

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**Felipe Soares Lacerda**

**CONTRIBUIÇÃO À USINAGEM DE PEÇAS DE METAL DURO  
SINTERIZADO**

**Taubaté – SP**

**2015**

**Felipe Soares Lacerda**

**CONTRIBUIÇÃO À USINAGEM DE PEÇAS DE METAL DURO  
SINTERIZADO**

Dissertação apresentada para obtenção do  
Título de Mestre pelo Curso Mestrado  
Profissionalizante de Engenharia Mecânica  
do Departamento de Engenharia Mecânica  
da Universidade de Taubaté,  
Área de Concentração: Projeto Mecânico  
Orientador: Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini

**Taubaté – SP**

**2015**

# Felipe Soares Lacerda

## CONTRIBUIÇÃO À USINAGEM DE PEÇAS DE METAL DURO SINTERIZADO

Dissertação apresentada para obtenção do  
Título de Mestre pelo Curso Mestrado  
Profissionalizante de Engenharia Mecânica  
do Departamento de Engenharia Mecânica  
da Universidade de Taubaté,  
Área de Concentração: Projeto Mecânico

**Data:** 24/02/2015

**Resultado:** \_\_\_\_\_

### BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini

Universidade de Taubaté

Assinatura \_\_\_\_\_

Profa. Dra. Luiza de Castro Folgueras

Universidade de Taubaté

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz

Universidade Estadual de Campinas

Assinatura \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini, pela orientação e paciência no decorrer desse trabalho.

Ao M. Eng. Marcelo Bonandi e sua equipe, ao Sr. Rudolf Malaquias agradeço pelo apoio que me dispensaram.

Agradeço à Empresa Sandvik Coromant pelo suporte prestado a essa pesquisa, tais como, doação de materiais e testes laboratoriais.

Ao Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, ao Eng. Aristides Magri e a UNICAMP pela disponibilidade do Laboratório de Usinagem.

Aos meus pais Ulisses e Luzinete pelo apoio.

Agradeço também, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização dessa dissertação.

*Se algo é importante o suficiente, mesmo as chances sendo desfavoráveis, você deveria fazer assim mesmo.*  
(ELON MUSK)

## RESUMO

A necessidade de se usinar materiais de alta dureza e garantir bom acabamento superficial é um desafio para as atuais indústrias metal/mecânica. Além disso, coloca-se também a necessidade de fazê-lo de forma técnica e economicamente viável. Diante desse desafio o torneamento duro surge como uma opção. Com o uso dos parâmetros (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) e ferramentas adequadas o torneamento duro possibilita uma adequada rugosidade superficial e pode substituir a necessidade de retificação, simplificando e reduzindo custos no processo de fabricação. Para que seja possível alcançar tais resultados, é necessária a pesquisa e validação de parâmetros que permitam a execução do torneamento de materiais de alta dureza. Por meio de ensaios, de desgaste interno, realizados com peças de metal duro H11N e com ferramentas de diamante, foram feitos testes preliminares com o uso da ferramenta de projeto de experimentos (DOE), para selecionar os melhores conjuntos de parâmetros (velocidade de corte e avanço). Foi realizado um segundo grupo de testes, finais, para garantir estatisticamente os melhores resultados, as informações obtidas foram rugosidade, desgaste e número de passes. Com a análise dos resultados preliminares obtidos utilizando a ferramenta estatística de projeto de experimentos (DOE), foi identificada alta quebra de ferramentas (54%). Com a realização de micrografias, a possibilidade do problema estar relacionado com a estrutura do material e ou com o tamanho do grão foi descartada. Foram detectadas ainda, marcas na superfície usinada dos corpos de prova que são indicadores da existência de vibrações durante o processo, o que justifica o número elevado de quebras das arestas de corte de forma prematura. Os testes finais não apresentaram quebra prematura de ferramentas, e sim uma vida maior que o esperado. Foi estabelecido parâmetros viáveis para o processo, velocidade de corte de 22,1 m/min e avanço de 0,09 mm/rev. Através da análise do desgaste foi possível estabelecer um critério para troca de ferramenta, que foi o desgaste de flanco ( $V_b$ ) de 0,2mm.

**Palavras-chave:** Torneamento duro; Metal Duro, Rugosidade superficial.

## ABSTRACT

The necessity of machining materials with high hardness to ensure a good surface finish is a challenge for metal mechanic industries these days. Furthermore, it has the necessity to achieve this goal in a technical way and be economically viable. An option to tackle this challenge is hard turning. Through the use of parameters (speed cutting, feed rate and cut depth) and adequate tools, the hard turning enables a good surface roughness and can replace the need for grinding, making the fabrication process simpler and reducing the cost. In order for these results to be achieved, research is required and validation of parameters, which allow the realization of turning materials with high hardness. Through trials of internal thinning, with pieces made of H11N material and diamonds tools, Design of experiments (DOE) preliminary tests were carried out to select the best parameters group (cutting speed and feed rate). Secondary tests were done to ensure statically the best results in this case, the data obtained was of roughness, wear and tool life. When analyzing the preliminary results obtained using the statistic tool, design of experiments (DOE), it was identified that a high breakage of tools was occurring (54%). Through micrograph tests, the possibility of the problem being with the material structure and grain size was discarded. Traces were detected in the machining surface on the machined piece, these are indicators of the chance of vibration during the process, which can justify the high premature tool breakage. The final tests didn't show premature tool breakage, they showed the life span of the tool was longer than what was expected. Viable parameters were established for this process, cutting speed of 22.1 m/min and feed rate of 0.09 mm/rev. Through the wear analysis it was possible to establish a criterion of tool change, it was flank wear ( $V_b$ ) of 0.02mm.

**Keywords:** Hard turning, Cemented Carbide, surface roughness.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Formulação do Problema	18
1.2. Objetivos	18
1.2.1. Objetivo geral	18
1.2.2. Objetivos específicos	18
1.3. Justificativa	19
1.4. Delimitação do assunto	19
1.5. Estrutura do trabalho	20
2. REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1. Torneamento duro	21
2.2. Ferramentas para torneamento duro	29
2.2.1. Aplicações de ferramentas de metal duro	30
2.2.2. Aplicações de ferramentas de diamante	33
2.2.3. Aplicações de ferramentas de cerâmica	33
2.2.4. Aplicações de ferramentas de CBN (Nitreto Cúbico de Boro)	35
2.3. Projeto de experimento	38
3. MATERIAIS E MÉTODO	42
3.1. Material	42
3.2. Ferramenta	45
3.3. Equipamentos	46
3.4. Métodos	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1. Peso dos insertos	52
4.1.1. Ensaio preliminares	52
4.1.2. Ensaio finais	53
4.2. Análise das arestas de corte	54
4.2.1. Ensaio preliminares	54
4.2.2. Ensaio finais	55
4.3. Análise dos desgastes e das rugosidades	56
4.3.1. Ensaio preliminares	56
4.3.2. Ensaio finais	62
5. CONCLUSÕES	66



5.1. Ensaio Preliminares	66
5.2. Conclusões Finais	66
5.3. Sugestões para trabalhos futuros	67
REFERÊNCIAS	68
ANEXO 1 – Aresta de corte	72
ANEXO 2 – Foto micrografia	84

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - (a) Variação da força de usinagem dependendo do avanço no torneamento duro de AISI S1 com inserto de cerâmica em diferentes velocidades de corte, (b) Variação da força de usinagem dependendo da taxa de avanço no torneamento duro de AISI S1 com inserto de CBN em diferentes velocidades de corte. 23
- Figura 2 - Interação do efeito na velocidade de corte e do avanço na vida da ferramenta de CBN-TiN com cobertura 24
- Figura 3 - (a) Variação do valor de rugosidade dependendo do avanço no torneamento duro de AISI S1 com inserto de cerâmica em diferentes velocidades de corte, (b) Variação do valor de rugosidade dependendo do avanço no torneamento duro de AISI S1 com inserto de CBN em diferentes velocidades de corte. 25
- Figura 4 - Rugosidade superficial contra tempo de corte em torneamento contínuo. 26
- Figura 5 - Rugosidade superficial contra tempo de corte em torneamento interrompido com 4 interrupções. 26
- Figura 6 - Rugosidade superficial contra tempo de corte em torneamento interrompido com 8 interrupções. 27
- Figura 7 - Interação do efeito na velocidade de corte e o avanço na rugosidade superficial da peça, utilizando CBN-TiN com cobertura. 27
- Figura 8 - Comparação entre ferramentas cerâmicas e CBN no torneamento duro 100Cr6. 28
- Figura 9 - Imagem do inserto revestido de ZrCN depois de (a) 14 min (b) 26min e (c) 31min. 31
- Figura 10 - Crescimento do desgaste de flanco com o tempo de usinagem. 31
- Figura 11 - Efeito da velocidade de corte e avanço na rugosidade superficial ( $a_p=0,3\text{mm}$ ,  $H=45\text{HRC}$ ). 36
- Figura 12 - Efeitos do parâmetro de corte como  $V_c$ ,  $f$  e  $a_p$  na rugosidade superficial na usinagem dura de aço carbono utilizando ferramenta de corte de CBN. 37
- Figura 13 - (a) Desgaste de flanco dos insertos de CBN com revestimento TiN (cada curva corresponde a uma aresta de corte de um inserto), (b) Imagem mostrando o desgaste típico de flanco e cratera em um inserto de CBN com revestimento TiN após a usinagem. 38

Figura 14 - Sistema ou processo, com respostas dependentes dos fatores.	39
Figura 15 - Dimensões do corpo de prova $d_1 = 66,5\text{mm}$ ; $d_2 = 47,9\text{mm}$ ; $L = 17,8\text{mm}$ .	43
Figura 16 - Corpo de prova de Metal Duro sinterizado H11N.	43
Figura 17 - Peças de metal duro H11N utilizadas para retirar os corpos de prova.	44
Figura 18 - Cavaco gerado pela usinagem do metal duro H11N.	44
Figura 19 - Corpo de prova embutido para realização das micrografias.	45
Figura 20 - Características geométrica do inserto CNMA-433.	46
Figura 21 – Foto do inserto mostrando o PCD incrustado no substrato de metal duro.	46
Figura 22 - Torno ROMI Galaxy 20 (LAB/DEMM/FEM/UNICAMP).	47
Figura 23 - Balança analítica Shimadzu AX200 (LAB/DEMM/FEM/UNICAMP).	47
Figura 24 - Rugosímetro Mitutoyo SJ-201 (LAB/DEMM/FEM/UNICAMP).	48
Figura 25 - Microscópio estereoscópico binocular ligado a um computador utilizando o software MOTIC Image 2.0.	48
Figura 26 - Microscópio Olympus BX51M (LAB/SANDVIK).	49
Figura 27 - Desgaste apresentado pela ferramenta 6 antes da usinagem.	55
Figura 28. Micrografias com aumento de 100x dos corpos de prova que quebraram. No corpo de prova 9 a ferramenta quebrou bem no final do passe e o corpo de prova 7 a ferramenta não quebrou.	58
Figura 29 - Visualização de tamanho de grão obtido por MEV.	60
Figura 30 - Corpo de prova 3 - estrutura do material obtida Microscópio Trinocular.	60
Figura 31 – Composição do material em análise por EDS.	61
Figura 32 - Rugosidade alcançada nos testes preliminares.	61
Figura 33 - Evolução da rugosidade em relação aos passes realizados durante os ensaios finais.	64
Figura 34 - Evolução do desgaste das ferramentas em relação ao numero de passes.	65
Figura 35 - ferramenta 1 antes e após usinar, apresentando desgaste de $0,3775\text{mm}$ .	72
Figura 36 - ferramenta 2 antes e após usinar, apresentando falha por quebra.	73
Figura 37 - ferramenta 3 antes e após usinar, apresentando falha por quebra	73
Figura 38 - ferramenta 4 antes e após usinar, apresentando falha por quebra	74

Figura 39 - ferramenta 5 antes e após usar, apresentando desgaste de 0,1888mm.	74
Figura 40 - ferramenta 6 antes e após usar, apresentando falha por quebra.	75
Figura 41 - ferramenta 7 antes e após usar, apresentando desgaste de 0,4000mm.	75
Figura 42 - ferramenta 8 antes e após usar, apresentando falha por quebra.	76
Figura 43 - ferramenta 9 antes e após usar, apresentando falha por quebra.	76
Figura 44 - ferramenta 10 antes e após usar, apresentando desgaste de 0,2451mm.	77
Figura 45 - ferramenta 11 antes e após usar, apresentando desgaste de 0,2930mm.	77
Figura 46 - ferramenta 1 antes e após usar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,0458mm.	78
Figura 47 - ferramenta 2 antes e após usar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,3282mm.	78
Figura 48 - ferramenta 3 antes e após usar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,2810mm.	79
Figura 49 - ferramenta 4 antes e após usar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,1747mm.	79
Figura 50 - ferramenta 5 antes e após usar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,2520mm.	80
Figura 51 - ferramenta 6 antes e após usar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,2171mm.	80
Figura 52 - ferramenta 7 antes e após usar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,3380mm.	81
Figura 53 - ferramenta 8 antes e após usar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,2532mm.	81
Figura 54 - ferramenta 9 antes e após usar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,3321mm.	82
Figura 55 - ferramenta 10 antes e após usar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,1699mm.	82
Figura 56 - ferramenta 11 antes e após usar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,0867mm.	83

