições de trabalho e até do fluido de corte, podem resultar em ganhos econômicos para a empresa e, assim, aumentar sua eficiência produtiva e econômica, como citado anteriormente.

2.2. Tratamentos Superficiais

Os tratamentos superficiais são processos que visam melhorar as propriedades de um material, adicionando materiais na superfície do mesmo. Em sua maioria, deposições são feitas nessa superfície, podendo ser de um único material ou várias camadas de materiais diferentes.

Dentre os tratamentos superficiais, será aprofundado apenas o processo que foi utilizado neste trabalho, a boretação.

A boretação é um tratamento que visa a modificação das propriedades físicas, químicas e mecânicas do material. As principais propriedades mecânicas que são modificadas nesse caso são a elevação da dureza, elevação da resistência ao desgaste e a diminuição do coeficiente de atrito (ASM, 1991). No caso desta pesquisa,

objetivou-se melhorar todas essas propriedades com o intuito de que este material seja adequado para uma ferramenta de usinagem.

Como vantagens de tratamentos superficiais no contexto de ferramenta para usinagem, podemos citar a redução de parada de máquina, aumento da vida útil da ferramenta, redução de custos com manutenção da máquina utilizada, melhor acabamento do produto, ganhos de produtividade e diminuição de uso de fluido refrigerante, pela diminuição do coeficiente de atrito. Além disso, na usinagem, maiores velocidades de corte e avanço podem ser alcançadas e diminuição de esforços.

2.3. Tratamento de Boretação

O Tratamento de Boretação é um tratamento termoquímico com a finalidade de introduzir boro na superfície de um material visando alterar as propriedades desse material. Esse processo pode ser aplicado a diversos materiais ferrosos e não ferrosos. Dentre as propriedades que são melhoradas, pode-se citar o aumento da dureza, aumento da resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito. (ASM, 1991)

Este tratamento pode ocorrer em meio sólido, líquido, gasoso, leito fluidizado ou por plasma. A boretação em meio líquido foi o processo utilizado neste trabalho. Como o boro puro é um material extremamente caro, em torno de 500 dólares/kg, utiliza-se o carbetto de boro, aproximadamente 80 dólares/kg. Outra opção seria o ferroboro, mas este apresenta dificuldade em manter a qualidade em altas produções. (<http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/sistematramentotermoquimico.asp>).

A boretação líquida compõe-se de um meio contendo boro, nesse caso o Boróx, e um tipo de agente redutor (SiC, B₄C, Al, Fe-Al). Dependendo da natureza do agente redutor, o potencial de boretação pode ser maior, com camadas mais espessas e ricas em boro. (ASM, 1991)

A boretação gasosa é um tratamento que utiliza equipamentos de alto custo e os gases usados são muito tóxicos. (<http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/sistematramentotermoquimico.asp>)

Conforme mostra a figura 1, espera-se que a dureza da boretação fique entre 1000 e 2000 HV. A camada boretada chega a uma dureza muito alta, mas ainda assim existem outros processos, como PVD, CVD e TRD, que obtém durezas mais elevadas.

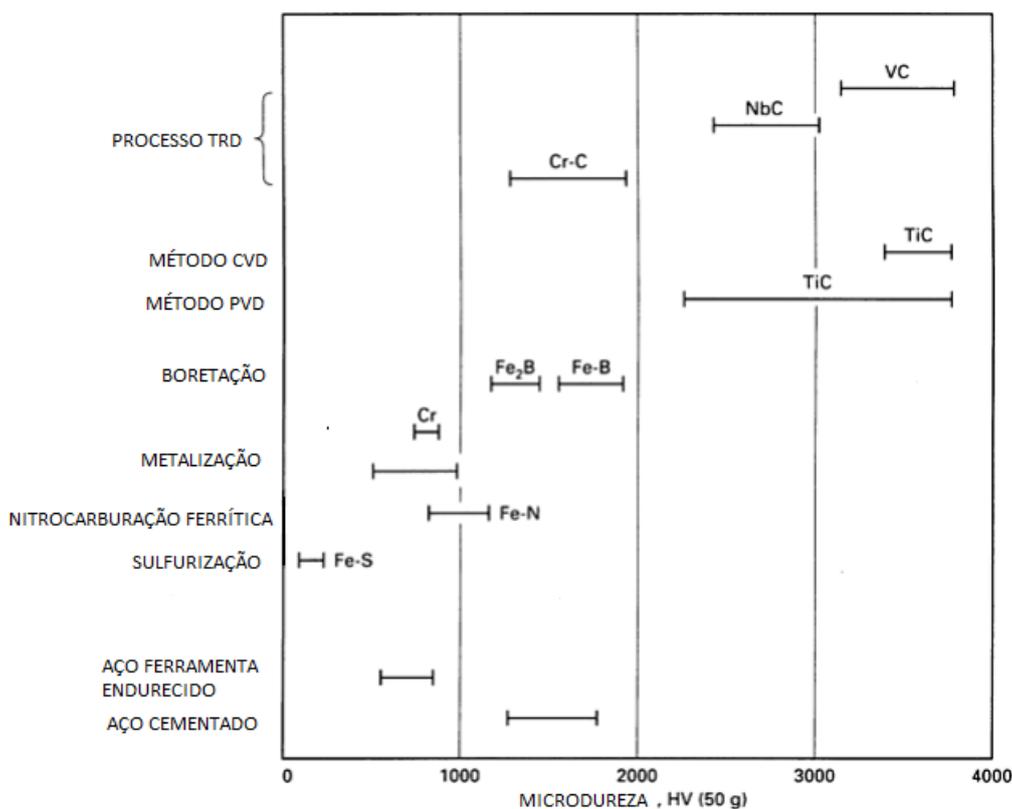


Figura 1 - Microdureza Vickers da camada de carbonetos em relação a outros métodos de endurecimento superficial.

Fonte: Arai, *et al.*, 1991.

Neste tratamento, o material é submetido a altas temperaturas, entre 800°C a 1050°C, durante 1 a 12 horas. Na figura 2, pode-se perceber como funciona a profundidade da boretação em milímetros com o passar do tempo e a uma temperatura específica. Essa profundidade pode ser medida através de um ensaio de microscopia ótica. A temperatura mais recomendada, para peças de grande porte, é a de 900°C, já que temperaturas acima desta, associadas a fatores como resfriamento, tratamento térmico anterior ou geometria da peça, podem ocasionar o empenamento da peça tratada. Como o material usado neste trabalho não possui grandes dimensões, o problema descrito anteriormente dificilmente ocorrerá. (<http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/sistematramentotermoquimico.asp>)

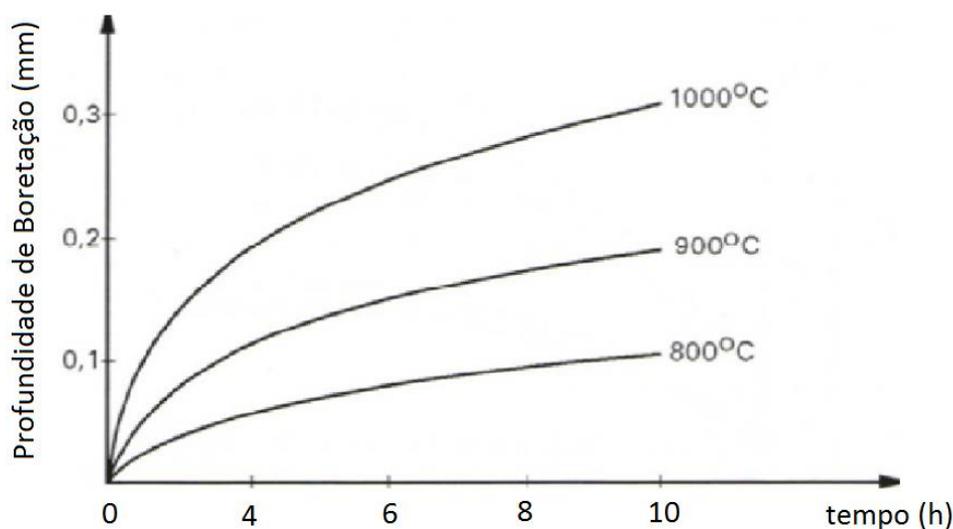


Figura 2 – Profundidade de boretação por horas a temperaturas específicas

Fonte: Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo.

A espessura da camada formada está diretamente ligada ao tempo e temperatura. Quanto maior esses elementos, maior será essa camada. Além disso os tipos de agentes redutores utilizados na preparação do banho, também influenciam esta espessura. A espessura da camada de boreto varia entre 10 e 300 μm , quanto maior a camada, maior a vida útil do material em questão. (<http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/sistematratementotermoquimico.asp>)

A camada formada por esse tratamento é constituída de boretos de elementos dos substratos. Durante o processo, os átomos de boro que são muito pequenos, difundem para dentro do metal base, formando a camada. Pelo tamanho de seus átomos, o boro difunde facilmente as ligas ferrosas formando dois tipos de camadas, FeB e Fe₂B. No processo de formação da camada de boretos, o elemento endurecedor é o boro que quando difundido forma boreto de ferro a durezas muito elevadas. (OLIVEIRA, 2006).

Na figura 3 pode-se ver como funciona a deposição das camadas de boro. A primeira camada, FeB é a mais frágil e pode ocasionar trincas, por isso a segunda camada é a mais desejada pois possui uma alta tenacidade. Pode-se perceber que abaixo das camadas de boro, encontra-se a zona de difusão.

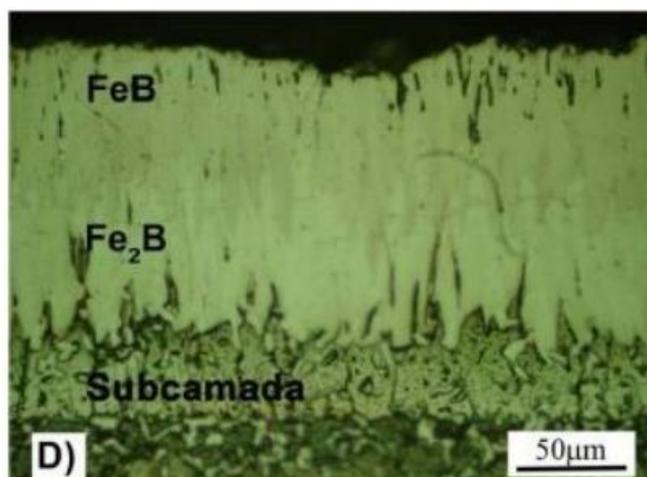


Figura 3 - Camadas em um processo de boretação.

Fonte: Heck, 2010.

A tabela 1 mostra a comparação entre as duas principais camadas formadas no processo de boretação. A camada Fe_2B possui módulo de tenacidade (J/m^3) quatro vezes maior que da camada FeB . (OLIVEIRA, 2006)

Tabela 1 – Diferença entre as principais camadas formadas no tratamento de boretação

	FeB	Fe₂B
Microdureza [GPa]	19 – 21	18 – 20
Módulo Elasticidade [GPa]	590	285 – 295
Coeficiente expansão térmica (200°C a 600°C) [ppm/°C]	23	7,65
Densidade [g/cm³]	6,75	7,65
Quantidade de Boro [%]	16,23	8,83
Estrutura	Ortorrômbica	Tetragonal corpo centrado
Parâmetros de rede [Å]	a=4,053 b=5,495 c=2,946	a=5,078 c=4,249

Fonte: Adaptado de ASM Handbook, 1991.

Pode-se citar como vantagens do processo de boretação, a alta resistência à abrasão, além de melhores propriedades mecânicas, como dureza, resistência à

corrosão e baixo coeficiente de atrito, a boretação também aumenta a vida útil do material tratado. (ASM, 1991)

2.4. Ferramentas para usinagem

2.4.1. Características de um material para usinagem

Para selecionar um material de ferramenta, alguns fatores devem ser levados em consideração, como o material que será usinado, o processo de usinagem, condição da máquina, formas e dimensões da ferramenta, as condições de usinagem e as condições de operação. Além disso, um material para ferramenta de corte, deve ter propriedades específicas. Dentre todas as propriedades de um material pode-se citar quais são fundamentais em uma ferramenta de corte. (Diniz et al, 2010)

- Dureza a quente;
- Resistência ao desgaste;
- Tenacidade.

Através do tratamento superficial, tentou-se potencializar essas propriedades a fim de obter uma ótima ferramenta de corte, comparados com as propriedades do aço rápido.

2.4.2. Tipos de Desgaste

Os desgastes na ferramenta podem ocorrer de três maneiras diferentes, e diversas são as causas desses desgastes. (Stemmer, 2001) Entre eles:

- Deformação plástica: geralmente ocorre em elevados avanços onde a dureza a quente não é suficiente para suportar a pressão de usinagem;
- Aderência: pode ocorrer a altas temperaturas e pressões, causando a formação do gume postiço (soldagem de partículas na face da ferramenta);
- Abrasão: arrancamento de pequenas partículas pelo escorregamento entre ferramenta e peça, aumentando o número de inclusões;
- Oxidação: Formação de uma película de óxido de ferro (carepa) a altas temperaturas;

- Correntes elétricas: Variação da massa decorrente da corrente iônica originada pelo contato entre peça e ferramenta.

As três maneiras de desgaste, lascamento, desgaste no flanco e desgaste na face, serão melhor explicadas a seguir.