Figura 57 - Foto micrografia obtida com microscópio trinocular do corpo de prova 2.	84
Figura 58 - Foto micrografia obtida com microscópio trinocular do corpo de prova 3.	85
Figura 59 - Foto micrografia obtida com microscópio trinocular do corpo de prova 4.	85
Figura 60 - Foto micrografia obtida com microscópio trinocular do corpo de prova 6.	86
Figura 61 - Foto micrografia obtida com microscópio trinocular do corpo de prova 7.	86
Figura 62 - Foto micrografia obtida com microscópio trinocular do corpo de prova 8.	87
Figura 63 - Foto micrografia obtida com microscópio trinocular do corpo de prova 9.	87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química, mecânica e propriedades físicas do metal duro.	29
Tabela 2 - Fator de controle e condições de corte.	37
Tabela 3 - Parâmetros testados e resposta obtida.	40
Tabela 4 - Parâmetros testados x resposta obtida.	41
Tabela 5 - Maiores e menores valores para os parâmetros de corte.	41
Tabela 6 - Propriedades físicas e mecânicas do H11N.	42
Tabela 7- Parâmetros utilizados nos ensaios preliminares.	50
Tabela 8 - Parâmetros utilizados nos ensaios finais.	51
Tabela 9 - Pesagem de insertos antes e após a usinagem para os ensaios preliminares.	53
Tabela 10 - Pesagem de insertos antes e após a usinagem para os ensaios finais.	54
Tabela 11 - Volume de cavaco removido em mm <sup>3</sup> por número de passes.	56
Tabela 12 - Resultado do teste preliminar referente aos desgastes ou quebras em um passe de 0,4 mm de profundidade de usinagem mantido constante.	57
Tabela 13 - Resultado do teste final referente a quantidade de passes até a quebra da ferramenta.	63

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- CBN** - *Cubic Boron Nitride* (nitreto cúbico de boro)
- CVD** - *Chemical Vapour deposition* (deposição química por vapor)
- CVDD** - *Chemical Vapour deposition coated diamond* (revestimento de diamante por deposição química por vapor)
- DOE** - *Design of Experiments* (projeto de experimentos)
- EDS** - *Energy dispersive X-ray detector* (detector de energia dispersiva por raio-x)
- PCBN** - *Polycrystalline Cubic Boron Nitride* (nitreto cúbico de boro policristalino)
- PCD** - *Polycrystalline diamond* (diamante policristalino)
- PVD** - *Physical vapor deposition* (deposição física de vapor)
- TiN** - *Nitreto de Titânio*
- ZrCN** - *Carbonitreto de zircônio*
- WC-Co** - *Carboneto de Tungstênio com Cobalto*

## LISTA DE SÍMBOLOS

**Vc** - *Velocidade de corte (m/min)*

**f** - *avanço (mm/rev)*

**ap** - *Profundidade de corte (mm)*

**HRc** - *Dureza em Rockwell C*

**fz** - *avanço (mm/rev)*

**Vb** - *Desgaste de flanco (mm)*



## 1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo produtivo muito utilizado na indústria, ela consiste na remoção de material em forma de cavaco para obtenção de forma, dimensão e acabamento de uma peça. É um processo que permite utilizar diversos tipos de materiais (ligas metálicas ferrosas, não ferrosas, e polímeros) e de métodos (fresamento, torneamento, furação, entre outros). Para se efetuar o processo de maneira eficaz é preciso conhecer para cada tipo de material as ferramentas e os parâmetros ideais para execução da usinagem, de modo a conseguir alta produtividade, boa qualidade do produto e baixo custo. Para obter estes parâmetros é necessário desenvolver pesquisa e desenvolvimento para assegurar as melhores condições do uso desses processos.

Entre os diversos processos de usinagem (fresamento, torneamento, furação, entre outros) o torneamento de materiais endurecidos (materiais acima de 45 HRC) se encontra cada vez mais presente na indústria devido ao desenvolvimento e aprimoramento de materiais para ferramentas, o que está tornando esse processo cada vez mais eficiente. A utilização do torneamento duro pode trazer a simplificação do processo produtivo como a eliminação da necessidade de retificação para o acabamento, baixando custos, aumentando a produtividade e assim, tornando o produto mais competitivo.

Ferramentas utilizadas para trabalhar com materiais de alta dureza necessitam de boas propriedades mecânicas. Alguns dos materiais utilizados atualmente são: metal duro, diamante, cerâmica e CBN (Nitreto Cúbico de Boro), revestimento como nitreto de titânio (TiN) pode ser utilizado.

Uma forma de analisar os efeitos do conjunto de variáveis de processos de usinagem é a utilização de ferramentas estatísticas, como a metodologia de projeto de experimentos, que tem como objetivo realizar experimentos controlados para obtenção dos melhores parâmetros para usinagem de acordo com a necessidade do processo.

## **1.1. Formulação do Problema**

A usinagem de materiais endurecidos, particularmente os aços, ainda enfrenta várias dificuldades para aplicações práticas em substituição ao processo de retificação.

Este desafio praticamente encontra-se em mãos de um número reduzido de empresas, as quais não relatam seus resultados na literatura especializada, por razões justas de competitividade.

Assim, a formulação do problema é realizar pesquisas que consigam mostrar a viabilidade técnica e se possível econômica de usinagem de peças destes materiais, em especial, a usinagem de peças de metal duro sinterizado.

## **1.2. Objetivos**

O problema abordado neste trabalho foi conseguir viabilizar a usinagem de peças de metal duro sinterizado, se possível, em substituição ao processo de retificação.

### **1.2.1. Objetivo geral**

O objetivo desse trabalho foi pesquisar a viabilidade técnica de torneamento de peças de metal duro sinterizado classe H11N, com possibilidade de substituir operações de retificação.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Determinar os parâmetros de corte viáveis para realização do torneamento;
- Avaliar a vida útil da ferramenta;

- Avaliar a qualidade da superfície usinada;
- Comparar, o resultado do torneamento de peças de metal duro sinterizado com o processo de retificação.

### **1.3. Justificativa**

Geralmente peças fabricadas a partir de materiais com alta dureza como é o caso do H11N, são retificadas. A operação de retificação envolve custo alto principalmente por causa da ferramenta (rebolo abrasivo) e custo hora máquina também elevado. Por outro lado, as operações com ferramentas de aresta de corte de geometria definida, como é o caso do torneamento, geralmente apresentam custos menores do que aqueles mencionados. Podem inclusive apresentar acabamento superficiais melhores que os de retificação. Apesar da usinagem de metal duro em geral representar um grande desafio, conforme verificado ausência de citações na literatura. Esse trabalho se justifica no momento em que ele representa o enfrentamento desse desafio.

Em praticamente todo levantamento bibliográfico realizado neste trabalho, foram desenvolvidas pesquisas variando as combinações entre velocidade de corte, profundidade de usinagem e avanço em diferentes materiais e com diferentes ferramentas. Entretanto, o objetivo final destas pesquisas sempre foi o de procurar obter os melhores parâmetros de maneira que seja viável a utilização desse processo.

### **1.4. Delimitação do assunto**

Este trabalho delimitou-se a experimentação em laboratório de um torneamento duro no metal sinterizado H11N com a utilização de ferramentas de corte de diamante, nesse processo foi realizado um desbaste interno, no qual foram realizados dois conjuntos de testes, denominados de teste preliminar e final. Houve uma aplicação nos testes preliminares da metodologia de projeto de experimentos

(DOE). Posteriormente os valores apontados pelo DOE como viáveis foram então pesquisados com maior profundidade nos testes finais.

### **1.5. Estrutura do trabalho**

Esse trabalho é composto de 5 capítulos, o capítulo 1 é uma introdução ao tema, expondo a importância e objetivos visados nesse trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre o processo de torneamento duro, ferramentas que podem ser utilizadas nesse processo e a metodologia de projeto de experimentos.

O capítulo 3 trata dos métodos seguidos, materiais utilizados e características de ferramentas e máquinas.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e suas discussões, analisando os resultados obtidos.

O capítulo 5 apresenta as considerações finais, conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências adotadas neste trabalho.

## **2. REVISÃO DA LITERATURA**

Nesse capítulo é apresentado o resultado de pesquisas bibliográficas realizadas para caracterizar o torneamento duro, os parâmetros utilizados, as vantagens, as desvantagens e os resultados obtidos pela experimentação de outros pesquisadores, visando confirmar sua importância além de preencher lacunas existentes depois do desenvolvimento de pesquisas no assunto.

As possíveis ferramentas que podem ser utilizadas no processo serão apresentadas, demonstrando suas principais características de acordo com a variação de material a ser usado e parâmetros de usinagem.

Por fim, uma explanação da ferramenta probabilística do projeto de experimentos e de estatística que foi empregada para obtenção dos resultados contidos nesse trabalho, para demonstrar que os resultados, apesar de serem fundamentalmente técnicos, receberam um tratamento com base científica.

### **2.1. Torneamento duro**

O torneamento duro é utilizado para desbaste e acabamento dos materiais, podendo substituir o processo de retificação e trazer vantagens como simplificação do processo, redução de custos, aumento de produtividade e flexibilidade (LANDI, 2002).

Na usinagem de aços endurecidos as dificuldades mais comuns são o rápido desgaste da ferramenta, a precisão dimensional da peça, lascamento ou quebra da ferramenta e a rugosidade superficial (KULJANIC, SORTINO, TOTIS, 2010).

Através de um estudo de diversos trabalhos sobre torneamento duro foi concluído que a força dominante no torneamento duro é a radial, diferente de processos de usinagem convencionais. Nestes, a maioria dos torneamentos são feitos sem fluido refrigerante, sendo que a utilização efetiva do mesmo pode auxiliar na diminuição da degradação da ferramenta (BARTARYA, CHOUDHUTY, 2011).

A seleção dos parâmetros de corte deve levar em consideração um balanço da vida da ferramenta em relação a produtividade. Em termos gerais, condições de corte que aumentam a produtividade conduzem a diminuição da vida da ferramenta (GALOPPI, FILHO, BATALHA, 2006).

Na usinagem do aço AISI S1 (60HRc), com ferramentas de cerâmica e CBN, foi observado que a força de usinagem depende do avanço e da profundidade de usinagem. Na Figura 1 é demonstrado que a força de usinagem aumenta com o avanço e tem a tendência de ser menor com maiores velocidades de corte. O aumento do avanço e da profundidade de usinagem justifica o aumento das forças de usinagem, porque aumentam o volume do cavaco removido, assim como a velocidade de corte diminui essas forças devido à facilitação de formação de cavaco. O inserto de CBN teve melhores resultados que o inserto de cerâmica (KAÇAL, YILDIRIM, 2013).

A vida da ferramenta para torneamento duro baseia-se no critério de desgaste selecionado. O fim da vida da ferramenta normalmente é determinado quando a ferramenta para de produzir peças com dimensões e qualidades superficiais desejadas (standart ISO 3685). Como os materiais de corte para torneamento duro são normalmente caros, a vida da ferramenta é algo importante para possibilitar a substituição da retificação (MORE, et al, 2006).

Foi realizado experimentos a fim de definir a influência do corte interrompido e a influência do corte contínuo na vida da ferramenta na operação de torneamento. Eles chegaram ao resultado que o corte interrompido permite uma vida de ferramenta mais longa que o corte contínuo. Isso foi atribuído a alta temperatura presente no corte contínuo, que estimula mecanismos de desgaste como a difusão e abrasão. O corte interrompido apresentou menores temperaturas por três razões: as interrupções evitam o propagação de calor na peça usinada, a rotação da peça gera um fluxo de ar nos sulcos da superfície interrompida, devido a pequena parte que é cortada devido as interrupções (DE OLIVEIRA, DINIZ, URSOLINO, 2009).