2.4.2.1. Lascamento

Quando ocorre grande solicitação térmica ou mecânica na ferramenta. Como causas desse desgaste, podemos citar: (Diniz et al, 2010)

- Ferramenta pouco resistente devido a ângulos de cunha ou de quina muito pequenos, mau acabamento do gume, pastilha muito dura para o trabalho que está sendo realizado;
- Grande solicitação mecânica por cortes interrompidos, inclusões duras no material da peça, dimensões excessivas de cavacos e vibrações de qualquer origem;
- Grande solicitação térmica devido a um resfriamento muito rápido causando fissuramento do gume

2.4.2.2. Desgaste no Flanco

Representa-se pela faixa desgastada no flanco da ferramenta, portanto, a largura da faixa é diretamente proporcional ao grau de desgaste. Através do uso de um raio de quina correto, existe tendência à diminuição da faixa (Stemmer, 2001).

2.4.2.3. Desgaste na face

Neste modo de falha, ocorre o aparecimento de crateras na superfície de saída da ferramenta. Isto ocorre devido o atrito entre o cavaco e a ferramenta. É caracterizada pela profundidade e pela distância ao centro do cume Porém, este é um tipo de desgaste que não deveria ocorrer para aços ferramentas. (Stemmer, 2001).

2.4.3. Critério de fim de vida

Alguns fatores são definidos para estabelecer o fim de vida de uma ferramenta, caso o material não seja retirado, as consequências que ele pode trazer na usinagem são diversos (Diniz et al, 2010) Dentre eles, pode-se citar:

- Desgastes elevados a ponto de quebra da aresta de corte: crítico em operações de desbaste pois permite que o desgaste seja alto já que não são necessárias tolerâncias apertadas
- Desgaste da superfície de folga da ferramenta: crítico em operações de acabamento, não conseguindo tolerâncias apertadas e nem bons acabamentos superficiais.
- Temperatura da aresta cortante ultrapassa a temperatura em que a aresta de corte perde o fio de corte: crítico em ferramentas de aço rápido pois suportam temperaturas menores que de outros materiais para ferramenta.
- Aumento da força de usinagem: interfere no funcionamento da máquina.

Além disso, existem fatores que são relacionados à prática e aos ensaios laboratoriais (Stemmer, 1989):

- Falha por lascamento, quebra e superaquecimento
- Falha por alto atrito de escorregamento com a superfície de incidência
- Largura da marca de desgaste que deve estar entre 0,8 e 2 mm para ser considerados valores admissíveis para ferramentas de aço.
- Vibrações intensas de ferramenta ou peça
- Mudança no acabamento da peça
- Formação de rebarbas na peça
- Variação do formato dos cavacos

A figura 4 mostra como funciona a medição do desgaste de uma ferramenta de usinagem. Para desgastes de flanco, a medição pode ser efetuada através do tamanho da faixa desgastada na ponta da ferramenta, esse desgaste é

representado na figura como V_B . Como dito anteriormente, o tamanho dessa faixa está diretamente ligado ao grau de desgaste da ferramenta.

Para desgastes de cratera, a medição pode ser feita de duas formas diferentes: do centro da cratera até a quina da ferramenta, representada por K_M e através da profundidade dessa cratera, representada por K_T .

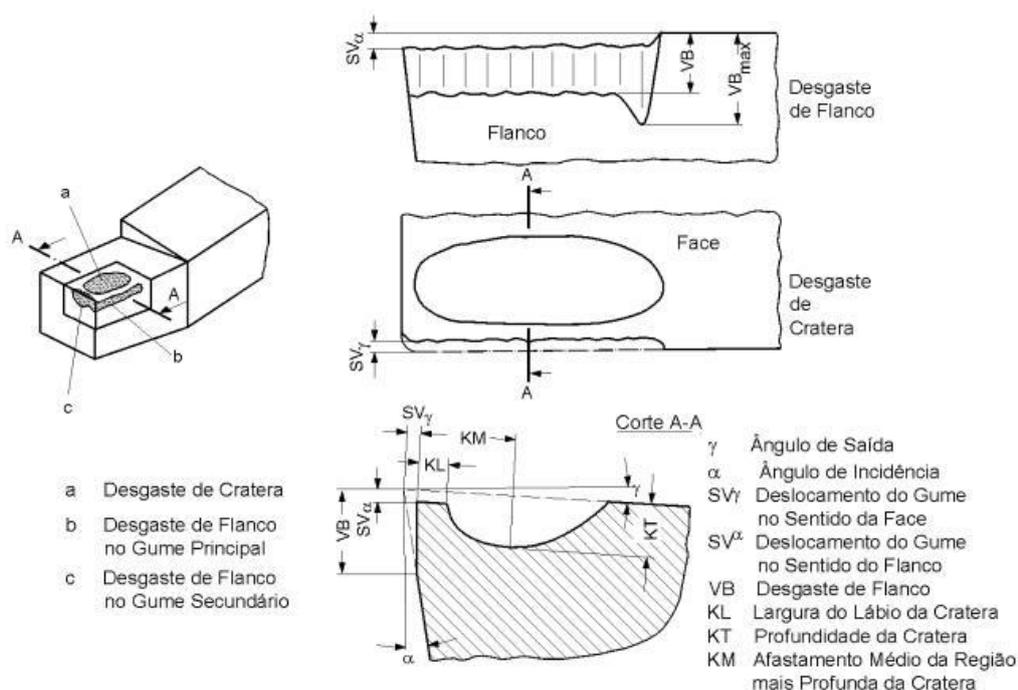


Figura 4 – Medição do desgaste da ferramenta de usinagem.

Fonte: Universidade de São Paulo, Prof. Dr. Eng. Rodrigo Lima Stoeterau.

2.5. Características do aço D2

O aço que foi usado nesta pesquisa foi o aço AISI D2. Ele é um aço com altos teores de carbono, cromo e molibdênio, fazendo com que o aço tenha uma boa resistência ao amolecimento pelo calor. Possui alta resistência ao desgaste, temperabilidade, tenacidade e resistência mecânica. A dureza desse aço pode chegar a 832HV depois de temperada.

A escolha desse aço se deve ao fato que o mesmo apresenta dureza a quente, ou seja, capacidade de resistir ao amolecimento a temperaturas elevadas. A tendência geral da curva de revenido do aço D2 está indicada na fig.5. Inicialmente a curva sofre uma queda no valor da dureza até uma temperatura de revenido de aproximadamente 385 a 400°C, sendo que a partir desse ponto, a dureza começa a aumentar

gradualmente atingindo um máximo entre 500 e 530°C aproximadamente, depois, há uma queda brusca da dureza. Este fenômeno é denominado de endurecimento secundário e é devido a uma combinação de dois processos. O primeiro é a transformação da austenita retida em martensita pelo resfriamento subsequente ao revenido e o segundo é a precipitação de uma dispersão de carbonetos de liga muito fina.

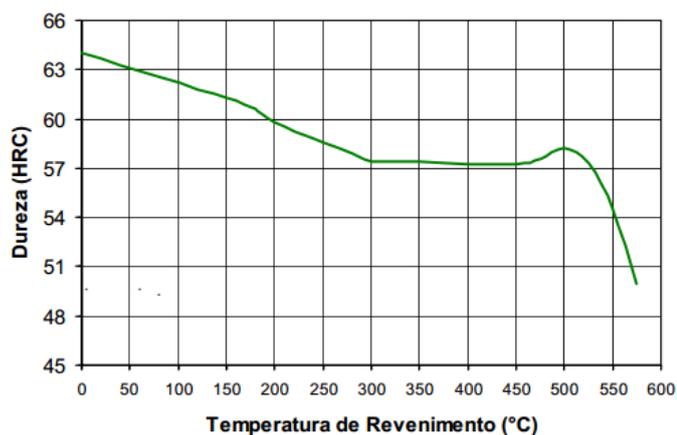


Figura 5 - Curva de revenido do aço D2.

Fonte: http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT_13_VD2.pdf.

O alívio de tensões nesse material deve ser realizado antes do banho de boretção. Esse alívio é necessário para minimizar as distorções na têmpera. Para esse processo pode ser feito um aquecimento lento até 600°C e depois resfriamento em forno a 200°C.

3. METODOLOGIA

3.1. Metodologia e Materiais

O trabalho foi desenvolvido em uma série de etapas. Na figura 6, pode-se ter breve entendimento a respeito da metodologia empregada, que será melhor detalhada ao decorrer deste capítulo.

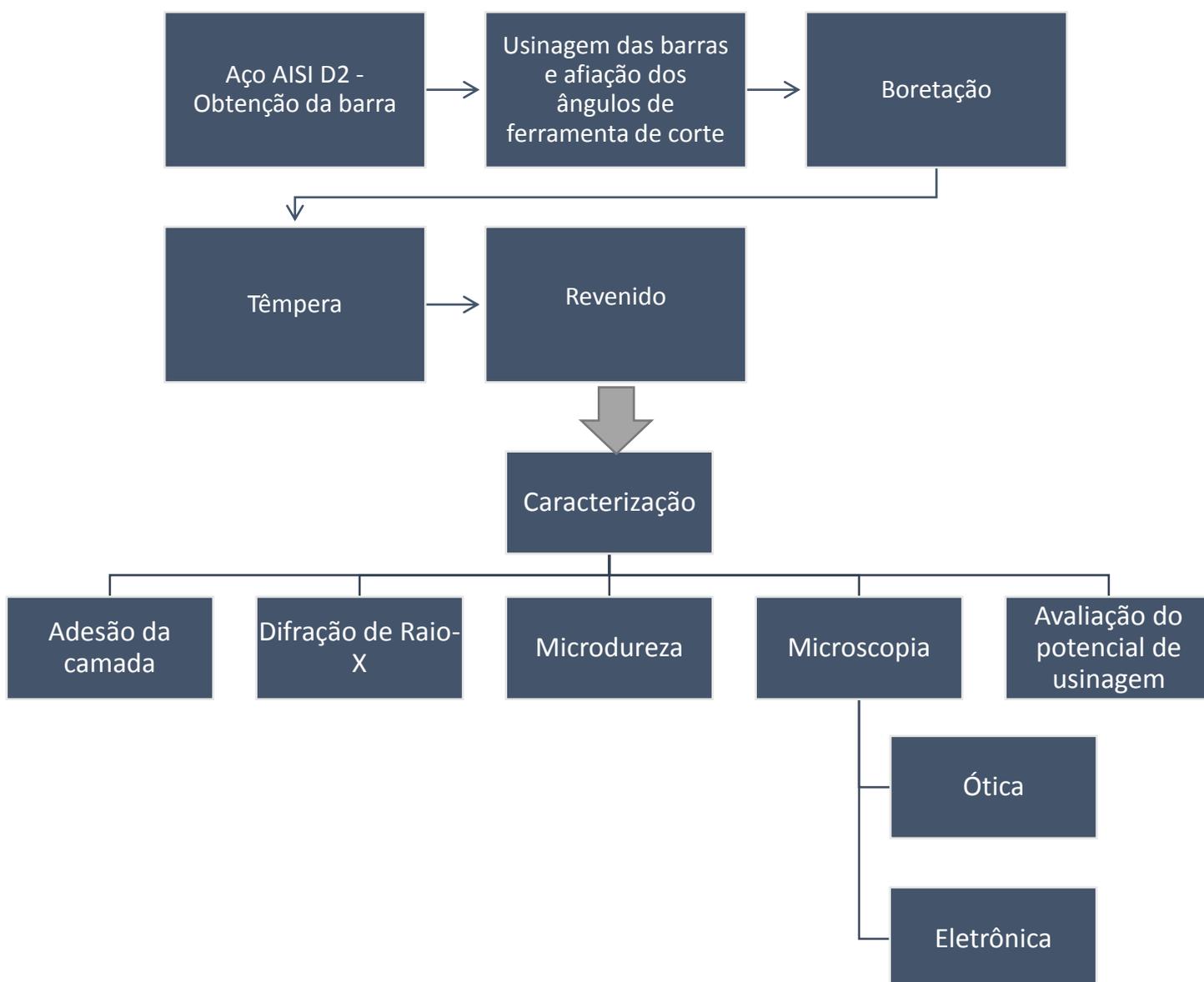


Figura 6 – Fluxograma da metodologia experimental

Fonte: Autoria própria

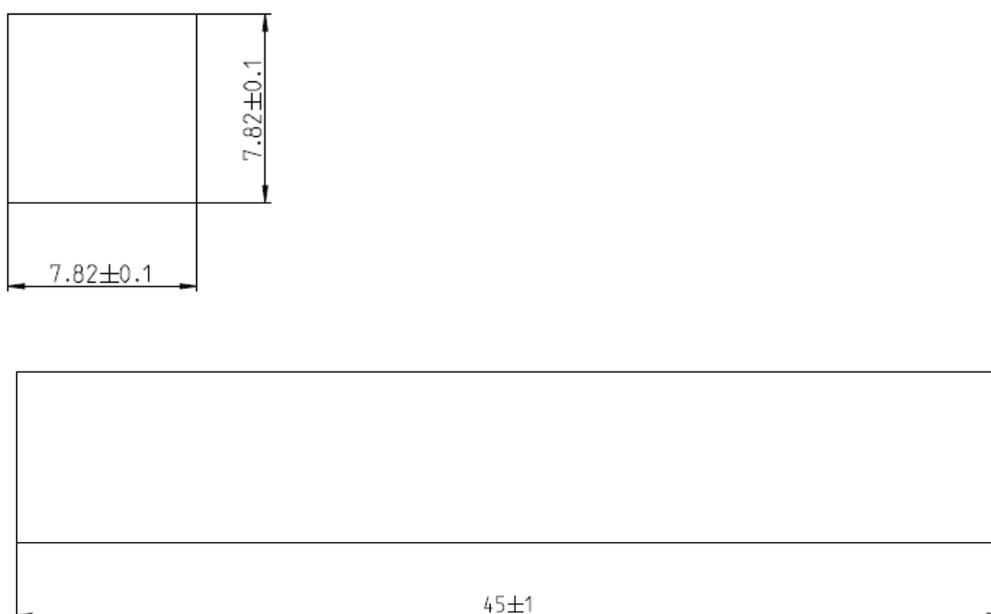
A composição química estimada do aço é apresentada pela figura 8.