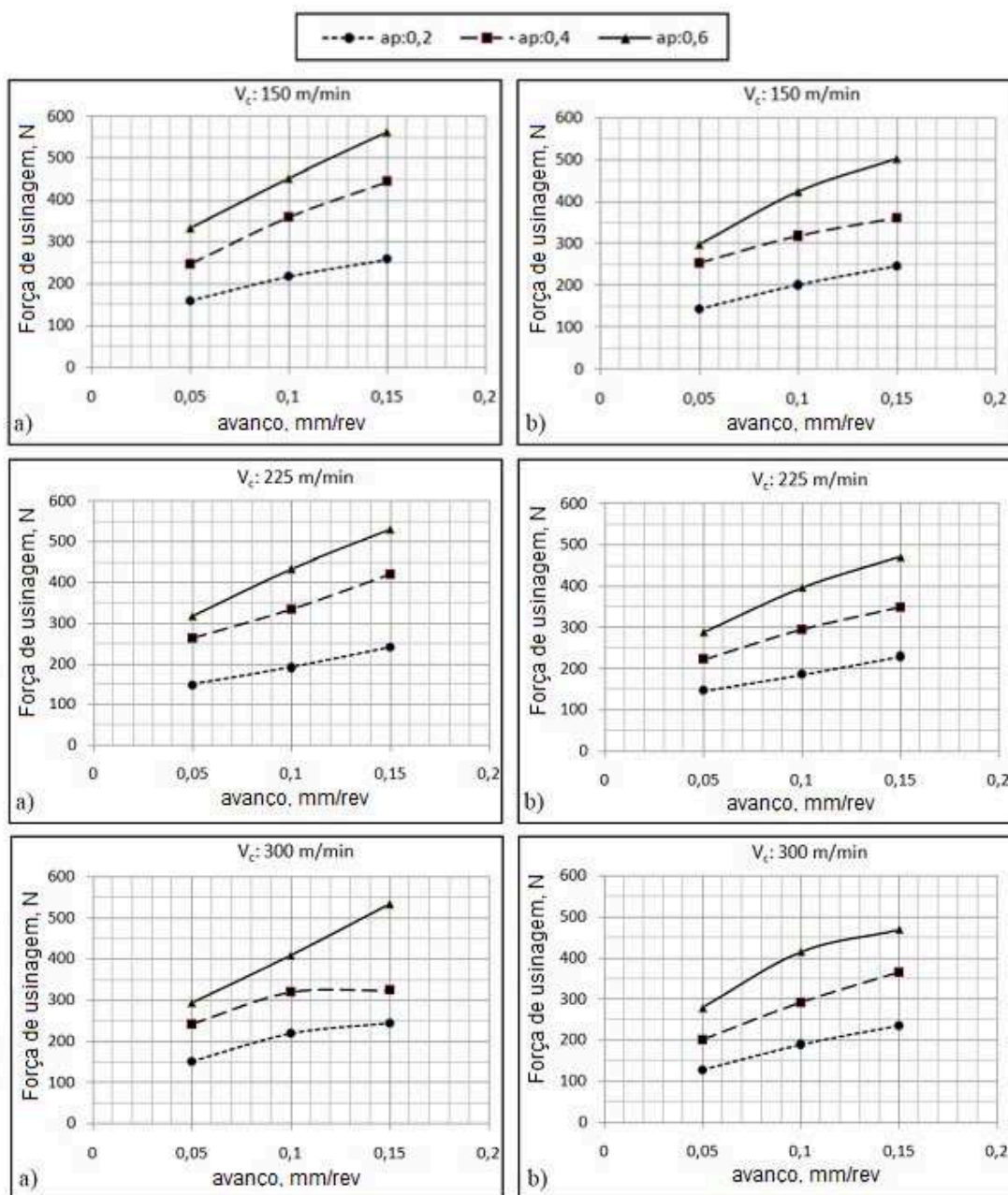


Figura 1 - (a) Variação da força de usinagem dependendo do avanço no torneamento duro de AISI S1 com inserto de cerâmica em diferentes velocidades de corte, (b) Variação da força de usinagem dependendo da taxa de avanço no torneamento duro de AISI S1 com inserto de CBN em diferentes velocidades de corte (KAÇAL e YILDIRIM, 2013).

A vida da ferramenta é diretamente afetada e em maior intensidade, primeiramente, pela velocidade de corte e em seguida, pelo avanço (MORE, et al 2006). O aumento da velocidade de corte diminui a vida da ferramenta. Em seus estudos ele mostra que a velocidade de corte é o fator que mais influencia na vida

da ferramenta durante o torneamento duro de rolamentos de aço 100 Cr6. Pode-se observar, Figura 2, uma diminuição brusca da vida de ferramenta com valores altos de velocidades de corte e ou do avanço (BENGA, ABRAO, 2003).

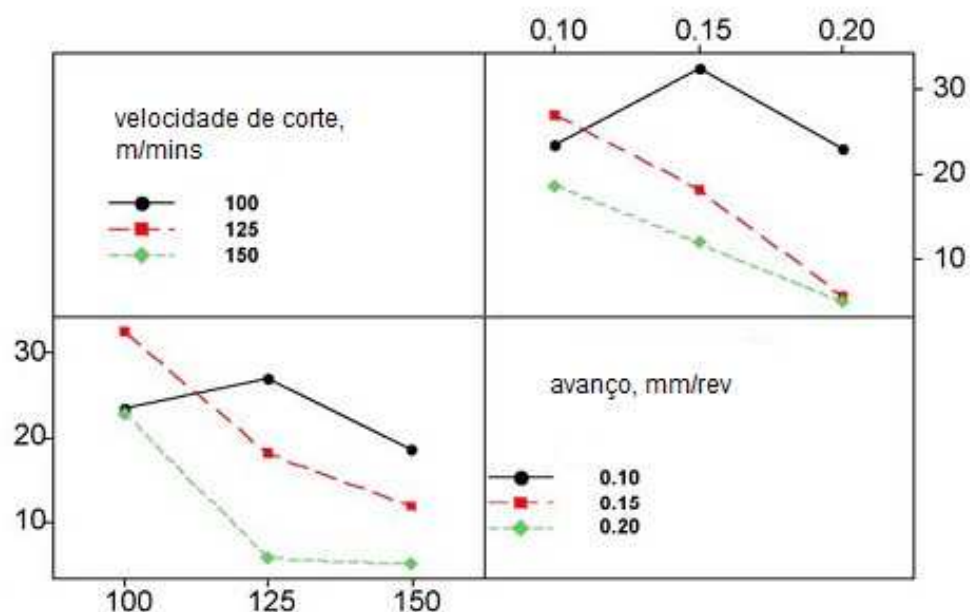
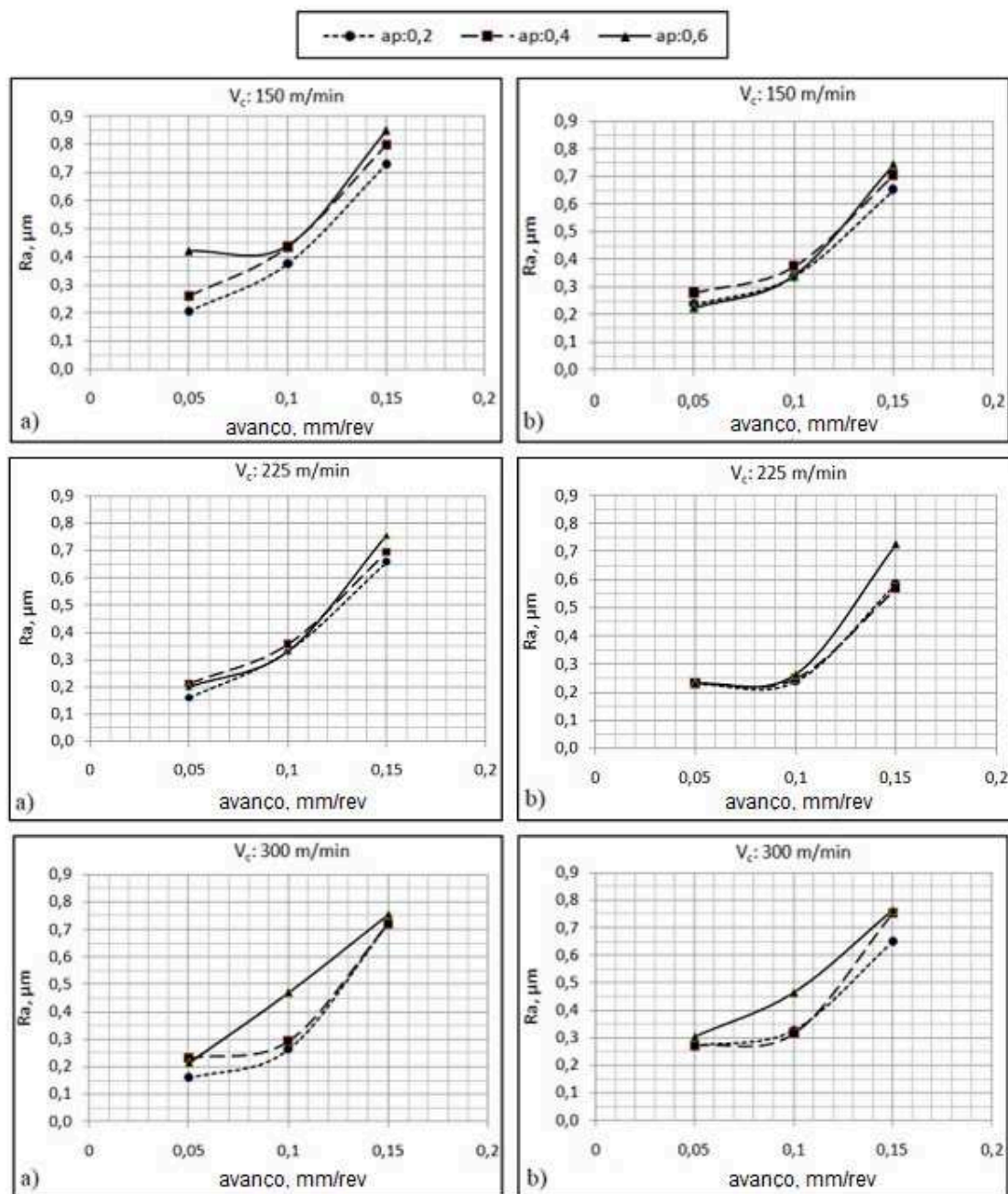


Figura 2 - Interação do efeito na velocidade de corte e do avanço na vida da ferramenta de CBN-TiN com cobertura (MORE, et al 2006).

Um indicador, dentre outros, que pode ser usado na verificação da integridade da superfície usinada é a rugosidade superficial e também serve como controle de falha de ferramenta (MORE, et al 2006). A rugosidade superficial é um indicador da rigidez dos componentes da máquina (DE OLIVEIRA, DINIZ, URSOLINO, 2009). Uma rugosidade ruim pode ser conseqüência da presença de vibração durante o processo ou também de alterações ocorridas na aresta de corte devido à desgastes ou avarias.

O torneamento do aço AISI S1 com inserto cerâmico demonstra valores de rugosidade que aumentam em conjunto com o aumento do avanço, isso para três velocidades de corte utilizadas. O inserto de CBN mostrou as mesmas características, sendo que para ambos a melhor rugosidade é obtida com baixos avanços e altas velocidades de corte, conforme Figura 3 (KAÇAL E YILDIRIM, 2013).





Legenda -  $V_c$ : velocidade de corte  
 ap: profundidade de corte  
 $R_a$ : rugosidade

Figura 3 - (a) Variação do valor de rugosidade dependendo do avanço no torneamento duro de AISI S1 com inserto de cerâmica em diferentes velocidades de corte, (b) Variação do valor de rugosidade dependendo do avanço no torneamento duro de AISI S1 com inserto de CBN em diferentes velocidades de corte (KAÇAL E YILDIRIM, 2013).

O corte contínuo e o corte interrompido também afetam a rugosidade superficial. Uma comparação entre esses dois tipos de corte utilizando ferramentas de cerâmica e de nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN) no torneamento do aço

AISI 4340 está mostrada nas Figuras 4, 5 e 6 (DE OLIVEIRA, DINIZ, URSOLINO, 2009).

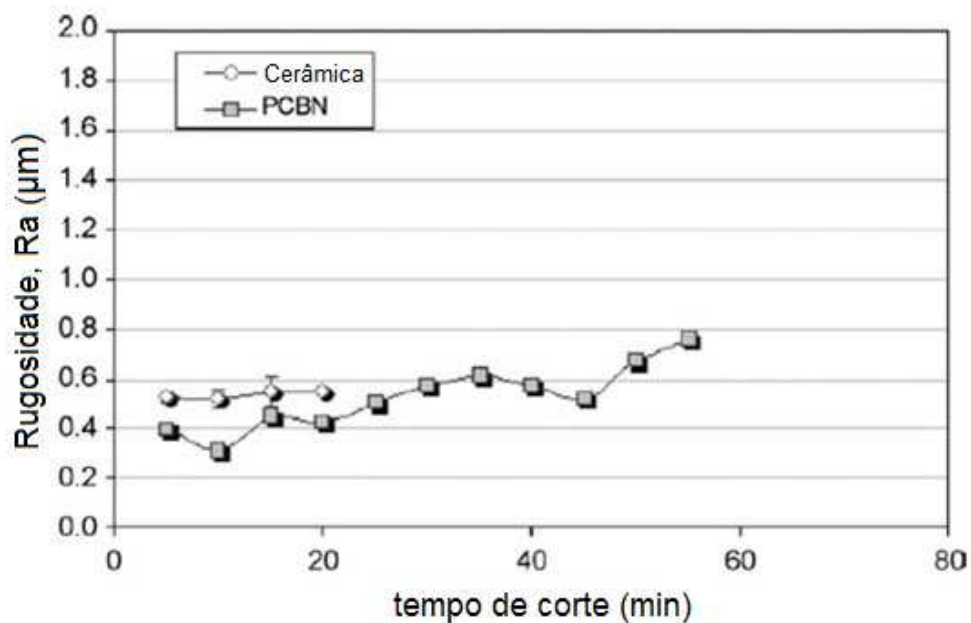


Figura 4 - Rugosidade superficial contra tempo de corte em torneamento contínuo (OLIVEIRA, DINIZ e URSOLINO, 2009).