C	Si	Cr	Mo	V
1,50	0,30	12,0	0,95	0,90

Figura 7 – Composição química do aço D2

Fonte: http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT_13_VD2.pdf

Foram usinadas 7 peças em formato de barra de seção quadrada conforme a figura 8:



MATERIAL D2
 Rzmax20 em todas as superfícies
 Dimensões em milímetros

Figura 8 – Dimensões da barra usinada

Fonte: Autoria própria

Já com material nas dimensões desejadas, foi feita a afiação com ângulos similares às ferramentas de aço rápido esquematizados na figura 10. (Diniz et al, 2010). Para melhor entendimento, a figura 9 mostra o posicionamento de cada ângulo e as superfícies de uma ferramenta de corte. Os ângulos utilizados foram:

- Ângulo de incidência: $\alpha_0=10^\circ$;
- Ângulo de incidência secundário: $\alpha'=10^\circ$;
- Ângulo de direção: $K_r=90^\circ$;
- Ângulo de direção secundário: $K_r'=30^\circ$;
- Ângulo ortogonal de saída: $\gamma_0=15^\circ$

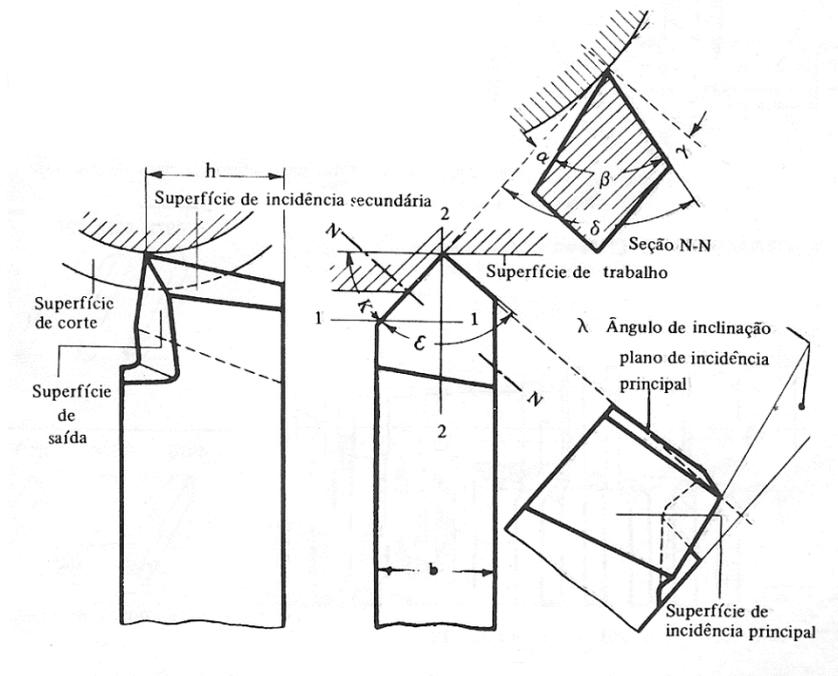


Figura 9 – Posicionamento dos ângulos e superfícies em uma ferramenta de corte.

Fonte: http://rickgutirres.blogspot.com.br/2012_03_01_archive.html

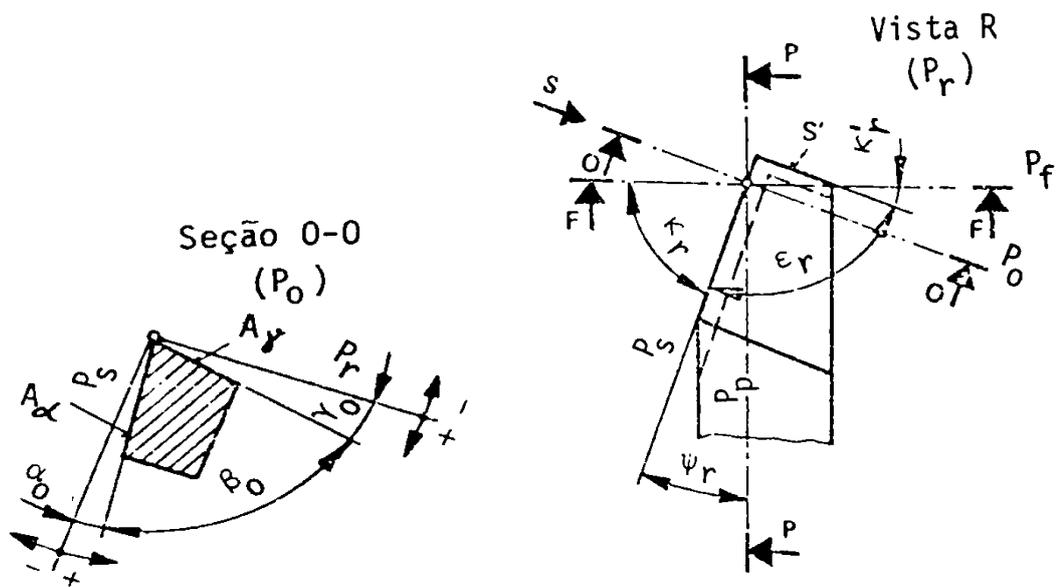


Figura 10 – Ângulos de afiação da ferramenta de corte

Fonte:STEMMER, 1989.

Após seis bits usinados e afiados, foram providenciados alguns cadinhos e caixas de metal para que o banho pudesse ser preparado.

Com os cadinhos prontos, seis ferramentas de corte e quatro pequenas amostras foram tratadas por boretação, restando uma unidade reserva sem tratamento. Porém, três ferramentas de corte e duas amostras foram resfriadas ao ar e três ferramentas e duas amostras resfriadas no óleo. A opção por três ferramentas para cada resfriamento tem como objetivo gerar consistência estatística na coleta de dados.

Para a boretação, foram utilizados o Bórax e o alumínio como agente redutor, ambos mostrados com mais detalhes na tabela 2.

Tabela 2 – Processo de endurecimento e suas respectivas composições

PROCESSO	COMPOSIÇÃO DO BANHO (% em peso atômico)
BORETAÇÃO	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 15\% \text{Al}$

Fonte: Autoria própria

Os banhos foram feitos à 1000°C durante 5 horas ininterruptas para ambos os casos. Logo após a conclusão do processo de boretação, as amostras foram

temperadas em água e em óleo, como descrito anteriormente, e, tão logo atingiram uma temperatura aproximada de 60°C, foram revenidas a 200°C por 2 horas e resfriadas lentamente ao ar. A partir deste momento, foi possível a caracterização, através de microscopia ótica e MEV, difração de raio-X, ensaio de microdureza Vickers, medição da espessura e adesão da camada formada. Já a medição de desgaste foi feita através da usinagem da ferramenta tratada e medição do desgaste com a ajuda de uma lupa. Todas as ferramentas usinaram um aço 1045, tendo os parâmetros de usinagem estabelecidos no decorrer do trabalho.

3.2. Determinação da composição química do aço D2

A composição química do aço AISI D2 foi determinada no laboratório de Análises Químicas da empresa Spectroscan. A temperatura usada durante o ensaio foi de 23,8°C com 44% de umidade.

3.3. Preparação das amostras

As amostras consistem em 6 ferramentas de corte e quatro pequenas amostras que foram utilizadas nos testes de micrografia, difração, dureza e adesividade. Para melhor adesão da camada de boreto, todas as amostras tiveram que ser preparadas. Para isso todas elas foram lixadas com lixas de granulometria 150, 220, 320, 400, 600 e 1200. Com exceção das faces que contém ângulos nas ferramentas, essas foram lixadas apenas na lixa de granulometria 600 para preservar os valores dos ângulos. Após isso, todas as peças foram polidas com alumina e água. Em seguida as amostras foram submetidas à limpeza através de ultra som em álcool durante 15 minutos.

3.4. Tratamento de Boretação

Antes de poder realizar o tratamento superficial nas amostras, o banho precisou ser preparado. Como seriam várias amostras para o mesmo banho, utilizou-se 300g de Boráx e 15% desse valor de alumínio, 45g.

Como o boráx é um sal e é muito leve, deve-se ter muito cuidado no preparo do banho, pois o boráx pode subir e transbordar fora do cadinho, ocorrendo assim, a oxidação do local onde ele está sendo utilizado.

O forno foi aquecido à uma temperatura de 1000°C e o banho foi realizado durante 5 horas.

3.5. Têmpera e Revenimento

Após as 5 horas citadas, as amostras foram temperadas, cada uma com seu tipo de fluido. Depois disso o revenimento foi realizado em quase todas as amostras, deixando apenas duas das amostras pequenas, uma resfriada ao ar e outra resfriada no óleo. Isso foi feito para obter-se testes a fim de garantir as alterações do revenido nas barras.

O revenimento foi realizado à 200°C, deixando as amostras por duas horas ininterruptas dentro do forno. A tabela 2 exemplifica de uma forma melhor como foi o processo de têmpera e revenimento.

Tabela 3 – Têmpera e Revenimento das amostras

	Têmpera		Revenimento
	Ar	Óleo	Ar
Barra 1	X		
Barra 2	X		
Barra 3	X		
Amostra 1	X		
Amostra 2	X		X
Barra 4		X	
Barra 5		X	
Barra 6		X	
Amostra 3		X	
Amostra 4		X	X

3.6. Teste de Difração

O equipamento de difração utilizado foi o da marca Shimadzu do modelo XRD-7000. O tubo de raio-x foi utilizado com voltagem de 40 V e corrente de 30 mA. O ângulo de incidência utilizado foi de 5°, e o ângulo de varredura 2 θ variou de 20° a 120°.

3.7. Microscopia ótica e Espessura da camada

Para os testes de microscopia ótica, microscopia eletrônica, medição da espessura da camada, microdureza Vickers e Adesividade foram utilizadas as amostras que foram embutidas em baquelite e preparadas.

A microscopia ótica e a microscopia para determinar a espessura da camada de boretos foi realizado no Laboratório de Materiais da UTFPR, com o analisador de imagens da marca Olympus, modelo SC 30. Foram geradas fotos das camadas e do núcleo de cada amostra.

3.8. Microscopia eletrônica por varredura (MEV)

O teste de MEV foi realizado em um equipamento Hitachi TM3000, no laboratório da empresa Bosch. Além da demonstração da camada, o MEV também foi utilizado para análise do perfil de dureza.

3.9. Teste de dureza Vickers

O teste de dureza Vickers foi realizado no Laboratório de Materiais da UTFPR com o equipamento da marca Shimadzu, modelo HMV. Todas as amostras foram sujeitas a uma carga de 2,942 N. Como deseja-se obter uma dureza alta na camada de boretação, as durezas foram medidas das extremidades em direção ao núcleo. Foram realizadas duas medidas de dureza em cada amostra e realizado o cálculo da média para obtenção do gráfico.

3.10. Teste de adesividade VDI 3198

A norma VDI 3198 é própria para analisar a adesão de filmes finos. Esse teste foi realizado no laboratório de materiais da UTFPR, com o equipamento da marca Wilson, modelo M I G I.

Primeiramente foi aplicado a uma das amostras tratadas uma carga de 60 kgf em seguida, em outro local, uma carga de 100 kgf e por último, em um novo local, uma carga de 150 kgf. A análise desse teste é feita através de comparações de imagens obtidas em um microscópio com um padrão que está mostrado na figura a seguir.

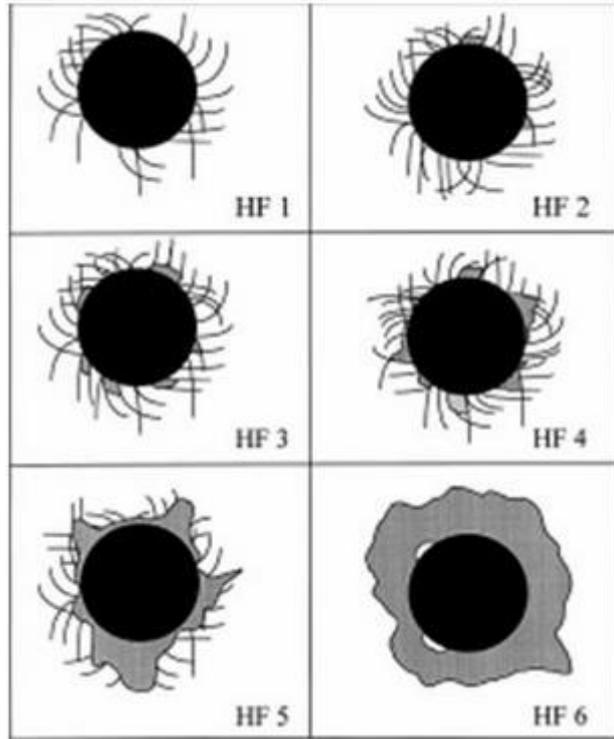


Figura 11 – Qualidade da adesão segundo norma VDI 3198

Para indentações com aspectos semelhantes a HF5 e HF6, a adesão não será satisfatória. Portanto, para penetração parecida com HF4 ou inferior, a adesividade das camadas é aceitável.

3.11. Usinagem

Para as ferramentas que foram submetidas ao banho, foram realizados testes de usinagem para avaliar o potencial de corte desse aço após o tratamento. Porém, antes dos testes, foram coletadas fotos dos bits a fim de comparação com o resultado final, essas fotos foram coletadas no equipamento da marca Olympus, modelo SZX12, no laboratório de materiais da UTFPR.

Para análise da potencialidade do tratamento superficial de boretção nas amostras, alguns corpos de prova foram montados em no torno Nardini modelo MS 205 do Laboratório de Usinagem da UTFPR (figura 12). A norma ISO 3685, para usinagem com ferramentas de aço rápido, recomenda usar o aço ABNT 1045. Essa norma estabelece ensaios de usinabilidade para determinar o tempo no qual uma ferramenta de corte pode trabalhar, até que seja necessária a sua substituição. Inicialmente, as barras do aço 1045 foram usinadas com uma ferramenta de metal

duro TNMG 160408, (pastilha classe 2025 do fornecedor Sandvik), com porta-ferramenta de especificação MTJNR 2020K – 16W. Para garantir a profundidade de corte, a peça foi faceada e uniformizada, deixando-as com o diâmetro de 31mm. A tabela 4 mostra como funcionará os parâmetros para cada ferramenta.

Tabela 4 – Parâmetros para cada tipo de ferramenta.

	Metal Duro		Aço D2	
	Desejada	Real	Desejada	Real
Velocidade [m/min]	60	63,33	20	19,5
Rotação [rpm]	597	630	205	200
Avanço [mm/rot]	0,05		0,297	
Profundidade de corte (raio) [mm]	0,5		1,0	



Figura 12 – Torno mecânico da marca Nardini, modelo MS 205, para realização dos testes de usinagem.

Após a preparação, a barra foi usinada com as amostras boretadas utilizando velocidade de corte de 20m/min, valor normalmente utilizado na indústria para torneamento do aço ABNT 1045 com ferramentas de aço rápido. Segundo

Ferraresi (1977), a velocidade de 45m/min é a máxima velocidade que uma ferramenta de aço rápido suportaria.

De posse dos valores de diâmetro e velocidade de corte, obteve-se a rotação do torno através da equação 1:

$$V_c = \frac{\pi DN}{1000} \quad (1)$$

Onde V_c é velocidade de corte em m/min, D é o diâmetro da barra a ser usinada em mm e N é a rotação do torno em rpm (rotações por minuto).

A rotação calculada foi de 205 rpm, porém o torno não possuía uma configuração que permitisse utilizar este valor, desta forma foi utilizada a rotação de 200 rpm, o que resultou em uma velocidade de corte real de 19,5 m/min.

O avanço utilizado foi de 0,297 mm/revolução, a profundidade de corte foi de 1 mm no diâmetro da peça e para cada bit boretado foi reservado uma extensão de 60mm da barra para realização da usinagem.

O comprimento de 200mm foi dividido em três pedaços de 60mm para usinagem e os 20 mm restantes para fixação da barra no torno. Para demarcação desses percursos, a mesma ferramenta para o faceamento foi utilizada. A figura a seguir mostra o esquema de usinagem. Como existem 6 ferramentas a ser testadas, a barra de 1045 será usinada duas vezes.



Figura 13 - Barra para usinagem

Caso a ferramenta suporte a velocidade de 20m/min, uma barra de cada têmpera será submetido à uma velocidade maior, em torno de 50 m/min

Após os testes, foi feita a análise do desgaste nas pontas das ferramentas através da lupa do Laboratório de Materiais da UTFPR, utilizada anteriormente (figura 15).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Espectrometria de emissão ótica

A tabela 5, mostra os valores que devem possuir os aços D2 e o resultado obtido na espectrometria de emissão ótica feita com o aço que foi usado para os testes. Pode-se verificar que a composição obtida está dentro da faixa da composição nominal.

Tabela 5 – Composição química do aço D2

	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
Aço D2 (nominal)	1,4 - 1,6	0,6 máx	0,6 máx	11,0 – 13,0	0,7 - 1,2	1,1máx
Aço D2 (obtida)	1,6	0,426	0,369	9,199	0,699	0,826

4.2. Caracterização do aço após tratamento

O aço D2 foi submetido ao tratamento, temperado e revenido e apresentou aspecto micrográfico mostrado na figura a seguir. Percebe-se que sua estrutura é predominantemente martensítica, com grão de carbonetos presentes, representados pelas partes esbranquiçadas.

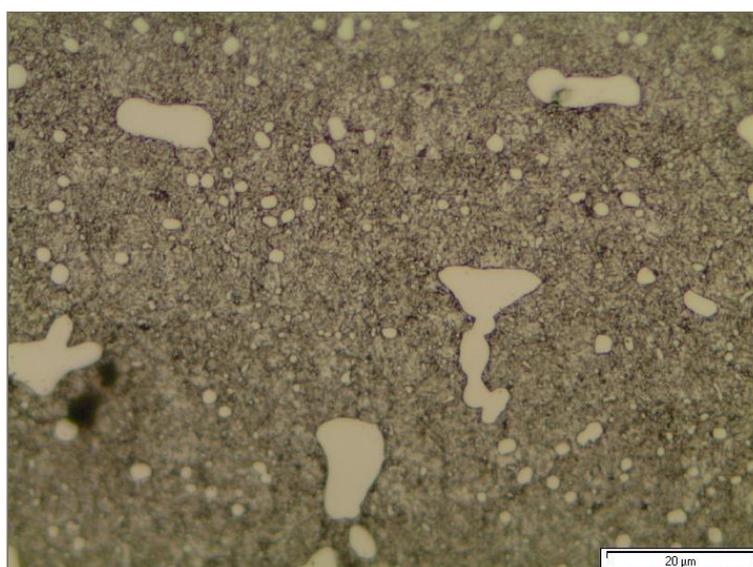


Figura 14 - Microscopia do aço D2 após banho de boretação, têmpera em óleo e revenimento

4.3. Boretação do aço AISI D2

A figura 15, mostra uma camada endurecida no aço AISI D2. A camada formada apresenta três regiões distintas: 1 A camada boretada; 2. Uma zona intermediária entre a camada e o substrato; 3 O substrato. A espessura média foi de 45 μm (figura 16). O teor de cromo mais elevado do aço AISI D2 foi provavelmente o responsável por uma menor espessura da camada, visto que aços que não apresentam cromo em sua estrutura podem apresentar maior espessura. Segundo Sinha (1991) os elementos de liga restringem a difusão do boro e retardam o crescimento da camada de boreto, devido a formação de uma barreira de difusão.

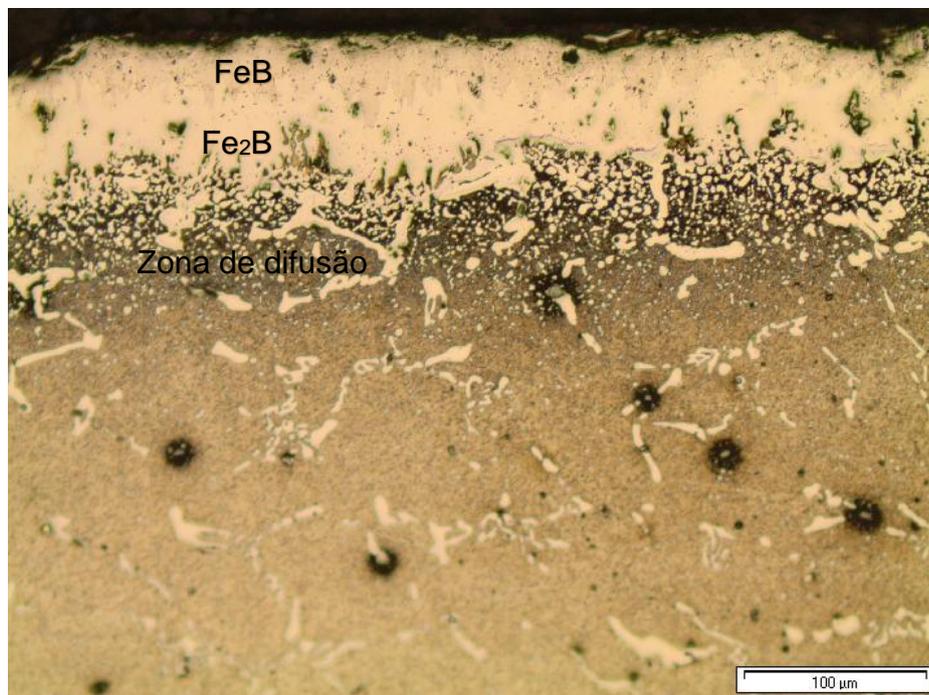


Figura 15 - Camada de boretos do aço D2 temperado em óleo e revenido

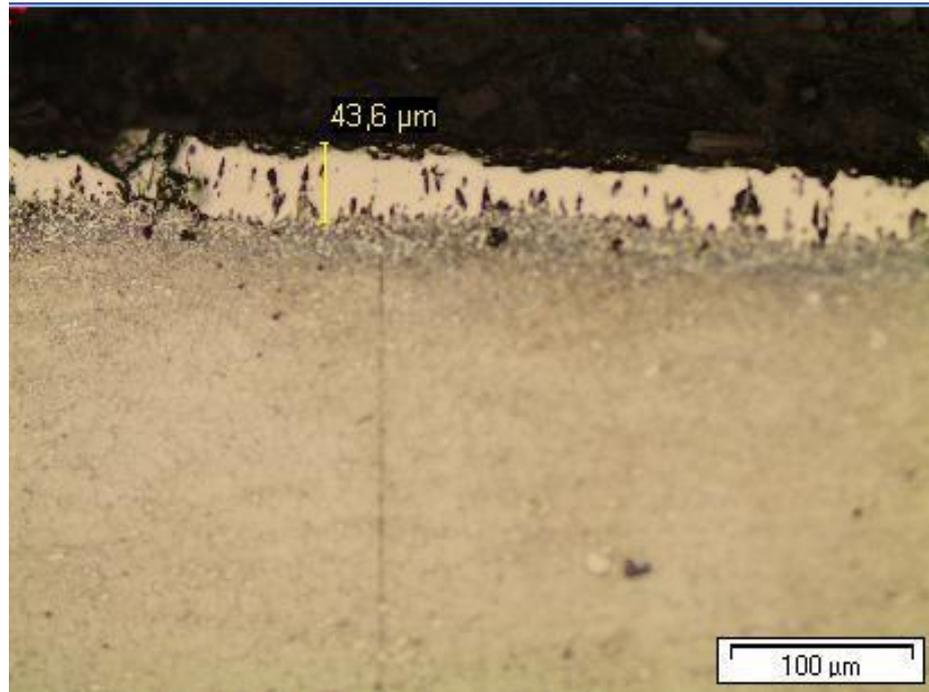


Figura 16 – Espessura da camada endurecida por boretação

Para os processos de boretação é comum que a camada fique entre 10 e 300 μm . Esse valor adquirido é considerado um valor mediano, pois em outros processos, como PVD e CVD, a camada fica em torno de 5 μm , bem abaixo do que foi adquirido.

O difratograma de raios-X é mostrado na figura 17. Pode-se verificar que foram identificados boretos de Ferro (FeB , Fe_2B , Fe_3B), com predominância da fase Fe_2B .

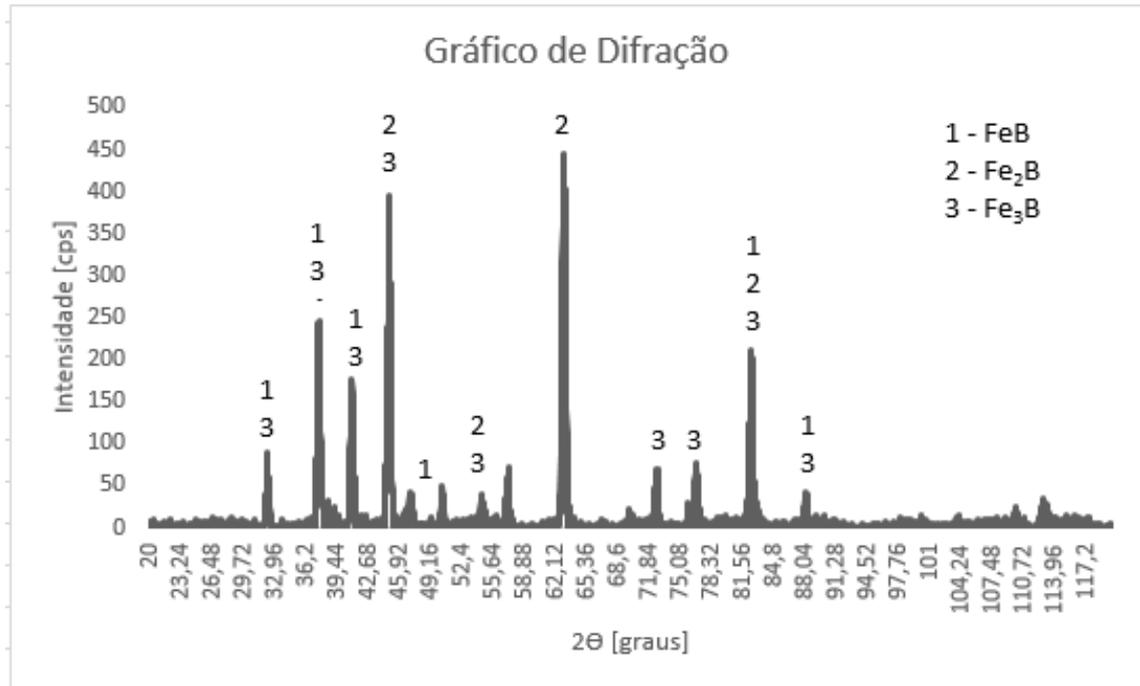


Figura 17 – Gráfico de difração de raio-X do aço D2 após banho de

O boreto de ferro FeB é favorecido quando se tem um maior potencial de boretamento. No caso de uma barra para usinagem o melhor é a formação de uma camada única de Fe₂B, visto que a fase FeB, rica em boro, é mais frágil. Outro fator a ser considerado é o fato que as duas fases apresentam comportamentos distintos, com diferenças significativas em seus módulos de elasticidade e coeficientes de expansão térmica. Portanto, estes fatores podem interferir na usinagem, visto que este processo é extremamente severo podendo haver trinca na interface das duas fases. (ASM, 1991)

Como na microscopia ótica, a microscopia eletrônica também mostra a camada endurecida. Nesse caso, não foi possível observar a camada FeB, isso pode ter ocorrido por um possível contraste gerado na imagem. A figura 18 mostra a camada gerada.