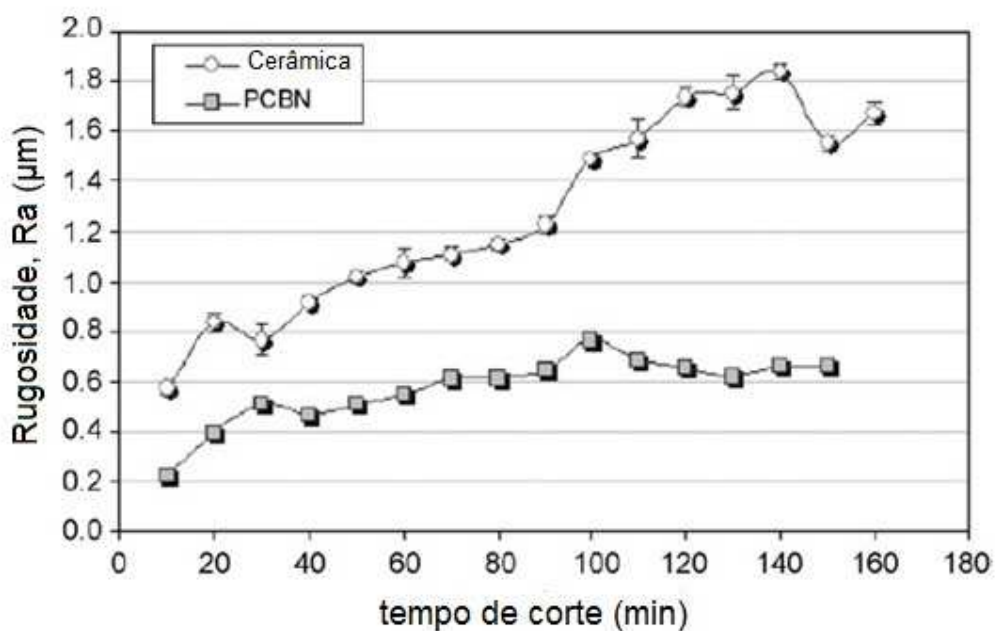


Figura 5 - Rugosidade superficial contra tempo de corte em torneamento interrompido com 4 interrupções (OLIVEIRA, DINIZ e URSOLINO, 2009).

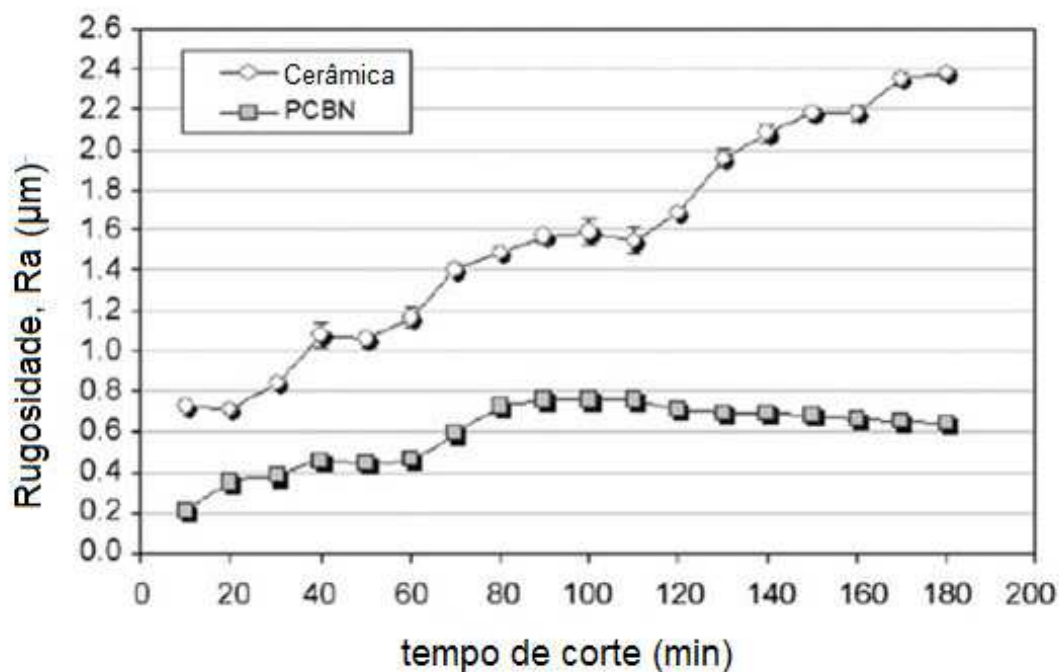


Figura 6 - Rugosidade superficial contra tempo de corte em torneamento interrompido com 8 interrupções (OLIVEIRA, DINIZ e URSOLINO, 2009).

Na Figura 7 verifica-se que a melhor rugosidade superficial é obtida com uma alta velocidade de corte e uma baixo avanço.

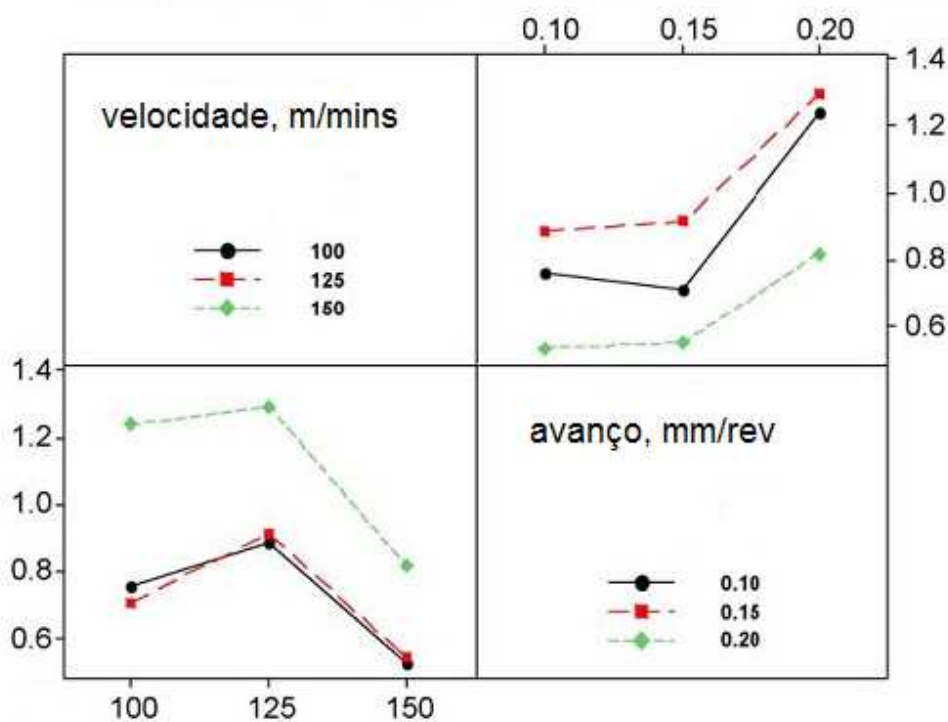


Figura 7 - Interação do efeito na velocidade de corte e o avanço na rugosidade superficial da peça, utilizando CBN-TiN com cobertura (MORE, et al 2006).

Na aplicação de ferramentas de CBN, com e sem cobertura e de cerâmica, foi observando a vida desses insertos e foi concluído que os insertos de CBN com cobertura levam um pouco de vantagem em relação aos demais, conforme pode ser observado na Figura 8 (KULJANIC, SORTINO, TOTIS, 2010).

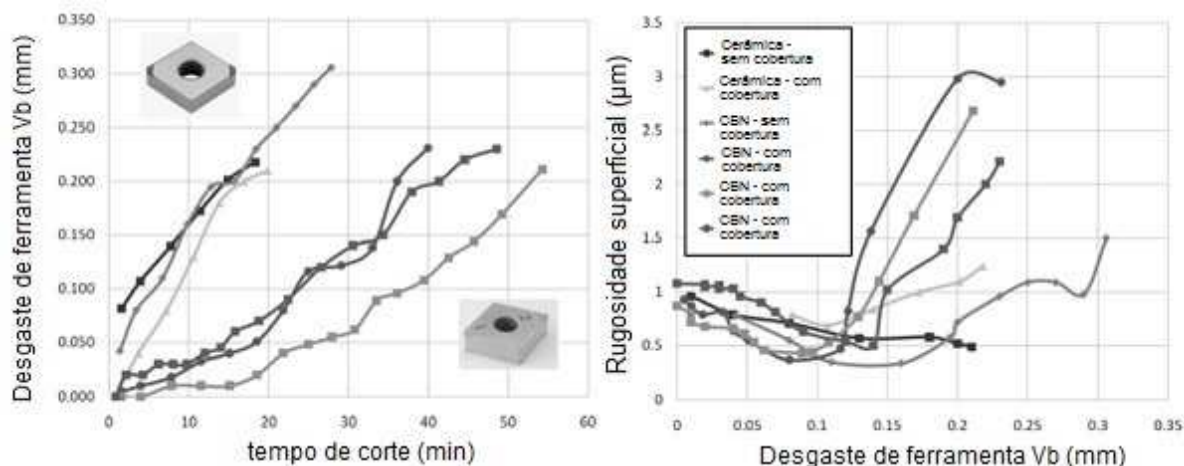


Figura 8 - Comparação entre ferramentas cerâmicas e CBN no torneamento duro 100Cr6 (KULJANIC, SORTINO e TOTIS, 2010).

Foi realizado um torneamento duro utilizando ferramenta de corte revestida de diamante por deposição química a vapor (CVDD) em um metal duro com 12% de Co, Tabela 1 (COPPINI et al, 2013).

Foi observado que houve a obtenção do menor valor de rugosidade quando utilizaram o menor avanço e profundidade de usinagem, combinados com a maior velocidade de corte. A rugosidade é muito sensível a variação do avanço, mas não é sensível a variação da velocidade e profundidade de corte. O avanço é o que mais influência na rugosidade superficial utilizando ferramentas de CBN e cerâmica (BENGA e ABRAO, 2003).

Tabela 1 - Composição química, mecânica e propriedades físicas do metal duro (COPPINI et al, 2013).

Compoisição química		
Cobalto	Co	12,00%
Carboneto de Tântalo	TaC	0,20%
Carboneto de Tungstênio	Wc	87,80%
Propriedades físicas		
Dureza	ASTM B-294	89.6 HRA
Densidade	ASTM B-311	14.3 g/cc
Força de ruptura transversal	ASTM B-406	595,000 psi
Resistencia a fratura	ASTM B771-87	13.2 Mpa m0.5
Desgaste	ASTM G-75	7.0 mm <sup>3</sup>
Força a compressão		640,000 psi
Tamanho do grão		2 μm

Ao se realizar torneamento duro no material AISI M4 temperado (64Hrc) utilizando ferramenta de CBN recoberta com TiN, chegou se a conclusão que o avanço influência significativamente a rugosidade da peça usinada (BONANDI, 2012), em um experimento utilizando uma ferramenta CVDD (COPPINI et al, 2013). Além disso, o mesmo resultado foi alcançado com ferramentas de CBN com cobertura de TiN (MORE et al, 2006).

A circularidade, sofre grande influência da profundidade de corte, e não é influenciada pelo aumento do avanço (COPPINI et al, 2013).

A circularidade tem melhores resultados com a aplicação de velocidades de corte maiores e que o desgaste da ferramenta não provoca grandes variações (BONANDI, 2012).

## 2.2. Ferramentas para torneamento duro

Para selecionar a ferramenta a ser utilizada em processo de usinagem deve-se analisar os seguintes fatores: Material a ser usinado, processo de usinagem, condição de máquina operatriz, forma e dimensão de ferramenta, custo do material da ferramenta, condições de usinagem e condições de operação e de acordo com esses fatores deve ser observado no material da ferramenta os seguintes requisitos: dureza a quente, resistência ao desgaste, tenacidade e estabilidade química (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2014).

Ferramentas de metal duro, CBN (Nitreto cúbico de boro), diamante e cerâmica podem ser utilizadas para o processo de torneamento duro. As ferramentas de metal duro devem ser utilizadas em materiais de até 40 HRc devido a alta temperatura gerada no processo, o autor fala que os materiais mais recomendados são cerâmica e CBN e que as ferramentas de diamantes são usadas somente para materiais não ferrosos, (LANDI, 2002).

Na usinagem de peças endurecidas, as variáveis mais importantes para a troca de ferramenta são a rugosidade superficial e as tolerâncias dimensionais dos componentes usinados (LANDI, 2002).

### **2.2.1. Aplicações de ferramentas de metal duro**

O metal duro apresenta dureza suficiente para ser aplicado no processo de torneamento duro, porém devido à alta temperatura gerada no processo ele não consegue mantê-la. Devido a essa limitação a ferramenta de metal duro deve ser utilizada em materiais de até 40 HRc (LANDI, 2002). Outra fonte cita que qualquer material com dureza de até 45 HRc pode ser usinado com ferramentas de metal duro e complementam que esse material com microgrãos estão sendo utilizados para usinagem de metais com maior dureza, devido a suas propriedades superiores. Devido a dureza máxima recomendada (45 HRc), essas ferramentas não são indicadas para a usinagem de metal duro que possuem dureza superior ao recomendado (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2014).

Pode ser observado desgaste de flanco em insertos de metal duro com revestimento no torneamento duro a seco do aço AISI 4340 (Figuras 9 e 10). A vida da ferramenta foi de 31min com o revestimento de ZrCN, utilizando  $v_c=90\text{m/min}$ ,  $f=0,05\text{mm/rev}$  e  $a_p=0,5\text{mm}$ . Foi concluído que abrasão foi o mecanismo de desgaste predominante nesse experimento e que o desgaste de flanco estava dentro do previsto (SAHOO A., SAHOO B.,2013).