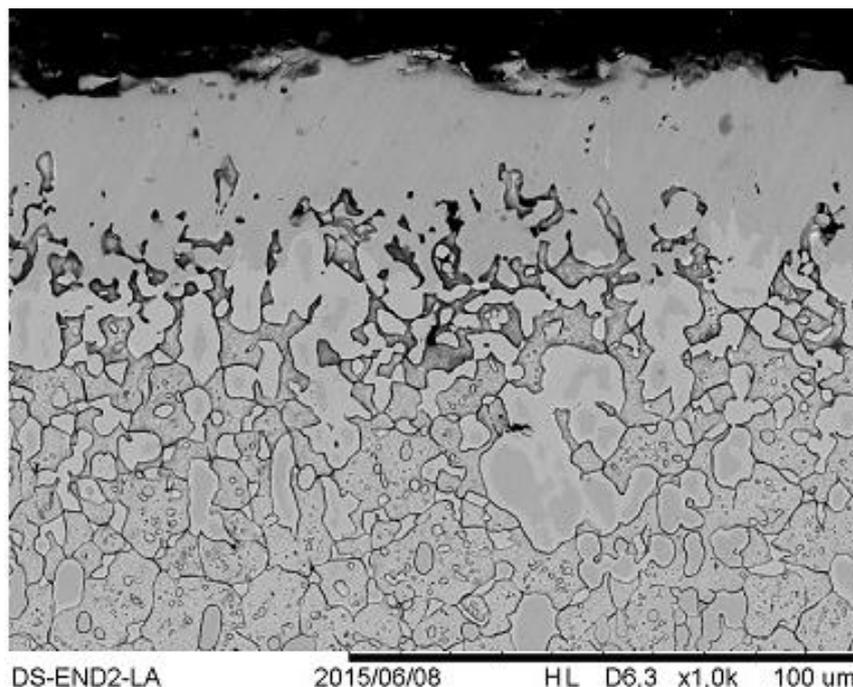


Figura 18 – Microscopia eletrônica por varredura do aço D2 submetido ao banho de boretação, temperado e revenido.

4.4. Dureza Vickers

Antes de avaliar a dureza nas peças tratadas, foram feitas medições no aço em seu estado de fornecimento. Com uma média de quatro valores, o aço obteve valor de 240 HV de dureza. Essas durezas foram avaliadas ao longo da amostra, mostrando que o aço possui um valor constante em toda a peça.

Para a medição das amostras, foram realizadas penetrações das extremidades da amostra, onde está a camada, até o núcleo da mesma. O gráfico demonstrado na figura 19, mostra os locais das indentações e as durezas obtidas.

Essas durezas estão mostradas em uma amostra que foi resfriada ao ar. Foram realizadas três medidas para se obter a média (tabela 6). As amostras resfriadas em óleo obtiveram valores muito próximos.

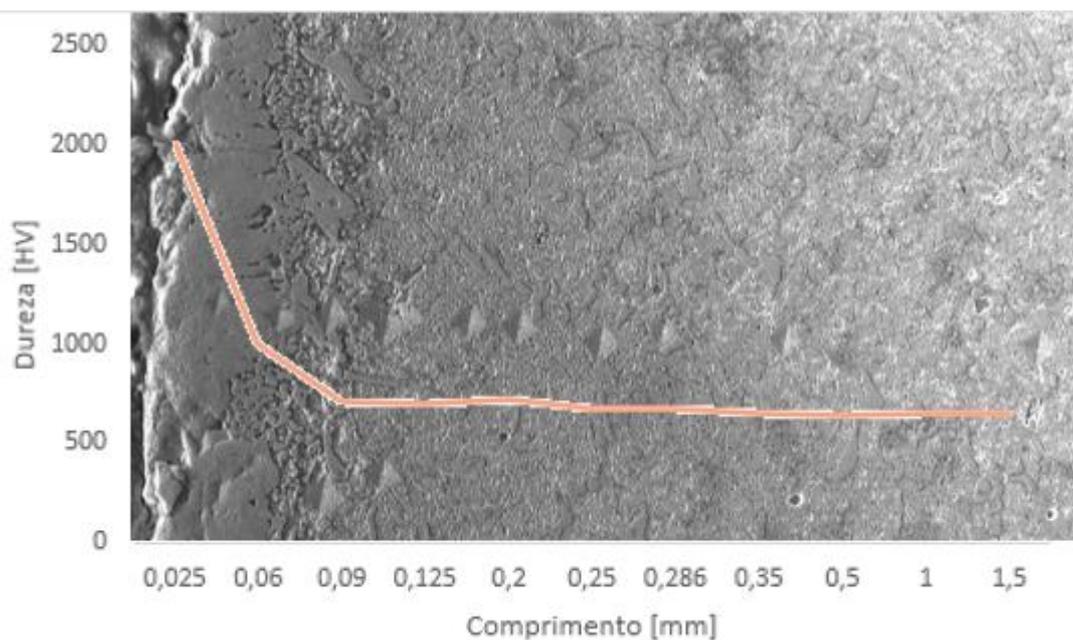


Figura 19 - Gráfico de dureza com identações do microdurômetro

Pelos tamanhos das penetrações já é possível perceber que o material tende a ficar mais mole em seu núcleo. Percebe-se que a dureza é extremamente alta na superfície, onde está situada a camada, com dureza perto de 2000 HV, cai bruscamente assim que sai da camada e estabiliza em torno de 700 HV.

A tabela 6 mostra a média de três amostras diferentes, todas elas boretadas, temperadas em ar e revenidas.

Tabela 6 – Média das durezas das amostras do aço D2 submetidas à boretação, temperadas em ar.

Dureza [HV]	Comprimento [mm]
1989	0,025
1052	0,06
959	0,09
935	0,125
852	0,2
839	0,25
790	0,286
716	0,35
725	0,5
723	1
714	1,5

4.5. Adesividade da camada

As figuras a seguir mostram o indentador e o aspecto formado em volta dele. As trincas estão indicadas pelas setas vermelhas.

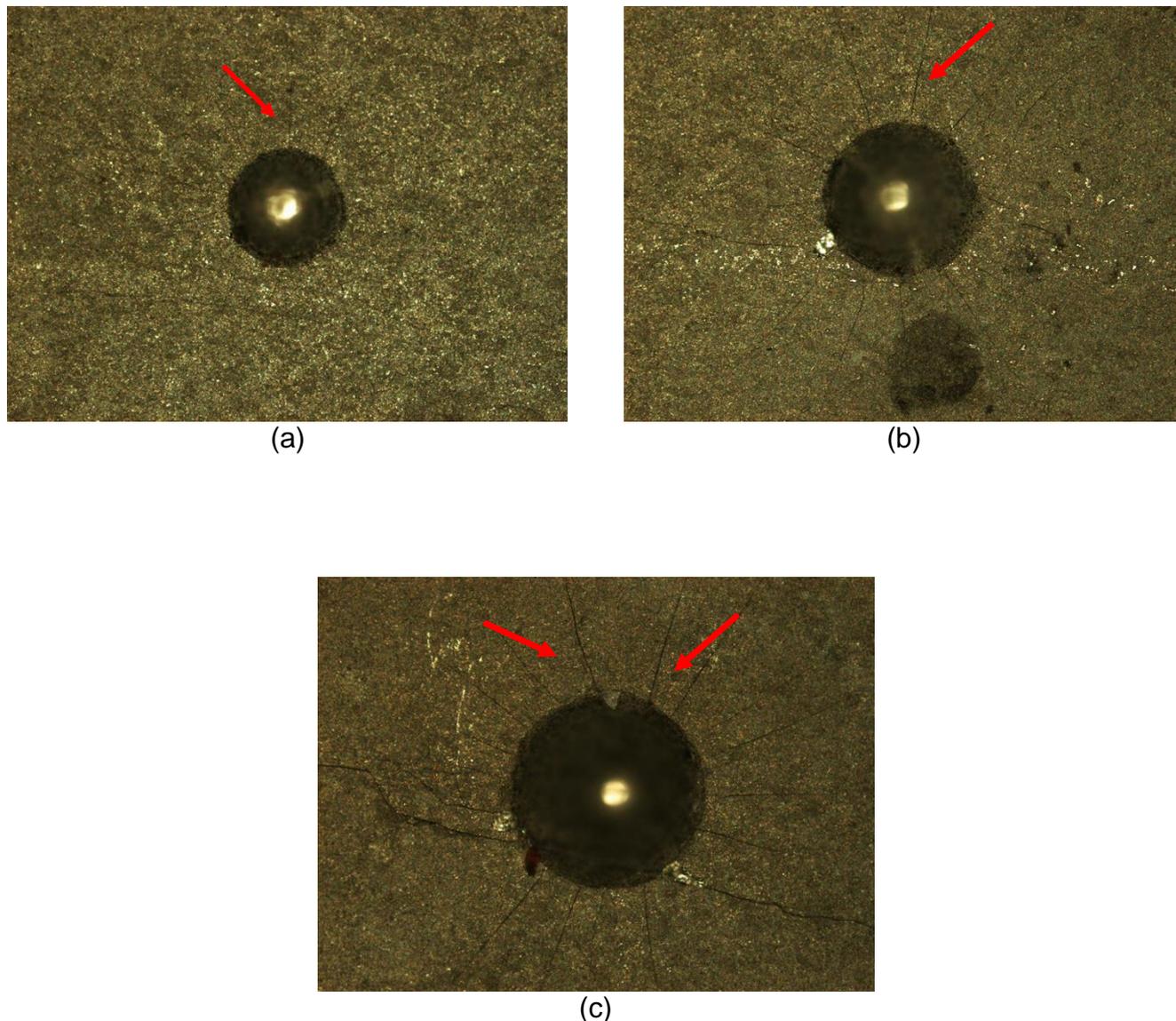


Figura 20 – Indentações para análise de adesividade do aço. (a) carga aplicada de 60 kgf; (b) carga aplicada de 100 kgf; (c) carga aplicada de 150kgf

Como mostrado anteriormente na figura 11, existe uma norma a fim de comparação.

A figura 21, mostra a marca de indentação com 60 kgf mais ampliada. Percebe-se que houve trincas suaves na peça e não houve o espalhamento das mesmas. Assim, pode-se associar adesão do tipo HF1.

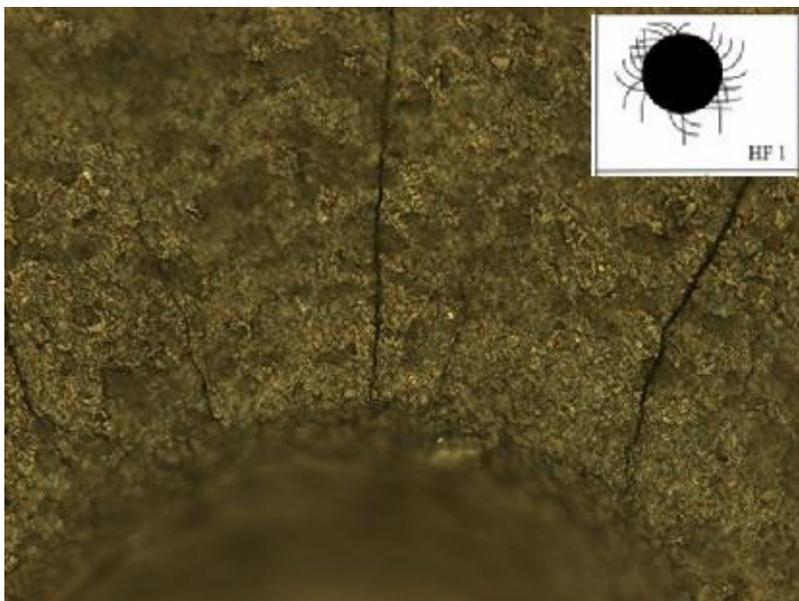


Figura 21 – Indentação de 60 kgf para o aço AISI D2 submetido a tratamento de boretação

No caso das cargas de 100 e 150 kgf, as trincas também não se propagaram ao redor de outras trincas. A adesão também é do tipo HF1, como mostra as figuras 22 e 23.



Figura 22 - Indentação de 100 kgf para o aço AISI D2 submetido a tratamento de boretação

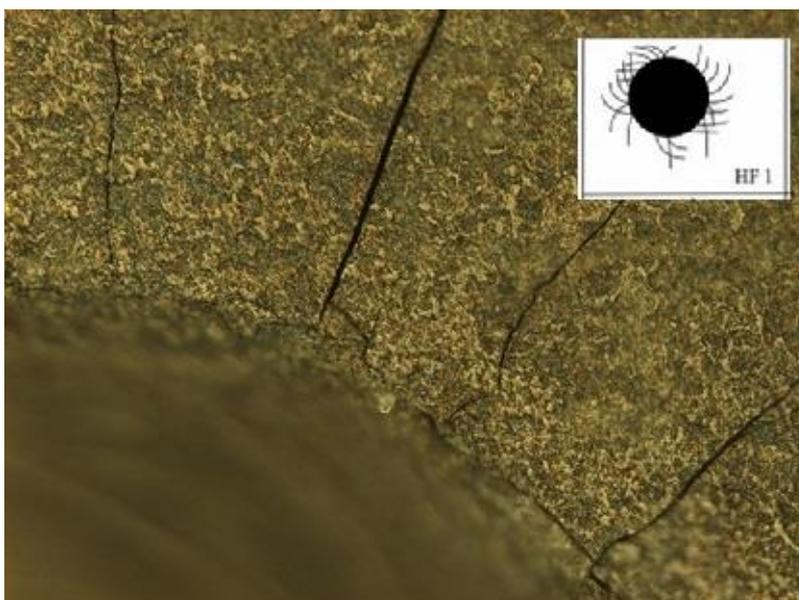


Figura 23 - Indentação de 150 kgf para o aço AISI D2 submetido a tratamento de boretação

A adesão obteve resultados muito bons, visto que todas puderam ser associadas ao tipo HF1 segundo norma VDI 3198.

4.6. Ferramentas de Corte

Com o intuito de comparação, foram tiradas fotos na lupa das barras antes e após a usinagem.

Quando as fotos foram realizadas antes da usinagem, percebeu-se duas barras que não estavam em plenas condições para realizar a usinagem.

Uma das barras, mostrada na figura a seguir, foi resfriada ao ar e apresentou diversas trincas na parte superior. Os bits foram enumerados, esse seria a barra 1 e foi descartado pelo fato de que essas trincas poderiam quebrar facilmente na hora do teste.

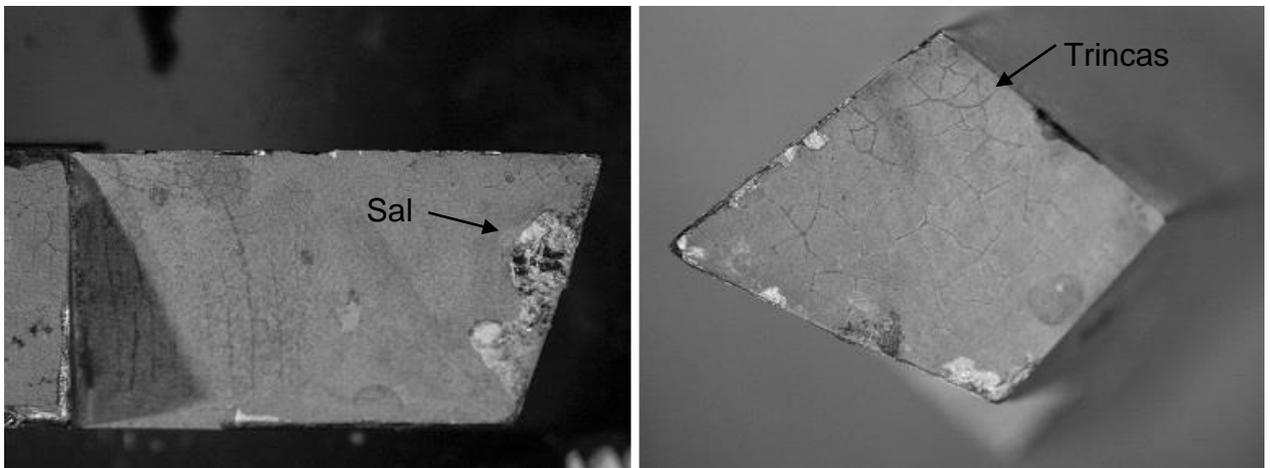


Figura 24 – Ferramenta 1 submetido ao banho de boretação, resfriado ao ar e revenido.

A segunda ferramenta, representado na figura 25, foi resfriada no óleo e apresentou um lascamento na ponta. Isso pode ter acontecido, pois quando a barra foi retirada do óleo alguns pedaços do banho ficaram grudados e no momento de retirar, pode ter danificado a barra. Como a ponta em que seria feita a usinagem, já estava danificada, não fazia sentido usar a mesma para o teste do potencial de usinagem

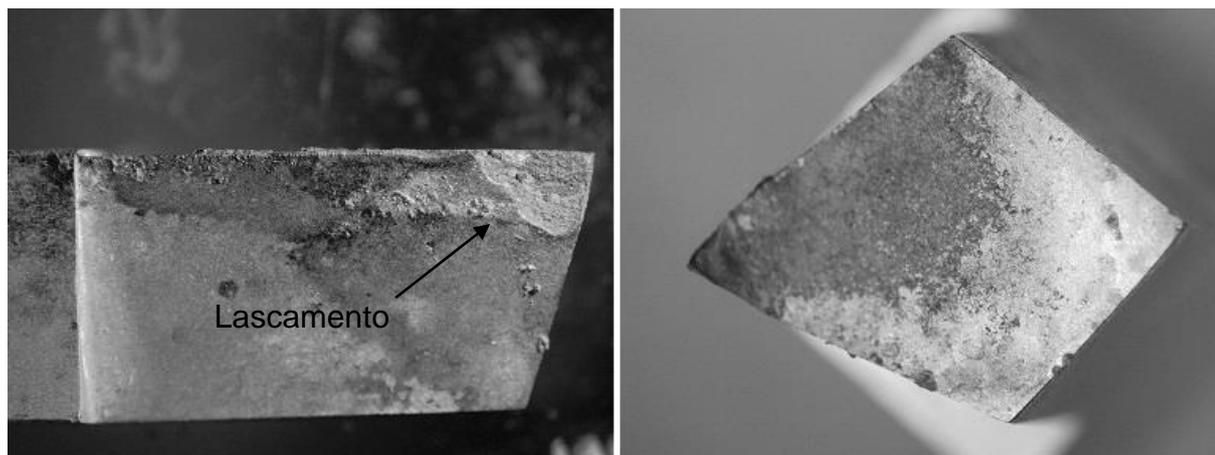


Figura 25 – Ferramenta 4 submetido ao banho de boretação, resfriado ao óleo e revenido ao ar.

4.7. Usinagem

Quatro ferramentas foram submetidas a usinagem, as duas primeiras seriam submetidas a velocidade de 20 m/min e as duas últimas a velocidade de 50m/min. Como as primeiras ferramentas não suportaram a velocidade de 20m/min, uma velocidade maior também não seria suportada. Assim as ferramentas 5 e 6 foram submetidas à mesma velocidade das ferramentas 2 e 3.

As figuras 26 e 27 mostram a comparação da usinagem feita na ferramenta resfriada ao ar. Percebe-se nas imagens geradas na lupa que houve lascamento da ferramenta e por consequência o fim da vida da mesma.

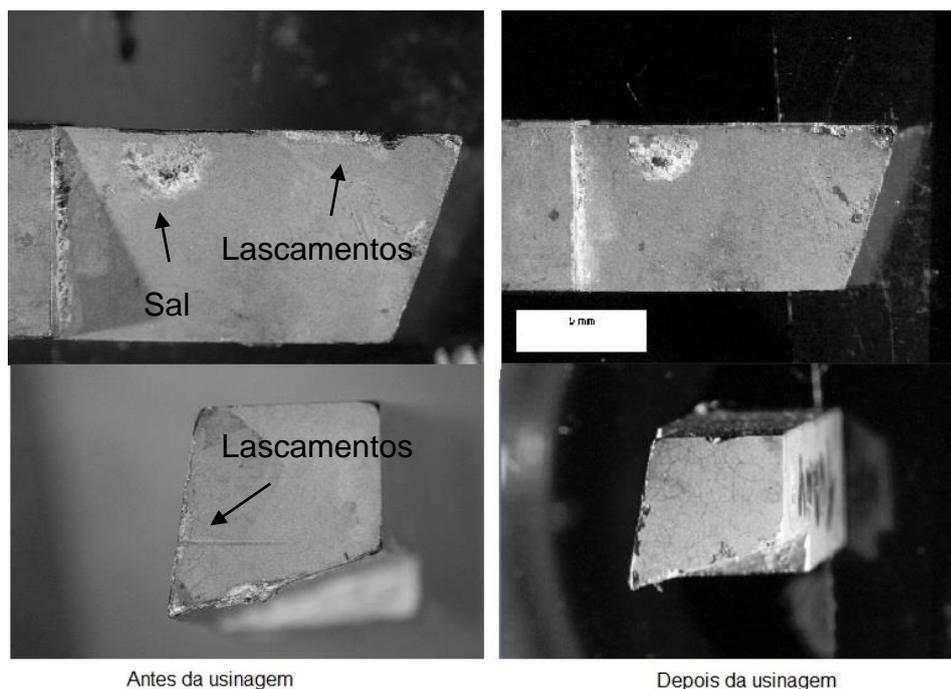


Figura 26 – Barra 2. Antes e depois da usinagem.

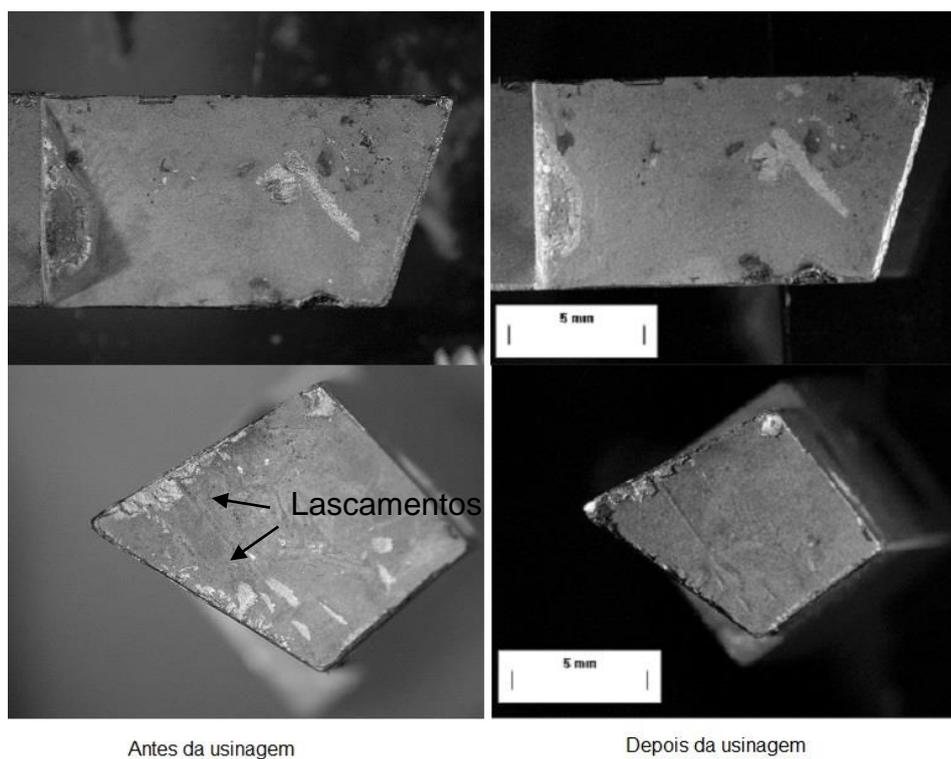


Figura 27 – Ferramenta 3. Antes e depois da usinagem.

A figura 28 mostra a ferramenta 2 resfriada ao ar, além disso, pontos de referência para exemplificar o tamanho dos desgastes, foram marcados.

Na ferramenta de número dois houve um desgaste aproximado de 1,02 mm.

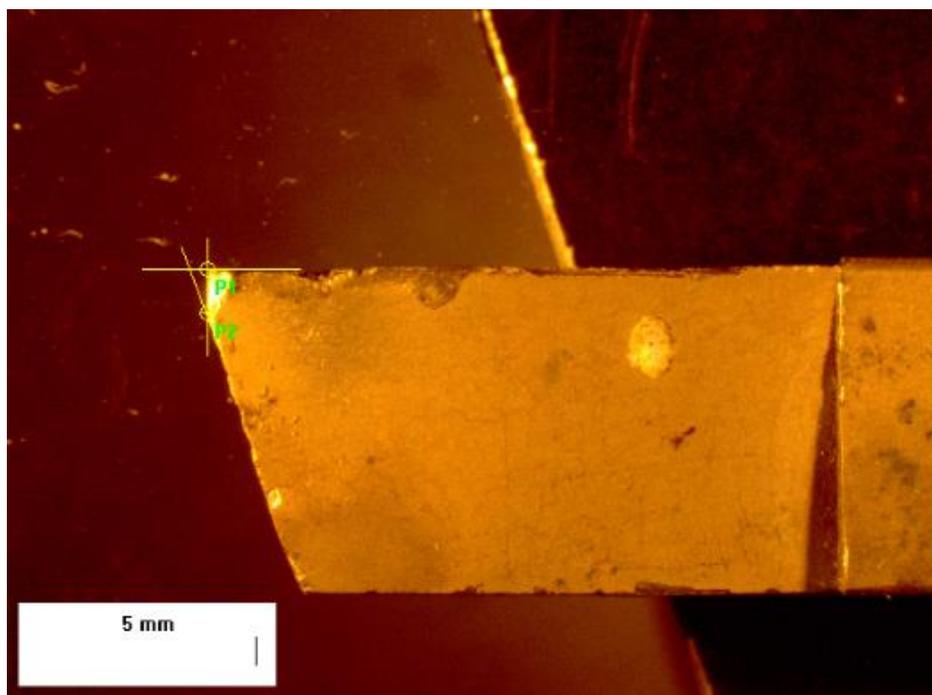


Figura 28 – Desgaste da ferramenta 2 resfriada ao ar.

O desgaste da ferramenta três é mostrado na figura 29. Esse desgaste foi de 0,89 mm, um valor próximo ao da ferramenta 2. Em média, houve desgaste de 0,95mm nas peças resfriadas ao ar.