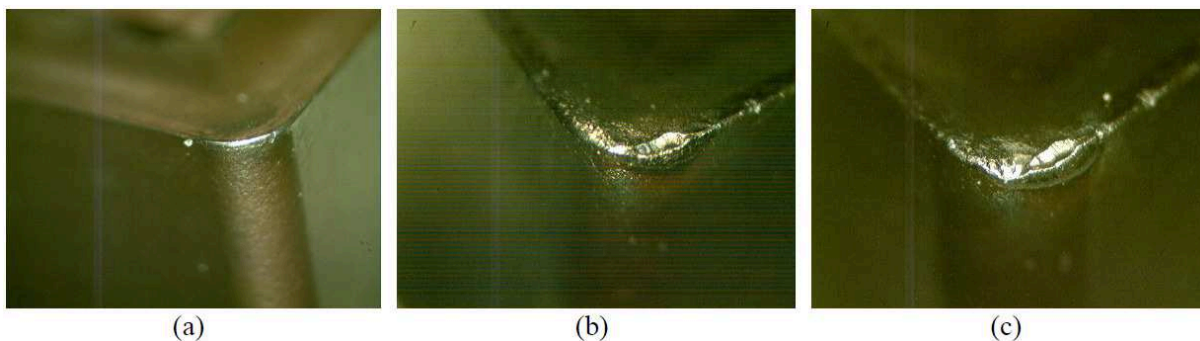


Figura 9 - Imagem do inserto revestido de ZrCN depois de (a) 14 min (b) 26min e (c) 31min (SAHOO e SAHOO, 2013).

Foi realizado um experimento com insertos de metal duro com e sem revestimento no torneamento duro do aço AISI 4340. O inserto de metal duro com revestimento de TiN foi o que teve a maior vida chegando a 19 min, seguido pelo inserto de metal duro com revestimento de ZrCN e por ultimo, o inserto sem revestimento falhou por lascamento. O maior desgaste do inserto com revestimento ZrCN em relação ao inserto com TiN ocorre devido a maior temperatura de corte que o ZrCN atinge, acelerando o desgaste da ferramenta. Os parâmetros utilizados foram de  $V_c=150\text{m/min}$ ,  $f=0,15\text{m/min}$  e  $a_p=0,4\text{mm}$ , ambas pastilhas com revestimentos apresentaram rugosidade de  $1,6\mu\text{m}$  (SAHOO A., SAHOO B.,2012).

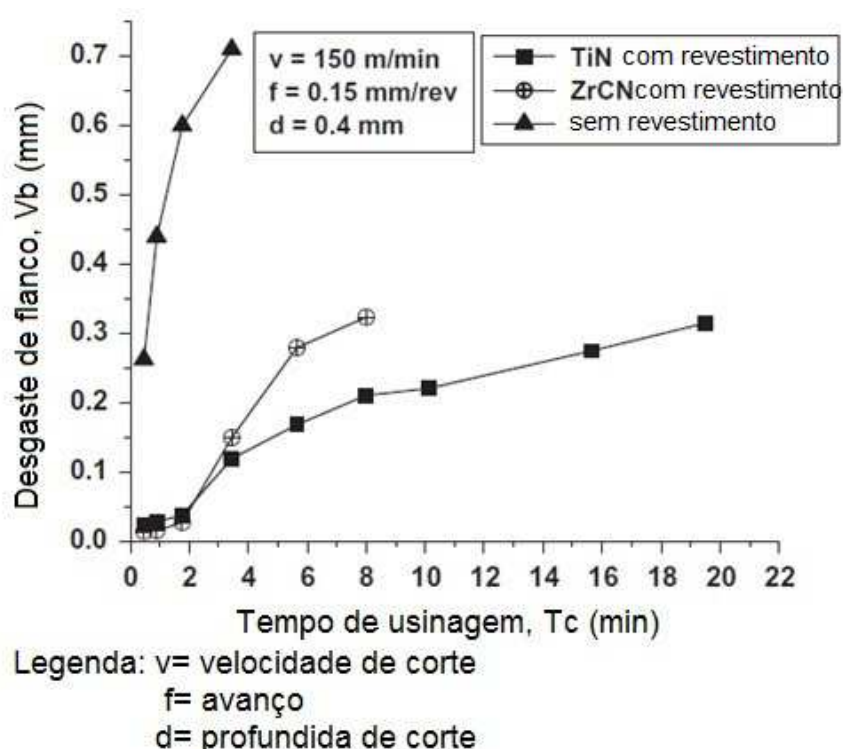


Figura 10 - Crescimento do desgaste de flanco com o tempo de usinagem (SAHOO e SAHOO, 2013).

Na usinagem do material endurecido AISI 4340 utilizando ferramentas de metal duro com revestimento, foi observado, em relação as forças de corte, que a variação em relação ao avanço e profundidade de corte é quase linear. Diminui, inicialmente com o aumento da velocidade de corte. Entretanto, em altas velocidades de corte é quase inalterada (CHINCHANIKAR, CHOUDHURY, 2013). Um experimento similar com o material AISI 4340, utilizando insertos de metal duro com revestimento foi observado que a força de usinagem é sensível com o avanço independente da velocidade de corte, sendo que para minimizar a força de usinagem foi preciso de uma combinação de avanço baixo, baixa profundidade de usinagem e alta velocidade de corte (SURESH et al ,2012).

Para ferramentas PVD foi obtido um melhor acabamento superficial que com ferramentas CVD. Os desgastes predominantes na ferramenta PVD foram de flanco e da camada de revestimento e os mecanismos dominantes foram abrasão, adesão e difusão. Por sua vez, para a ferramenta CVD obtiveram desgaste de cratera devido à presença de abrasão e adesão. Essas ferramentas foram capazes de usinar materiais de até 55 HRc em corte sem utilização de fluídos de corte (CHINCHANIKAR E CHOUDHURY, 2013).

Foram realizados experimentos com ferramentas de metal duro CVD e PVD na usinagem de Hastelloy C-22HS, chegando a conclusão que o avanço causa o maior declínio da vida da ferramenta seguido pela velocidade de corte e profundidade de corte. A ferramenta de PVD obteve maior vida. Adesão e atrito foram os mecanismos de desgaste essencialmente presentes (KADIRGAMA, et al, 2010) .

Na usinagem do material AISI 4340 endurecido com inserto de metal duro com revestimento, o melhor acabamento superficial ocorreu com altas velocidades de corte e baixo avanço, sendo que com baixas velocidades de corte, tanto o avanço quanto a profundidade de usinagem exercem bastante influência na rugosidade superficial (SURESH et al, 2012).



### **2.2.2. Aplicações de ferramentas de diamante**

Em um experimento utilizando ferramentas de CBN, PCD e CVDD na usinagem WC-Co sinterizado, a ferramenta de PCD obteve os piores resultados, mostrando degradação da aresta de corte e altas rugosidades na peça usinada. A ferramenta de CVDD obteve os melhores resultados, com uma degradação mínima da ferramenta e uma rugosidade da peça usinada similar a ferramenta de CBN. Eles concluíram que a ferramenta de PCD obteve o pior desempenho em relação ao desgaste e à qualidade superficial entre todas as ferramentas pesquisadas (BELMONTE et al, 2002).

Com avanços baixos foi possível tornear materiais endurecidos e obter uma baixa rugosidade, utilizando ferramentas CVDD (COPPINI et al, 2013).

A ferramenta de PCD teve melhor desempenho que a ferramenta de PCBN porque possui uma alta resistência à abrasão e alta resistência à fratura além de apresentar baixa possibilidade de adesão de material (DING, LIEW, LIU, 2005).

### **2.2.3. Aplicações de ferramentas de cerâmica**

Algumas características das ferramentas cerâmicas, são elevada resistência ao desgaste e dureza em altas temperaturas, o que permite a usinagem com altas velocidades de corte (LANDI, 2002). Possuem também, excelente estabilidade química. A ferramenta composta por cerâmica mista é recomendada para o torneamento de acabamento de materiais endurecidos (DINIZ et al, 2014).

As ferramentas cerâmicas reforçadas com whiskers (monocristais alongados), possuem uma boa tenacidade comparada com outras ferramentas cerâmicas, pode ser utilizada em torneamento de superfícies interrompidas de aço endurecido (DINIZ et al, 2014).

Ao realizar testes de corte contínuo e interrompido no aço AISI 4340 observaram que a difusão e abrasão são os mecanismos de desgaste que mais contribuem para o fim da vida da ferramenta em corte contínuo (DE OLIVEIRA,

DINIZ, URSOLINO, 2009). Chegaram a conclusão que a abrasão é o principal mecanismo de desgaste em corte contínuo (DE GODOY, DINIZ, 2011).

No corte interrompido, com 4 e 8 interrupções, a aresta secundária de corte sofreu desgaste por abrasão enquanto a aresta principal de corte desgastou com devido à variação térmica e difusão. Por seu lado, colocaram a abrasão como o principal mecanismo de desgaste e citam a presença do lascamento quando ocorre impacto entre peça e ferramenta (DE GODOY, DINIZ, 2011).

Valores de rugosidade superficial obtidos em experimentos em torneamento do aço AISI 4340 com ferramenta cerâmica foram altos não sendo possível ser utilizado no lugar da retificação (DE GODOY, DINIZ, 2011).

Realizaram torneamento duro no aço MDN250 com ferramenta cerâmica com revestimento e concluíram que a velocidade de corte não tem efeito significativo na rugosidade superficial e nas forças de corte. Já a profundidade de corte foi o fator mais significativo seguido pelo avanço. Foi possível obter bom acabamento superficial utilizando velocidade de corte de 93m/min, profundidade de corte de 0,2mm e avanço de 0,04mm/rev (LALWANI, MEHTA, JAIN, 2008).

Foi obtido bons resultados com torneamento duro com inserto cerâmico. Foi atestado que é possível obter acabamento similar a retificação, que o desgaste de flanco na ferramenta aumenta com a velocidade de corte e os mecanismos de desgastes mais presentes foram a abrasão e a difusão (KAÇAL, YILRIDRIM, 2013). Ao realizar torneamento duro em um aço equivalente ao AISI 5140, utilizando ferramenta de cerâmica com alumina conseguiu boa qualidade superficial utilizando avanço de 0,1 mm/ver, recomendando que a velocidade de corte poderia ser utilizada entre 100 e 150m/min (GRZESIK, WANAT, 2005).

Com a utilização do inserto cerâmico PVD TiN, na usinagem do aço endurecido EN 24 para investigar o desgaste de flanco, o mesmo desgastou dentro do limite esperado de 0,3mm e observaram que os mecanismos de desgaste predominantes foram abrasão e difusão (SAHOO, ORRA. ROUtra, 2013)

#### 2.2.4. Aplicações de ferramentas de CBN (Nitreto Cúbico de Boro)

As ferramentas CBN tem elevada resistência a quebra e menor resistência ao desgaste em relação a ferramentas cerâmicas e possuem baixa estabilidade química (LANDI, 2002).

Em geral as ferramentas de CBN são utilizadas na usinagem de aços endurecidos (45 a 65 HRc), quando o metal duro não possui dureza suficiente e o diamante não pode ser usado em aplicações cujas peças sejam de materiais ferrosos, por exemplo. Essa ferramenta pode ser utilizada no torneamento em substituição à retificação (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2014).

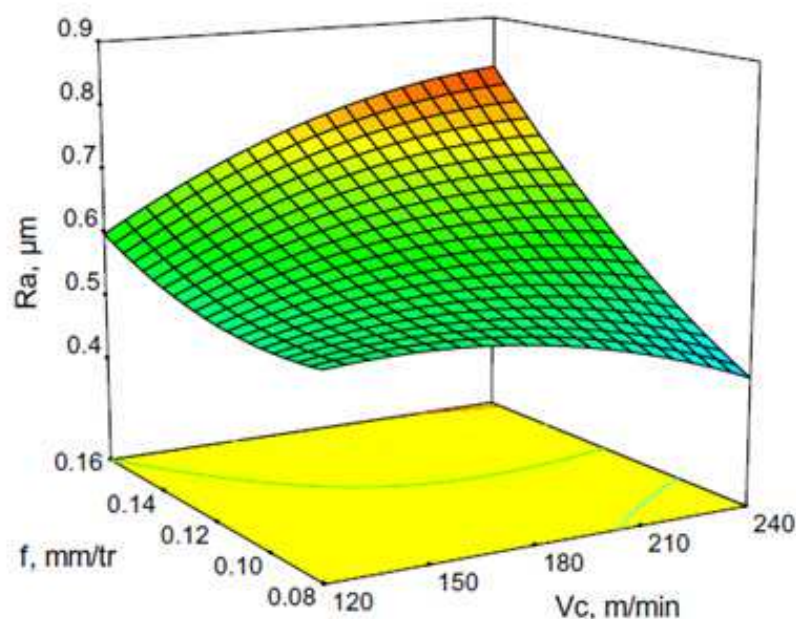
A vida da ferramenta de CBN com revestimento tem vida mais longa que a ferramenta de CBN sem revestimento, e também, que ferramentas cerâmicas, usinando 100Cr6. A ferramenta de CBN sem cobertura possui rugosidade superficial melhor (KULJANIC, SORTINO, TOTIS, 2010).

Em testes realizados na usinagem do aço AISI 4340, o principal mecanismo de desgaste de ferramentas de PCBN é a abrasão (DE OLIVEIRA, DINIZ, URSOLINO, 2009). Foi obtido resultados similares para o mesmo aço com torneamento com corte contínuo, a abrasão foi o principal mecanismo de desgaste a baixas velocidades de corte, enquanto a difusão foi predominante em altas velocidades de corte. Em corte contínuo os mecanismos de desgaste da ferramenta de CBN foram difusão e atrito e não houve lascamentos na ferramenta (DE GODOY e DINIZ, (2011).

Em testes de torneamento duro do aço AISI S1, conseguiram um bom resultado no torneamento duro de acabamento com altas velocidades, conseguindo rugosidade superficial de  $0,2\mu\text{m}$ . Foi atestado que o desgaste de flanco aumenta com a velocidade de corte e os maiores mecanismos de desgastes foram abrasão e difusão (KAÇAL, YILDIRIM, 2013). Em seus experimentos que o desgaste da ferramenta de CBN no torneamento de materiais de alta dureza não afeta diretamente a superfície usinada (REMADNA, RIGAL, 2006).

A ferramenta de CBN possui alta resistência à temperatura. Por isso, em caso de torneamento duro é preferível que não seja usado fluido de corte porque o aquecimento na região da usinagem não reduz a vida da ferramenta, mas a peça aquecida é mais facilmente usinada (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2014).

É possível o torneamento com ferramenta de CBN revestida com TiN de forma a obter uma rugosidade abaixo de  $0,20 \mu\text{m}$  com altas velocidades de corte (BONANDI, 2013). Com a realização de um torneamento duro no aço AISI H11 com ferramenta de CBN foi obtido a melhor rugosidade superficial com a combinação de altas velocidade de corte e baixo avanço (Figura 11), (AOUICI et al, 2011). Os mesmos resultados no torneamento do aço AISI 52100 (BOUACHA et al, 2009).



legenda:  $R_a$ = Rugosidade  
 $f$ = avanço  
 $V_c$ = velocidade de corte

Figura 11 - Efeito da velocidade de corte e avanço na rugosidade superficial ( $a_p=0,3\text{mm}$ ,  $H=45\text{HRC}$ ), (AOUICI et al, 2011).

Os resultados que mostram claramente que o fator que mais influência na rugosidade superficial ao utilizar ferramentas de CBN é o avanço (Figura 12). Realizaram o torneamento do aço endurecido AISI 1050 utilizando as variações na Tabela 2 (SAHIN, MOTORCU, 2007).

Tabela 2 - Fator de controle e condições de corte (SAHIN e MOTORCU, 2007).

Fatores de controle com seus níveis e condições de corte						
Fator de controle principal	Unidades	-2	-1	0	+1	+2
velocidade de corte, Vc	m/min	103	138	173	208	243
avanço, f	mm/rev	0.10	0.134	0.169	0.203	0.238
profundidade de corte, d	Mm	0.41	0.54	0.67	0.80	0.93

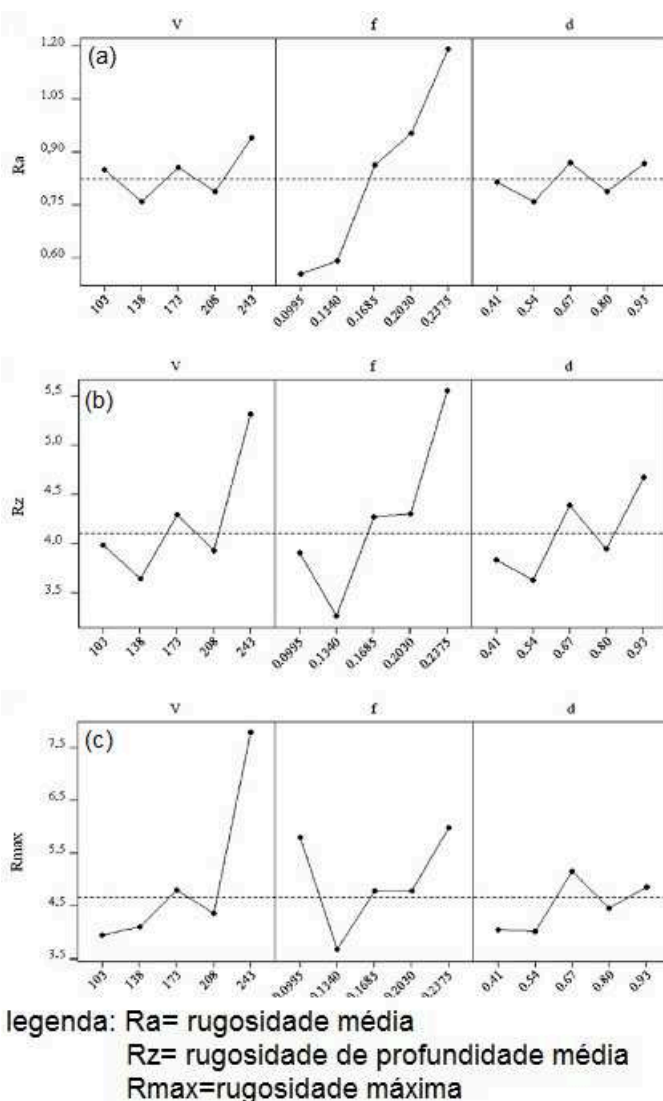


Figura 12 - Efeitos do parâmetro de corte como Vc, f e ap na rugosidade superficial na usinagem dura de aço carbono utilizando ferramenta de corte de CBN (SAHIN e MOTORCU, 2007).

No experimento em que o aço AISI 4340 sofreu torneamento duro com os parâmetros de corte de  $v_c=150\text{m/min}$ ,  $f=0,15\text{ mm/rev}$  e  $a_p=0,25\text{mm}$ , utilizando ferramenta de CBN com revestimento TiN e quebra cavaco foi obtido uma vida de ferramenta de 20 minutos por aresta de corte e uma rugosidade entre  $0,5$  e  $0,7\mu\text{m}$

(Figura 13). Foi obtido uma boa uniformidade e repetibilidade (JIANG, MALSHE, GOFORTH, 2005).

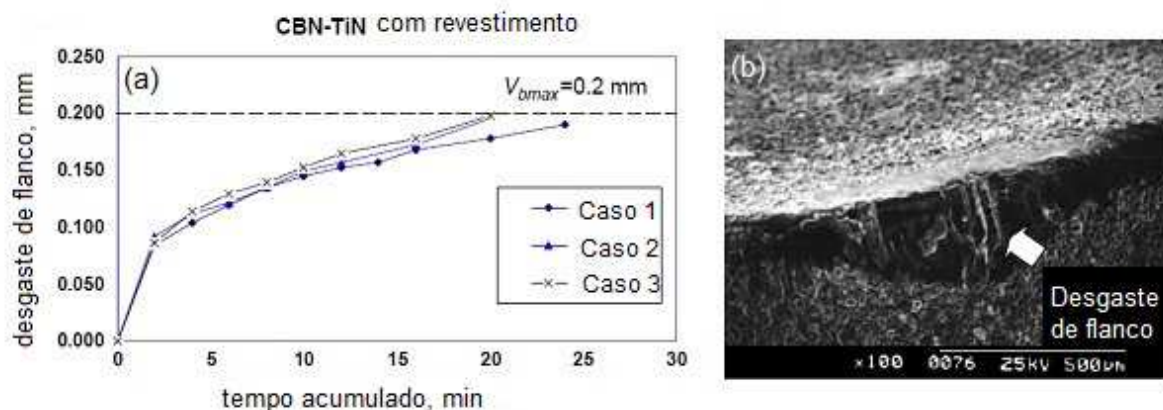


Figura 13 - (a) Desgaste de flanco dos insertos de CBN com revestimento TiN (cada curva corresponde a uma aresta de corte de um inserto), (b) Imagem mostrando o desgaste típico de flanco e cratera em um inserto de CBN com revestimento TiN após a usinagem (JIANG, MALSHE, GOFORTH, 2005).

As forças de corte exercidas por ferramentas de CBN no torneamento duro são grandes, quando há alto avanço e alta profundidade de corte, e são menores quando se tem altas velocidades de corte. Entre as variáveis do processo a que mais influência a força de corte é a profundidade de corte (BOUACHA, et al, 2009).

### 2.3. Projeto de experimento

O projeto de experimento é uma ferramenta estatística probabilística que estuda o planejamento, execução, coleta de dados, análise e interpretação dos resultados através da realização de experimentos de forma controlada (SOUZA, ETHUR, LOPES, 2002). O propósito dessa ferramenta é determinar a influência de uma ou mais variáveis sobre o comportamento de um sistema (FILHO, 2008) (Figura 14).

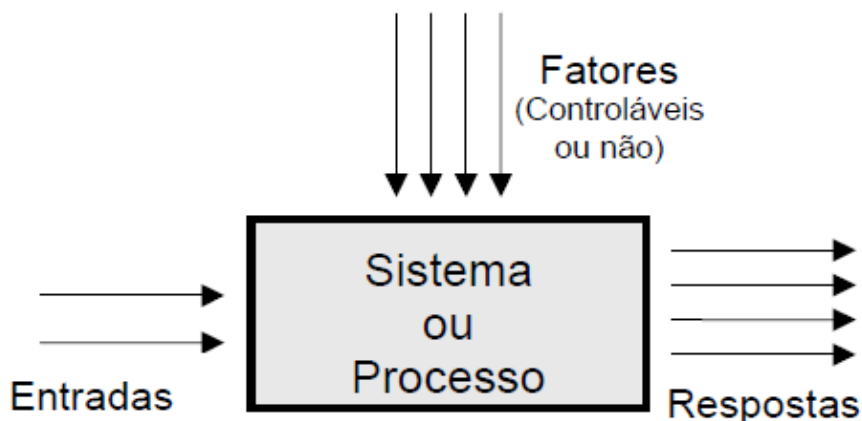


Figura 14 - Sistema ou processo, com respostas dependentes dos fatores (FILHO, 2008).

No processo experimental, os objetivos perseguidos podem ser (MONTGOMERY, 1997 apud FILHO,2008):

1. Determinar quais variáveis têm mais influência sobre as respostas;
2. Determinar quais valores deve ser associado a estas variáveis, de forma que as respostas permaneçam próximas de seus valores nominais;
3. Determinar que valores associar a estas variáveis, de forma que a variabilidade das respostas seja mínima;
4. Determinar que valores associar a estas variáveis, de forma que a influência dos fatores não controláveis seja minimizada.

Entre as diversas estratégias do projeto de experimentos pode-se citar o projeto experimental simples, nesse caso somente um fator é variado por vez. Para a combinação de fatores e seus níveis é utilizado o projeto fatorial completo ou projeto fatorial fracionário. A diferença entre essas duas estratégias citadas é a quantidade de experimentos. O projeto fatorial fracionário permite que seja realizado somente uma parte dos experimentos que seriam realizados no projeto fatorial completo (FILHO,2008).

Há ainda o projeto fatorial  $2^k$ , onde  $k$  representa o número de fatores a ser utilizado, cada um com dois ou mais níveis, essa é um importante estratégia devido (FILHO, 2008):

1. Sua simplicidade de implementação;
2. Sua facilidade de compreensão;
3. A facilidade de entender os efeitos de cada fator sobre as variáveis de repostas;

#### 4. A possibilidade de ordenação dos fatores por sua ordem de importância.

O projeto de experimentos foi usado para coletar informações durante uma pesquisa sobre perfuração de ferramentas forjadas e teve como objetivo a identificação de variáveis com maior influência no custo e na vida útil da ferramenta. Para isso, utilizou-se a variação dos parâmetros velocidade de corte, profundidade de usinagem e avanço, tem-se como exemplo a Tabela 3 (COPPINI, ROSA, BAPTISTA, 2011).

Tabela 3 - Parâmetros testados e resposta obtida (COPPINI, ROSA e BATISTA, 2011)

Vc, (m/min)	ap (mm)	fz (mm)	Vida da feramentas (min)	custo por parte (R\$)
113.6	0.7	0.7	120	60.59
170.4	1.3	0.7	18	63.00
170.4	0.7	1.7	17	62.00
113.6	1.3	1.7	13	64.02
170.4	0.7	0.7	82	60.74
113.6	1.3	0.7	174	60.54
113.6	0.7	1.7	83	60.54
170.4	1.3	1.7	2	70.10
142	1	1.2	48	61.00

Foi Utilizado projeto de experimentos para otimizar um processo de manufatura, tendo como resposta os a vida da aresta de corte, o volume de material removido e o custo por peça. Conseguiram identificar uma grande influência da velocidade de corte e da dureza do material na vida da ferramenta e que a dureza foi o fator mais influente no volume de cavaco e custo obtidos (Tabela 4) (ROSA, COPPINI, BAPTISTA, 2009).



Tabela 4 - Parâmetros testados x resposta obtida (ROSA, COPPINI e BATISTA, et al 2009).

Blocos	$V_c$ [m/min] (A)	$f_z$ [mm/dente] (B)	$a_p$ [mm] (C)	Dureza do material [HRc] (D)	$T$ [min]	Volume de cavacos removidos [mm <sup>3</sup> ]	$K_p$ [R\$]
1	255	0,2	0,48	49	39,2	221152	70,021
1	155	0,1	0,48	49	309,1	608167	63,641
1	255	0,2	0,6	53	15,6	110577	80,048
1	255	0,1	0,6	49	75	276440	68,016
1	155	0,1	0,6	53	136,8	331728	66,679
1	155	0,2	0,6	49	150	663455	63,337
1	155	0,2	0,48	53	31,2	110576	80,048
1	255	0,1	0,48	53	57,6	165864	73,363

Foi utilizado o projeto de experimentos variando a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de usinagem (Tabela 5). Utilizaram dois diferentes conjunto de velocidade de corte para diferentes dureza tendo em vista que em um teste houve falha por quebra de ferramenta no material com dureza de 45 HRc (CHINCHANICAR, CHOUDHURY, 2012).