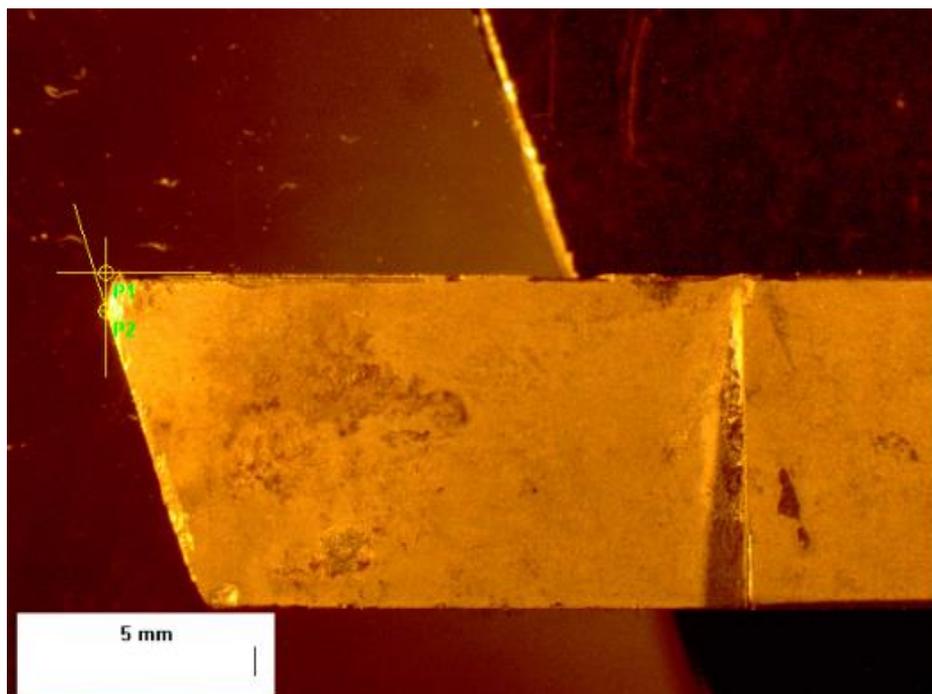


Figura 29 – Desgaste da ferramenta 3 resfriada ao ar.

Na figura 30, observa-se o cavaco gerado para essas peças. É visto que o cavaco não apresentou cor muito escura, mostrando que a ferramenta suportou a temperatura. Os desgastes ocorridos na ferramenta podem ser associados ao fato de que a camada endurecida pode ter sido retirada antes mesmo da realização da usinagem, exemplificado pelos pequenos lascamentos antes dos testes.

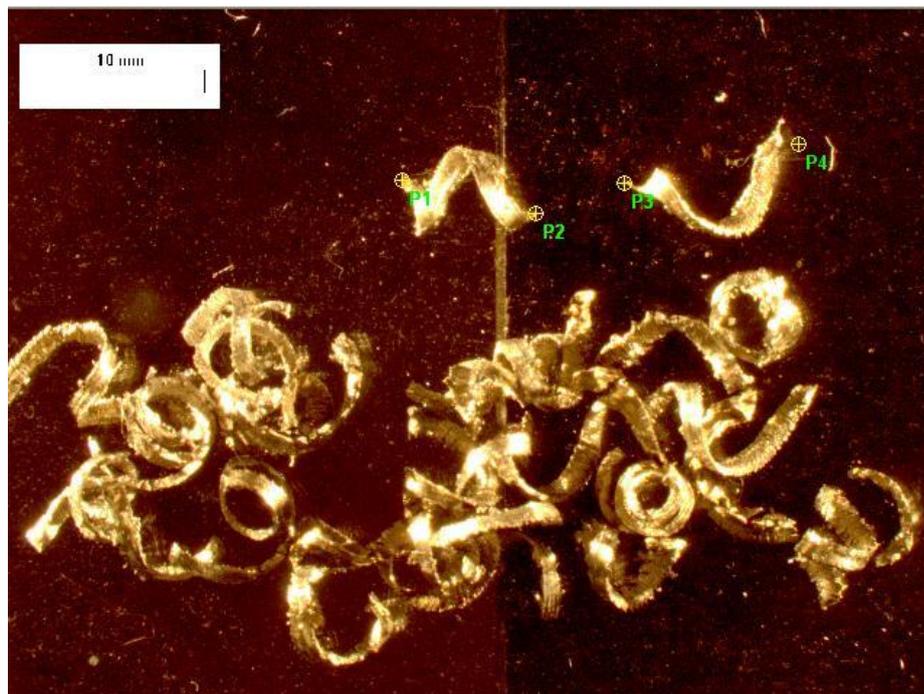


Figura 30 – Cavaco das ferramentas resfriadas ao ar.

As figuras 31 e 32 mostram as ferramentas resfriadas no óleo, antes e depois da usinagem.

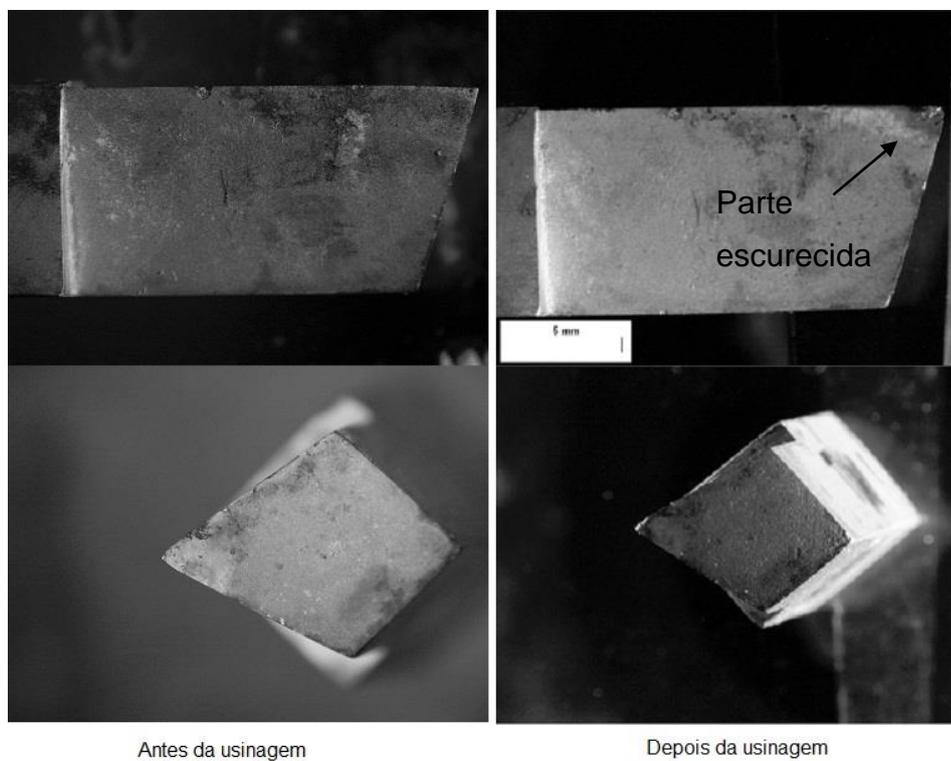


Figura 31 – Ferramenta 5. Antes e depois da usinagem.

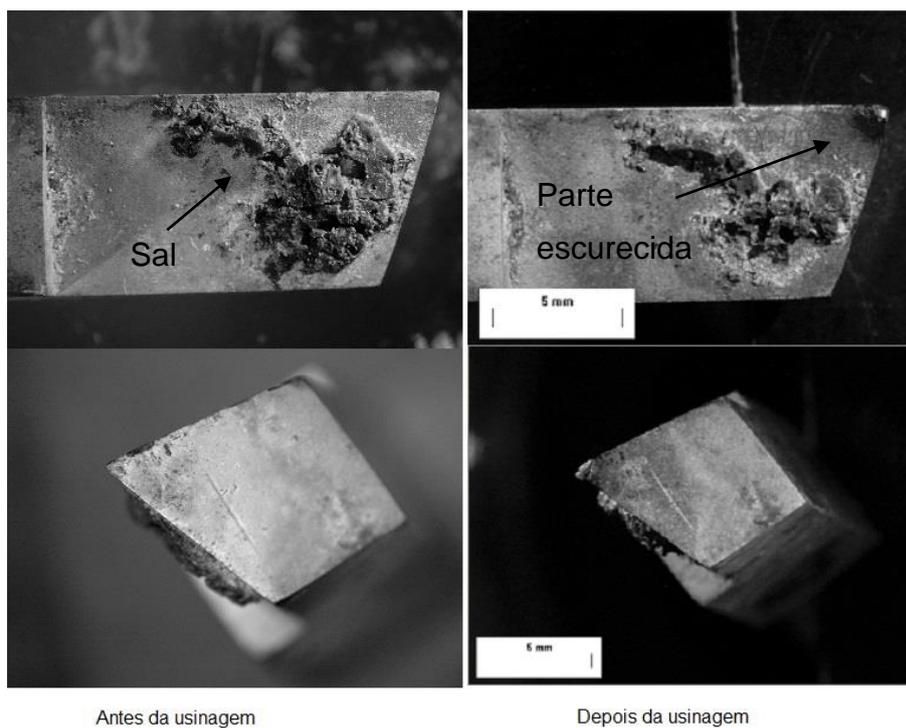


Figura 32 - Ferramenta 6. Antes e depois da usinagem.

Mas percebe-se que a temperatura não foi suportada. Na figura 32, na vista lateral da ferramenta, é possível perceber uma coloração mais escura na ponta do gume, devido à elevação de temperatura. Também houve a danificação da mesma, percebida pelo desgaste no flanco da ferramenta e lascamentos próximos à ponta do gume.

Além disso, o cavaco ficou com coloração azulada conforme mostra a figura 33.

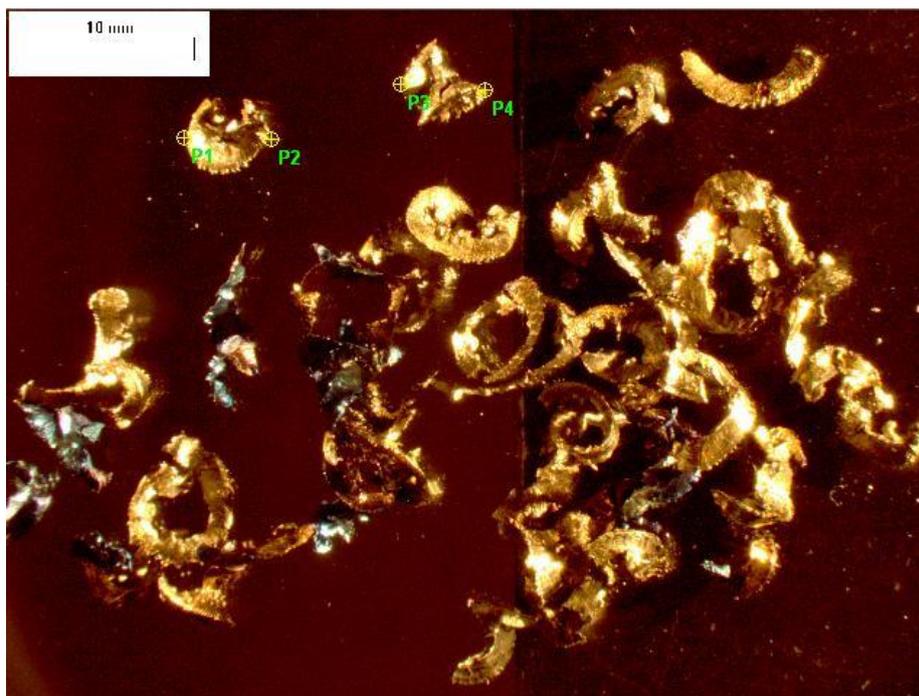


Figura 33 – Cavaco da ferramenta resfriada em óleo.

. Os desgastes das barras resfriadas em óleo, estão mostrados nas figuras 34 e 35. Para a primeira ferramenta (5) houve desgaste de 0,95 mm, e na segunda barra (6), desgaste de 0,93mm. Assim, chega-se à média de 0,94mm de desgaste para as barras resfriadas no óleo.

Havia expectativa de que a peça resfriada em óleo obtivesse tempo de vida superior à da ferramenta resfriada em ar, a razão para a semelhança do desgaste nos dois tipos de resfriamento pode ser associada ao fato de que a peça que foi resfriada em óleo havia sido submetida a um primeiro banho de boretação que não obteve sucesso na formação da camada, porém pode ter ocorrido a fragilização dessas barras com esse banho.

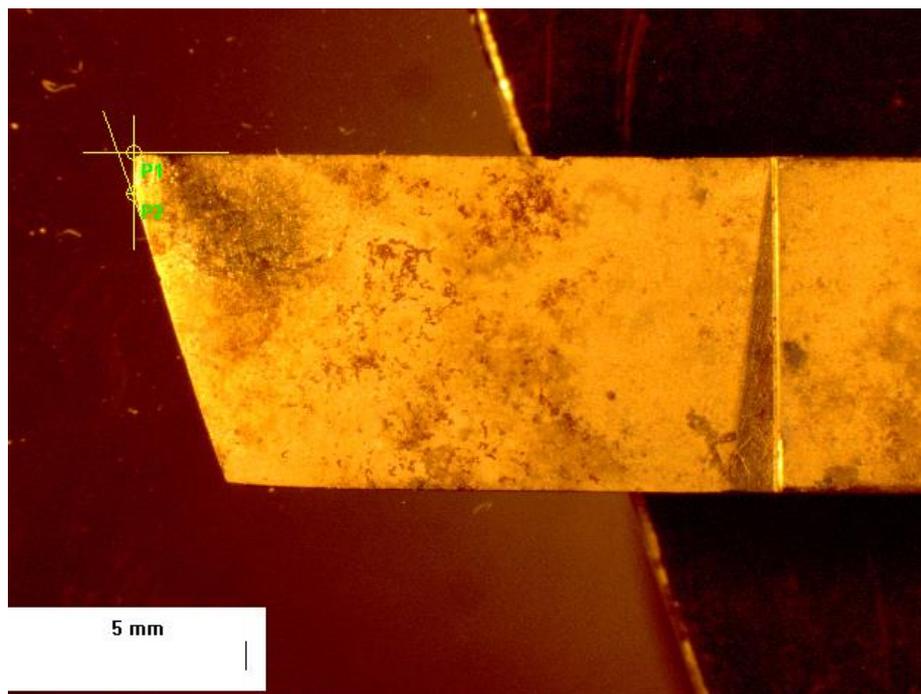


Figura 34 – Desgaste da ferramenta 5 resfriada em óleo.

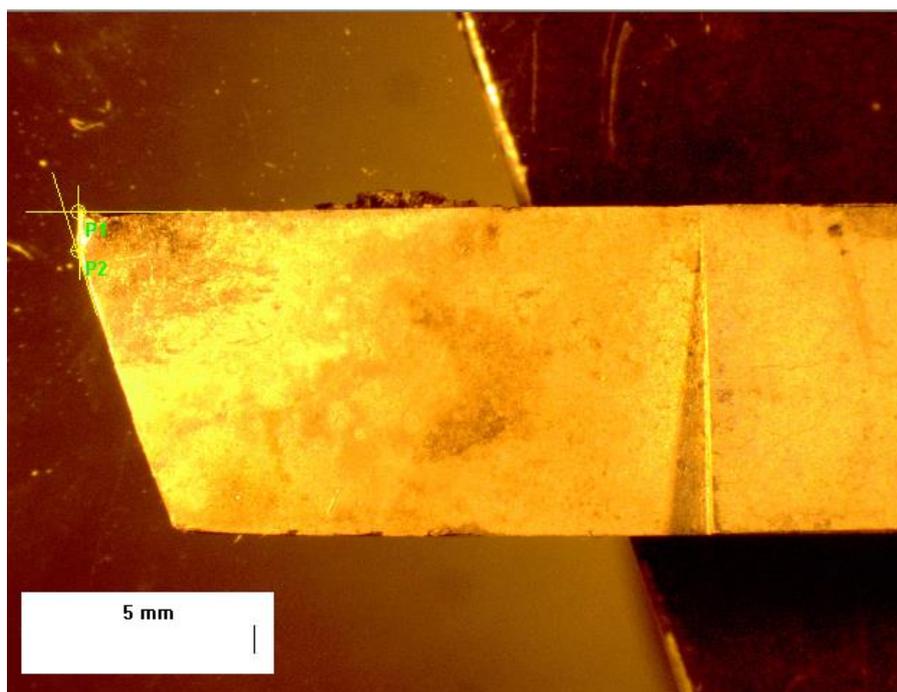


Figura 35 – Desgaste da ferramenta 6 resfriada no óleo.

A tabela a seguir mostra a relação dos desgastes de cada ferramenta e a coloração dos cavacos.

Tabela 7 – Degaste e coloração do cavaco das barras utilizadas no teste de usinagem.

<i>Têmpera</i>	<i>Barra</i>	<i>Desgaste [mm]</i>	<i>Coloração Cavaco</i>
AR	<i>Barra 1</i>	<i>Inapropriada</i>	
	<i>Barra 2</i>	<i>1,02</i>	<i>Prata</i>
	<i>Barra 3</i>	<i>0,89</i>	
ÓLEO	<i>Barra 4</i>	<i>Inapropriada</i>	
	<i>Barra 5</i>	<i>0,95</i>	<i>Dourada e Azulada</i>
	<i>Barra 6</i>	<i>0,93</i>	

Através da análise desta tabela, foi questionado porque as ferramentas obtiveram valores tão próximos mas seus cavacos e pontas da ferramenta (após a usinagem) ficaram tão diferentes. Através de uma investigação mais apurada, percebeu-se que as ferramentas resfriadas ao ar apresentaram uma pequena depressão próxima à quina da ferramenta. O desgaste de cratera é um tipo de desgaste que não deveria ocorrer em ferramentas de aço rápido, como citado anteriormente, porém essas depressões ficaram muito semelhantes a este tipo de desgaste, como mostra a figura 36.

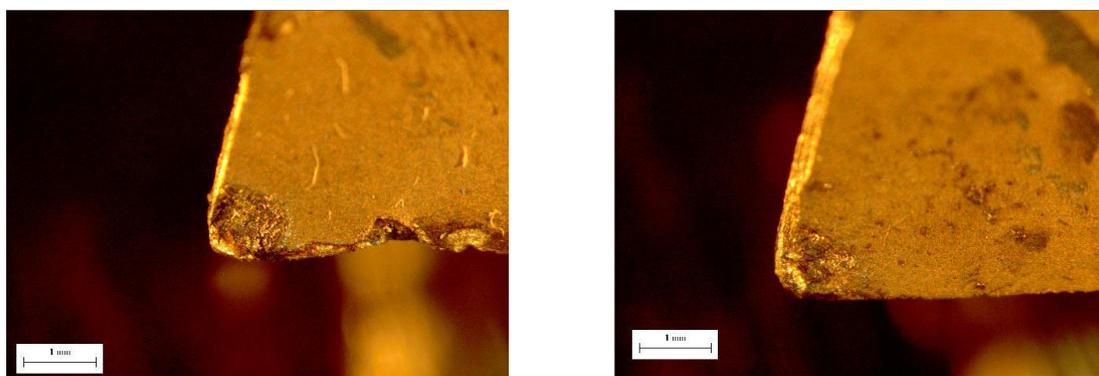


Figura 36 – Depressões formadas nas ferramentas resfriadas ao ar.

Esse tipo de desgaste precisa ser melhor investigado para uma afirmação de que é realmente um desgaste de cratera. Caso isso seja confirmado, a explicação pode ser associada ao gráfico mostrado na figura 37. Esse gráfico mostra o comportamento da força de corte quando desgastes de flanco e cratera acontecem simultaneamente. A figura é dividida em três regiões, a primeira região mostra um rápido crescimento da força de corte nos estágios iniciais do processo de usinagem, isso acontece pelo fato de que os desgastes de flanco ocorrem mais rapidamente que os desgastes de cratera, gerando mais atrito na ferramenta. A segunda região torna-se constante pelo fato que, com o aumento do desgaste de cratera, também haverá o aumento do ângulo de saída da ferramenta, facilitando assim o corte. No fim de vida da ferramenta, a força de corte cresce rapidamente outra vez, pois não há mais a compensação na força de corte e a ferramenta já possui desgastes de cratera e flanco elevados. (Diniz et al, 2010)

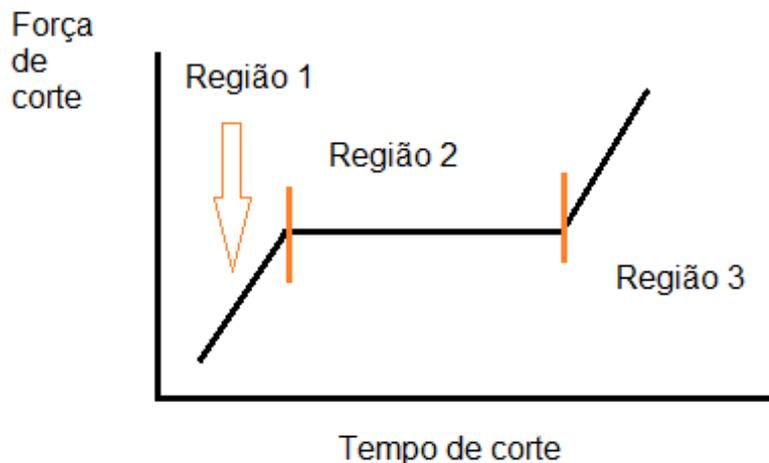


Figura 37 – Força de corte na presença de desgastes de flanco e de cratera.

Fonte: Diniz et al, 2010.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Levando em consideração os objetivos estipulados no começo do projeto, pode-se dizer que em relação a alguns fatores o trabalho obteve sucesso.

- Dureza: o objetivo foi alcançado, deixando as amostras com dureza de aproximadamente 2000 HV na região da camada de boretos.
- Tamanho e estrutura da camada: o tamanho da mesma atingiu um valor coerente comparado a outros tipos de tratamento (PVD, CVD), porém, se a camada tivesse ficado maior, é possível que melhores resultados na usinagem pudessem ser obtidos. A camada apresentou apenas uma fina porção de FeB. Além disso não houve formação de subcamadas, que também é onde se concentra grande fragilidade.
- Difração de Raio-X: Nesse teste foi possível observar as fases FeB, Fe₂B e Fe₃B, porém, onde se concentra o FeB, foram registrados os menores picos, em sua maioria.
- Adesividade: apresentou excelente aderência, aplicada a norma VDI 3198, obtiveram os menores valores de propagação de trinca, para todas as cargas aplicadas.
- Usinagem: Apesar do resultado em alguns testes descritos acima, na usinagem, a ferramenta não suportou a velocidade de 20 m/min, que seria a menor velocidade a ser usada. Um dos fatores que pode ter vindo a acontecer, é que a ferramenta pode não ter formado uma camada suficientemente grande, e como visto nas figuras dos bits antes da usinagem, há alguns riscos e esfoliações na ferramenta antes mesmo de ela ser usinada. Em função disso, pode ser que a camada tenha sido arrancada do gume da ferramenta. Além disso, com o crescimento brusco da dureza, de 700 a 2000 HV, é possível que a peça tenha se tornado muito frágil.
- Em questão da análise feita em relação aos diferentes tipos de resfriamento do banho, é possível afirmar que este não é um fator que causaria mudanças no projeto, visto que os testes foram muito parecidos para os dois casos.

Seriam necessários mais testes para poder afirmar com clareza qual é o fator que foi determinante para que o potencial não fosse alcançado. Uma das possibilidades seria tratar outra ferramenta e deixá-la por mais tempo dentro do forno com a finalidade de formar uma camada boreada maior. Outro ponto seria, maior cuidado na retirada da peça do banho e dos possíveis pedaços que ficarem presos à peça.

6. PROJETOS FUTUROS

- Investigação dos resultados obtidos nesse projeto;
- Obtenção de camadas endurecida mais espessas, através do aumento do tempo de boretação.
- Diminuição do potencial de boretação, com intuito de evitar a formação da camada de FeB que é muito frágil.
- Realização do tratamento de TRD (Tratamento termo-reativo de deposição e difusão) com a introdução de FeV no aço AISI D2, com o intuito de formação de uma camada de carboneto de vanádio.

7. REFERÊNCIAS

- ARAI, T. **TRD Method**. In: Proceedings of the Japan International Tribology Conference. Nagoya, 1990.
- ARAI, T. **TRD Method**. In: International Congress for Surface Finishing. São Paulo, 1992.
- BORNHOLD, A; TORMES, D; BENDER, R; ALVES, V. J. **Análise da Influência do Material sobre o Desgaste da Ferramenta de Usinagem**, 2011. Disponível em: http://www.fahor.com.br/publicacoes/sief/2011_Analise_Influencia_Material_Desgaste_Ferramenta_Usinagem.pdf Acesso em 15 julho, 2014.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. 2.ed. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 1986.
- FERRARESI, D. **Fundamento de usinagem dos metais**. São Paulo, Edgard Blücher, 1977.
- HECK, S. C. **Influência da boretação com pó na resistência ao desgaste, corrosão e oxidação dos aços AISI 1060 e AISI H13**. Universidade de São Paulo, 2010.
- MENDANHA, A; FRANCO JÚNIOR, A. R; GOLDENSTEIN, H; TSCHIPTSCHIN, A. P; PINEDO, C. E. **Principais Parâmetros Metalúrgicos e Suas Influências na Qualidade e Desempenho do Aço para Trabalho a Frio Aisi D2**, 2008. Disponível em: <http://heattech.com.br/trabalhos/2008%20-%20ABM%20Moldes%20-%20Revis%C3%A3o%20AISI%20D2.pdf> Acesso em 18 julho, 2014.
- OLIVEIRA, C. **Avaliação de Camadas de Carbonetos e de Boretos Produzidas nos Aços AISI H13 e D2 por Meio de Tratamentos Termo-reativos**. 116 p. Tese – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006
- PINEDO, C E. **Tratamentos Térmicos dos Aços Ferramenta – Um Ensaio**, 2010. Disponível em: <http://www.heattech.com.br/boletins/Boletim-T%C3%A9cnico-09-2010.pdf> Acesso em 20 julho, 2014.
- STEMMER, C.E. **Ferramentas de Corte**. 2.ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1989.

STOETERAU, L. R. **Desgaste de Ferramentas**, 2007. Disponível em: <http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/Stoterau/Aula-05-U-2007-1-desgaste.pdf> Acesso em 20 julho, 2014.

DINIZ, A.E., MARCONDES, F.C., LEMOS COPPINI, N. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, 7ª ed. São Paulo: Ed. Artliber, 2010.

Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo – FATEC. **Tratamentos Termoquímicos**. São Paulo.

HAMILTON NUNES DA COSTA. **Tratamento Térmico Aplicado Tratamentos termoquímicos**. Disponível em: <<http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/sistematramentotermoquimico.asp>> acessado em: 15/07/2014.

STOETERAU, L. R. **Desgastes de Ferramenta**. Local: Universidade de São Paulo, 2012. 62 slides, color. Acompanha texto.