Tabela 5 - Maiores e menores valores para os parâmetros de corte (CHINCHANICAR e CHOUDHURY, 2012)

Parametros	menor	central	maior
velocidade de corte (V) (m/min)			
material com dureza de 35 HRc	100	200	300
material com dureza de 45 HRc	100	150	200
avanço (f) (m/rev)	0.1	0.2	0.3
profundidade de corte (d) (mm)	0.5	1.5	2.5

### 3. MATERIAIS E MÉTODO

Neste capítulo serão descritos os equipamentos e as ferramentas. Em seguida, os materiais utilizados e finalmente os métodos usados para o desenvolvimento das experiências.

#### 3.1. Material

O material do corpo de prova utilizado na usinagem foi o H11N, composto por 12% de Cobalto (Co), 87,5% de carboneto de tungstênio (WC) e 0,5% de outros materiais. Esse material possui grão de carboneto de tamanho médio, alta dureza, resistência média ao desgaste e baixa resistência à corrosão. Esse metal duro foi escolhido devido a dificuldade que apresenta quando utilizado como peça, pois possui uma alta dureza 89,3 HRA e tem alta resistência ao desgaste quando é utilizado como ferramenta. Por este motivo, uma de suas aplicações mais vantajosas é a fabricação de matrizes e punções. Na Tabela 6 pode-se visualizar suas principais propriedades.

Tabela 6 - Propriedades físicas e mecânicas do H11N (Fonte: Folheto Sandvik)

Propriedades físicas e mecânicas								
grau	dureza		Resistência fratura Mpa m 1/2	Força compressão		densidade g/cm <sup>3</sup>	Resistência a corrosão (0-10)	Resistência ao desgaste (0-10)
	HV30	HRA		Mpa	Psi			
H11N	1300	89.3	16	4600	667500	14.3	3	5

O formato e as dimensões do corpo de prova são mostrados na Figura 15 e Figura 16. Foram retirados de peças de mesmo material que também utilizam a ferramenta de PCD no seu processo de torneamento duro, as peças podem ser visualizadas na Figura 17.

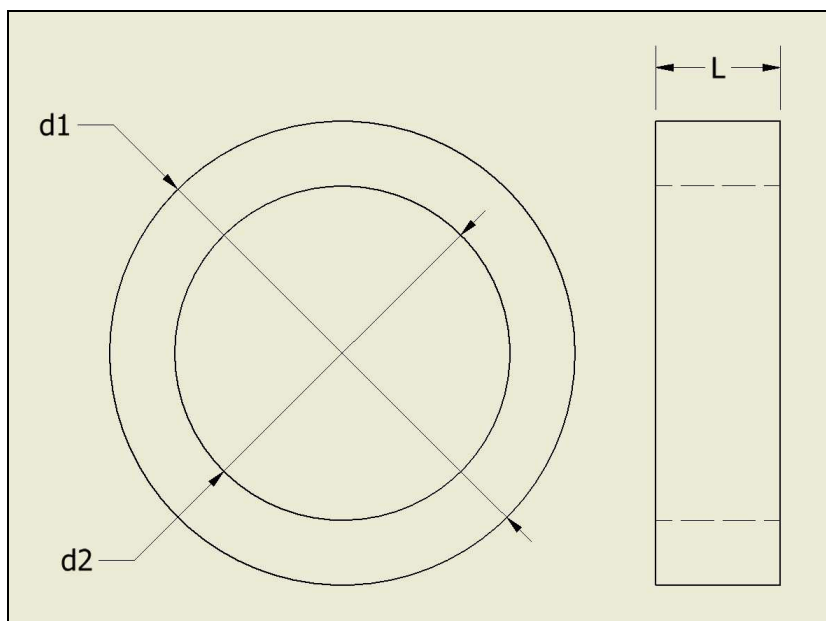


Figura 15 - Dimensões do corpo de prova  $d1 = 66,5\text{mm}$ ;  $d2 = 47,9\text{mm}$ ;  $L = 17,8\text{mm}$  (Fonte: elaborado pelo autor).



Figura 16 - Corpo de prova de Metal Duro sinterizado H11N (Fonte: elaborado pelo autor).



Figura 17 - Peças de metal duro H11N utilizadas para retirar os corpos de prova (Fonte: folheto Sandvik).

Pode-se visualizar o cavaco do metal usinado na Figura 18, é um cavaco em forma de pequenas partículas, típico de materiais frágeis.



Figura 18 - Cavaco gerado pela usinagem do metal duro H11N (Fonte: elaborado pelo autor).

Após a usinagem o material da peça foi cortado e embutido, conforme Figura 19, para a realização de ensaios metalográficos.

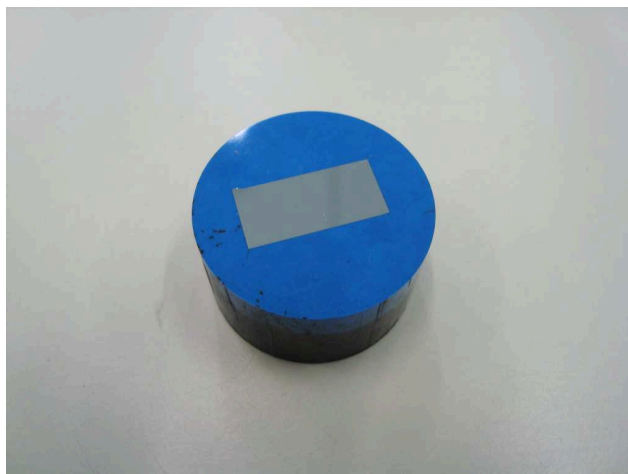


Figura 19 - Corpo de prova embutido para realização das micrografias (Fonte: elaborado pelo autor).

### 3.2. Ferramenta

Os insertos Sandvik CNMA-433 12 04 12, fornecidos pela empresa Sandvik, foram selecionados com base em experiência da Sandvik Coromant na Suécia. Entretanto, a Sandvik não publicou tais resultados, mas deram algumas indicações para os ensaios preliminares. O tipo de metal duro pesquisado neste trabalho, que tem o Cobalto em sua composição química, é diferente e mais difícil de usinar do que aquele da experiência a Sandvik, o qual tem o Níquel no lugar do Cobalto. Assim, foram utilizadas algumas orientações iniciais visando identificar o ponto de partida do seu comportamento. Uma orientação dada pela Sandvik foi a de utilizar o inserto CNMA-433 12 04 12, conforme ilustra a Figura 20. Nela,  $L = 1,2$  mm;  $R = 0,4$  mm;  $T = 1,2$  mm. Esse inserto tem incrustado em sua região de corte PCD, esse substrato pode ser visualizado na Figura 21.

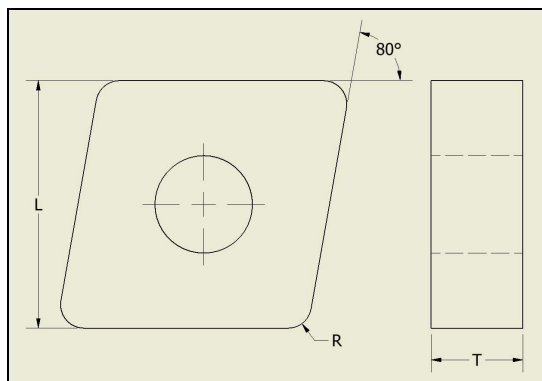


Figura 20 - Características geométrica do inserto CNMA-433 (Fonte: elaborado pelo autor).



Figura 21 – Foto do inserto mostrando o PCD incrustado no substrato de metal duro (Fonte: elaborado pelo autor).

### 3.3. Equipamentos

Foi utilizado para o desbaste dos corpos de prova um torno (Figura 22), marca CNC ROMI Galaxy 20 com porta ferramentas e 12 estações, fixação em placa de 250mm com 4 castanhas, comando GR Fanuc série 21i-Tr, cabeçote principal movido por um motor AC de 11KW e cabeçote secundário movido por um motor de 5,5KW. Todos os testes de usinagem foram realizados no laboratório do Departamento de Materiais e Manufatura da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas (LAB/DEMM/FEM/UNICAMP).



Figura 22 - Torno ROMI Galaxy 20 (LAB/DEMM/FEM/UNICAMP) (Fonte: elaborado pelo autor).

Para a pesagem das ferramentas antes e após a usinagem, foi utilizado uma balança analítica Shimadzu AX200 (Figura) 23, com capacidade para até 200g e pesagem mínima de de 0,1mg.



Figura 23 - Balança analítica Shimadzu AX200 (LAB/DEMM/FEM/UNICAMP) (Fonte: elaborado pelo autor),

Para avaliar a rugosidade do material foi utilizado o rugosímetro Mitutoyo SJ-201 com uma faixa de medição entre  $-200\mu\text{m}$  e  $160\mu\text{m}$ , compatível com as normas de rugosidade JIS, VDA, ISO-1997 e ANSI (Figura 24). Foram realizadas 3 medições

na região usinada por corpo de prova, elas estão distantes entre si por  $120^\circ$  e na mesma distância no eixo z.



Figura 24 - Rugosímetro Mitutoyo SJ-201 (LAB/DEMM/FEM/UNICAMP) (Fonte: elaborado pelo autor).

Para verificação visual do desgaste da ferramenta foi utilizado um microscópio estereoscópico binocular MOTIC (Figura 25), com o aumento de 25x conectado a um computador com o software MOTIC Image versão 2.0. O desgaste foi medido após cada passe realizado.

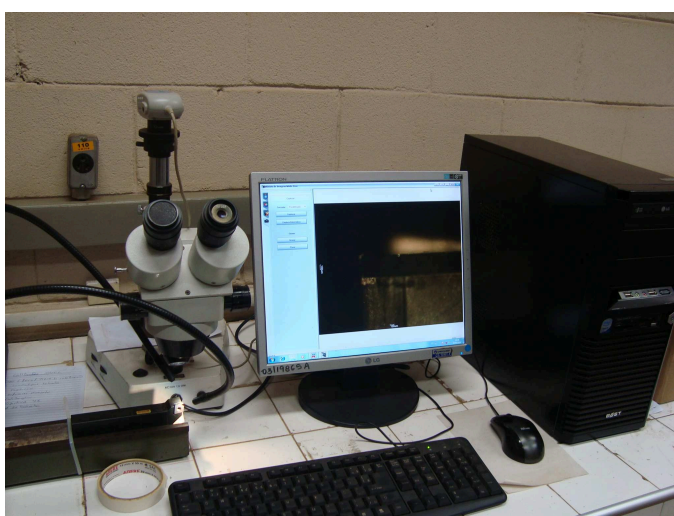


Figura 25 - Microscópio estereoscópico binocular ligado a um computador utilizando o software MOTIC Image 2.0 (LAB/DEMM/FEM/UNICAMP) (Fonte: elaborado pelo autor).



No laboratório da Sandvik foram preparados corpos de prova utilizados para realização de microscopia, visando avaliar o tamanho médio de grão e sua distribuição. Partes dos corpos de prova foram separados utilizando-se para tanto um *Cut-off* Prazis COR-100 com disco de corte diamantado.

As peças foram embutidas na máquina Opal-450, com capacidade para operar com dois embutimentos ao mesmo tempo. Essa máquina opera em temperaturas de até 200 °C e proporciona até 120 bar de pressão.

A retificadora utilizada foi a Saphir 375, com disco diamantado, ela pode alcançar até 1700 rpm com pressão variável de 50 a 400 N.

As peças passaram por lixamento grosso e fino com solução diamantada no equipamento labor system, cada uma das lixas correspondem a um tipo de lixamento.

O microscópio utilizado para observação da estrutura do material foi o olympus BX51M (Figura 26), ele é um microscópio trinocular com objetivas de 5x, 10x, 20x, 50x e 100x, o mesmo esta conectado a um computador.

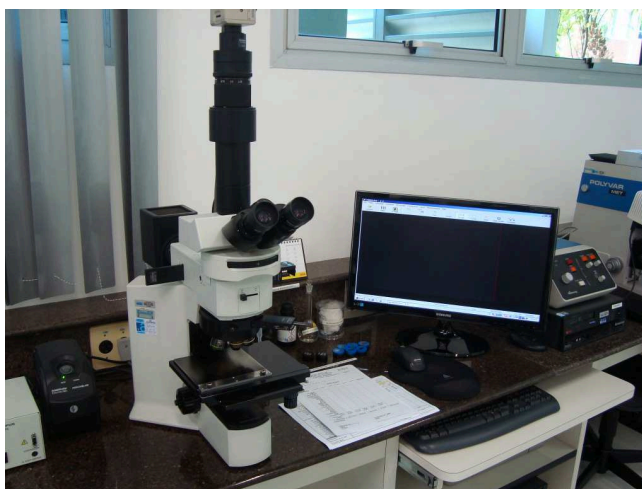


Figura 26 - Microscópio Olympus BX51M (LAB/SANDVIK) (Fonte: elaborado pelo autor).

Para a análise de EDS foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV), da escola SENAI "Mariano Ferraz". O equipamento utilizado é de marca Hitachi, modelo TM 3000 que permite aumento de até 30000 vezes.

### 3.4. Métodos

O método utilizado neste trabalho foi investigativo e experimental em laboratório de usinagem. Os resultados da pesquisa científica obtidos foram suficientes para sugerir os melhores parâmetros de usinagem de peças de metal duro sinterizado.

As arestas de corte dos insertos foram visualizadas no microscópio para averiguar o estado das mesmas.

Os insertos foram pesados antes e depois da usinagem visando quantificar a perda de peso do inserto devido ao desgaste que ocorre durante a usinagem. Cada inserto passou por três pesagens e a partir desses valores foi obtida uma média. Todos os pesos foram medidos em gramas e precisão da balança utilizada foi de décimos de milésimos de grama.

Na fase preliminar foi realizado um planejamento de experimentos. Nele foram adotados os parâmetros de entrada, avanço e velocidade de corte para desbaste por torneamento interno de corpos de prova do metal duro (H11N) sinterizado (Tabela 7). A profundidade de usinagem não foi incluída na pesquisa por ser um parâmetro de corte, cuja dimensão deve ser a menor possível e compatível com o raio da aresta de corte. Foi adotado o valor de 0,4 mm considerando a recomendação da Sandvik. Foram formados pares de corpos de prova e insertos que foram numerados de 1 a 11. As variáveis dependentes ou parâmetros de saída foram Rugosidade (Ra) e desgaste (VB).

Tabela 7- Velocidades de Corte e avanços utilizados nos ensaios preliminares (Fonte: elaborado pelo autor).

<b>Ferramenta</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
<b>Vc (m/min)</b>	15	20	7,92	10	15	10	22,1	15	20	15	15
<b>f (mm/rev)</b>	0,09	0,1	0,09	0,1	0,09	0,08	0,09	0,104	0,08	0,09	0,08

Após a usinagem o corpo de prova teve sua rugosidade medida e para cada corpo de prova foi realizada a média de 3 medidas em 3 regiões distintas, elas estão separadas entre si em 120° e na mesma posição em relação ao eixo z.

Em seguida, devido a quebra prematura dos insertos, foi realizada a análise do material utilizado na usinagem. Para esse procedimento foi utilizado o laboratório da Sandvik. Foram utilizados os corpos de prova 2, 3, 4, 5, 6, 8 e 9. Estes, correspondem a todos os insertos que falharam nos testes preliminares. O corpo de prova 7 também foi utilizado, mas o inserto correspondente não quebrou prematuramente no primeiro passe.

Cada corpo de prova foi embutido e rotulado de acordo com o número atribuído aos pares de corpos de prova e insertos originalmente adotados. Todos passaram pelos procedimentos de preparação de amostras para realização das micrografias, ou seja: lixamento grosso, lixamento fino ( $6\mu\text{m}$ ), polimento grosso ( $3\mu\text{m}$ ) e polimento fino ( $1\mu\text{m}$ ) e ataque químico Murakami (água destilada, ferrocianeto de potássio e hidróxido de sódio). Finalmente, foi realizado um ensaio em MEV/EDS principalmente para caracterizar experimentalmente a composição química dos corpos de prova.

Na fase final dos experimentos foram selecionados os melhores valores retirados da fase inicial (Tabela 8). Após essa seleção, 11 conjuntos de corpo de provas e insertos passaram pelo mesmo processo de checagem em microscópio, pesagem e usinagem que foi realizado nos testes preliminares.

Tabela 8 - Parâmetros utilizados nos ensaios finais (Fonte: elaborado pelo autor).

		Velocidade de corte [m/min]	
		15	22,1
Avanço [mm/ver]	0,08	2 (1)	3 (1)
	0,09	2 (3)	4 (1)

Observação: os valores entre parênteses representam replicações ainda provenientes dos testes preliminares.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Os resultados e as discussões referem-se tanto aos ensaios preliminares quanto os finais. Será abordada a pesagem dos insertos, a análise das arestas de corte, do desgaste e da rugosidade.

### **4.1. Peso dos insertos**

Resultados da pesagem dos insertos dos ensaios preliminares e finais, com objetivo de medir o desgaste das ferramentas.

#### **4.1.1. Ensaio preliminares**

Os resultados dos pesos médios estão apresentados no Tabela 9 para os ensaios preliminares. Foi possível observar que:

- cinco insertos tiveram DIMINUIÇÃO de peso após usinagem – coerente;
- seis insertos tiveram AUMENTO de peso após usinagem – incoerente;
- os insertos que não quebraram tiveram AUMENTO de peso após a usinagem, exceto o inserto 11 – incoerente exceto o comportamento do inserto 11;
- os insertos que quebraram tiveram DIMINUIÇÃO de peso após a usinagem, Exceto os insertos 3 e 6 – coerente, exceto o comportamento dos insertos 3 e 6.

Diante deste panorama, foi possível inferir que em todos os casos houve aderência de material do corpo de prova nos insertos. Os desgastes são muito pequenos. Observa-se na Tabela 12 que o maior valor de VB foi o do inserto 7 com um valor de 0,4mm. A distribuição dos desgastes ocorre praticamente ao longo de um valor da ordem da profundidade de usinagem utilizada que foi de 0,4mm. Assim, o desgaste muito pequeno é superado pelo peso do material aderido e provavelmente o peso dos insertos que quebraram deve ser ainda menor do que os medidos.

O objetivo foi medir os desgastes utilizando o peso desgastado do inserto com a ação do processo de usinagem. Entretanto, somente foi possível concluir que houve aderência. Este aspecto não foi possível de ser conclusivo porque todos os insertos foram utilizados até a quebra, justamente para avaliar a vida dos mesmos.

Tabela 9 - Pesagem de insertos antes e após a usinagem para os ensaios preliminares (Fonte: elaborado pelo autor).

Feramenta	Peso da ferramenta antes da usinagem (média - gramas)	Pesagem das ferramentas após a usinagem (média - gramas)	Diferença x 10 <sup>-4</sup>	
1	10,2942	10,2947	5	Não quebrou
2	10,3671	10,3661	-10	quebrou
3	10,2685	10,2688	3	quebrou
4	10,3302	10,3287	-15	quebrou
5	10,3145	10,3147	2	Não quebrou
6	10,3136	10,3144	8	quebrou
7	10,2684	10,2685	1	Não quebrou
8	10,2902	10,2900	-2	quebrou
9	10,2953	10,2888	-65	quebrou
10	10,2688	10,2693	5	Não quebrou
11	10,2729	10,2728	-1	Não quebrou

#### 4.1.2. Ensaios finais

Todos aspectos relacionados com as discussões sobre os resultados preliminares, são válidos para os ensaios finais.

Os resultados dos pesos médios estão apresentados na Tabela10 para os ensaios finais. Foi possível observar que:

- quatro insertos tiveram DIMINUIÇÃO de peso após usinagem – coerente;
- quatro insertos tiveram AUMENTO de peso após usinagem – incoerente;
- 3 insertos não obtiveram diferença de peso após a usinagem;

Tabela 10 - Pesagem de insertos antes e após a usinagem para os ensaios finais (Fonte: elaborado pelo autor).

Feramenta	Peso da ferramenta antes da usinagem (média - gramas)	pesagem das ferramentas após o ultimo passe (média - gramas)	Diferença x 10 <sup>-4</sup>	números de passes até a quebra da ferramenta
12	10,3294	10,3288	6	2
13	10,3134	10,3135	-1	9
14	10,3209	10,3205	4	8
15	10,2919	10,2916	3	7
16	10,3629	10,3629	0	6
17	10,3130	10,3131	-1	9
18	10,2918	10,2918	0	9
19	10,2964	10,2966	-2	6
20	10,3022	10,3021	1	4
21	10,3217	10,3221	-4	5
22	10,2728	10,2728	0	2

## 4.2. Análise das arestas de corte

Todas arestas de corte, apesar de serem novas, foram visualizadas no microscópio em aumento de 25x antes da usinagem para verificar se estavam em boas condições e após a usinagem, para verificar se houve desgaste ou quebra da ferramenta.

### 4.2.1. Ensaios preliminares

As ferramentas dos ensaios preliminares, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10 e 11 apresentaram boa condição na aresta de corte, mas a ferramenta 6 apresentou pequeno desgaste antes da usinagem, conforme a Figura 27.

Após a usinagem foi constatado que houve quebra das ferramentas 2, 3, 4, 6, 8 e 9, e as ferramentas 1, 5, 7, 10 e 11 apresentaram desgaste, mas não quebraram.

No ANEXO 1 pode-se observar as imagens obtidas em microscópio ótico. Apesar da qualidade das fotos não permitir observar de maneira clara as condições das arestas de corte antes de serem utilizadas nos ensaios, pode-se ao menos ter uma idéia da presença de defeitos nas mesmas.

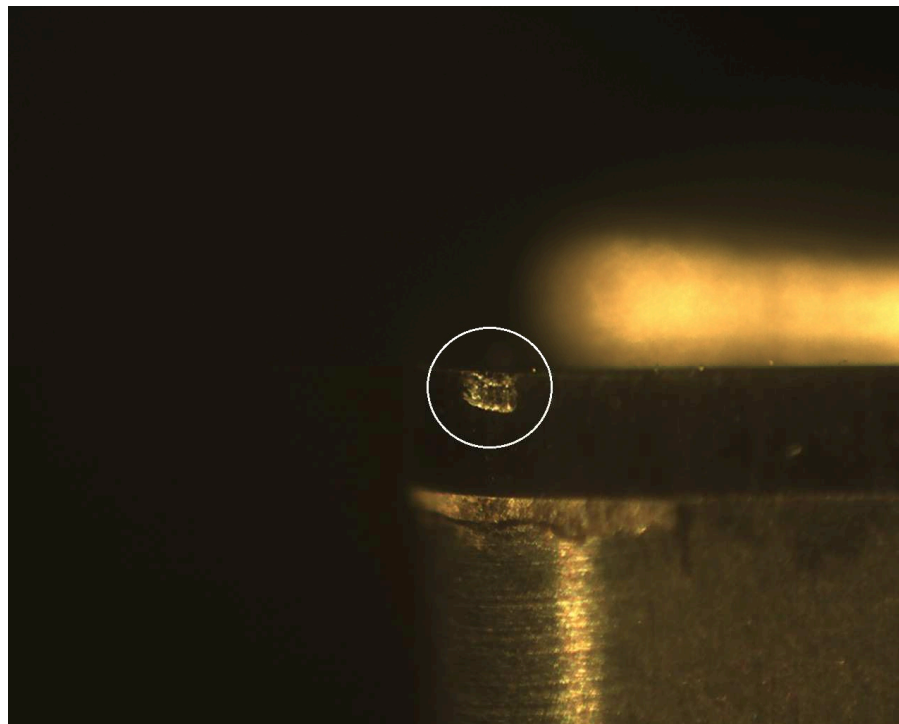


Figura 27 - Desgaste apresentado pela ferramenta 6 antes da usinagem (Fonte: elaborado pelo autor).

#### 4.2.2. Ensaios finais

As ferramentas dos ensaios finais, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 e 22 apresentaram boa condição da aresta de corte. Elas foram visualizadas novamente a cada passe realizado para verificar o desgaste ou se houve quebra. Na Tabela 13 pode ser observado o número de passes que cada ferramenta alcançou e na Tabela 11 pode-se observar o volume de cavaco removido.

Tabela 11 - Volume de cavaco removido em mm<sup>3</sup> por número de passes (Fonte: elaborado pelo autor).

1 passe	1934,22mm <sup>3</sup>
2 passes	3884,52mm <sup>3</sup>
3 passes	5850,9 mm <sup>3</sup>
4 passes	7833,38mm <sup>3</sup>
5 passes	9331,94mm <sup>3</sup>
6 passes	11846,58mm <sup>3</sup>
7 passes	13877,31mm <sup>3</sup>
8 passes	15923,62mm <sup>3</sup>
9 passes	17986,52mm <sup>3</sup>

Formula	$V=\pi h (R^2-r^2)$
V= volume	h=comprimento
r=raio interno	R=r+(número de passes x 0,4)

### 4.3. Análise dos desgastes e das rugosidades

As rugosidades e os desgastes foram medidos a cada passe e posteriormente discutidos.

#### 4.3.1. Ensaios preliminares

O teste preliminar consistiu em realizar um projeto de experimentos (DOE) para determinar quais parâmetros seriam testados. O DOE realizado foi o fatorial 2<sup>k</sup>, com dois fatores. Por meio das variações de velocidade de corte e avanço, foi possível selecionar os melhores resultados para serem aplicados na primeira etapa de ensaios. Na tabela 12 pode-se conferir quais foram os parâmetros selecionados.

Da Tabela 12 é possível observar que seis ferramentas quebraram após o primeiro passe. Representa (54%) do total de insertos utilizados, e entre as ferramentas que não quebraram o desgaste de flanco (vb) variou entre 0,19mm e 0,40m.



Tabela 12 - Resultado do teste preliminar referente aos desgastes ou quebras em um passe de 0,4 mm de profundidade de usinagem mantido constante (Fonte: elaborado pelo autor).

Feramenta	Avanço f (mm/rev)	Velocidade de corte vc (m/min)	Desgaste VB (mm) ou quebra da aresta de corte	Rugosidade (Ra - $\mu\text{m}$ )
1	0,09	15	0,37	0,68
2	0,1	20	quebrou	0
3	0,09	7,92	quebrou	2,13
4	0,1	10	quebrou	1,72
5	0,09	15	0,19	2
6	0,08	10	quebrou	0
7	0,09	22,1	0,40	1,34
8	0,104	15	quebrou	1,46
9	0,08	20	Quebrou no final	1,24
10	0,09	15	0,24	0,86
11	0,08	15	0,29	0,86

Para explicar a incidência do grande número de quebras, foi adotada a seguinte providência:

- Realizar fotos micrografias de todos os corpos de prova que quebraram e de um que não quebrou. Para os demais corpos de prova que não quebraram não foram realizadas as foto micrografias para mantê-los íntegros visando a realização de mais passes;
- as foto micrografias foram feitas nas mesmas posições relativas dos corpos de prova para permitir comparações;
- os resultados encontram-se na Figura 28.

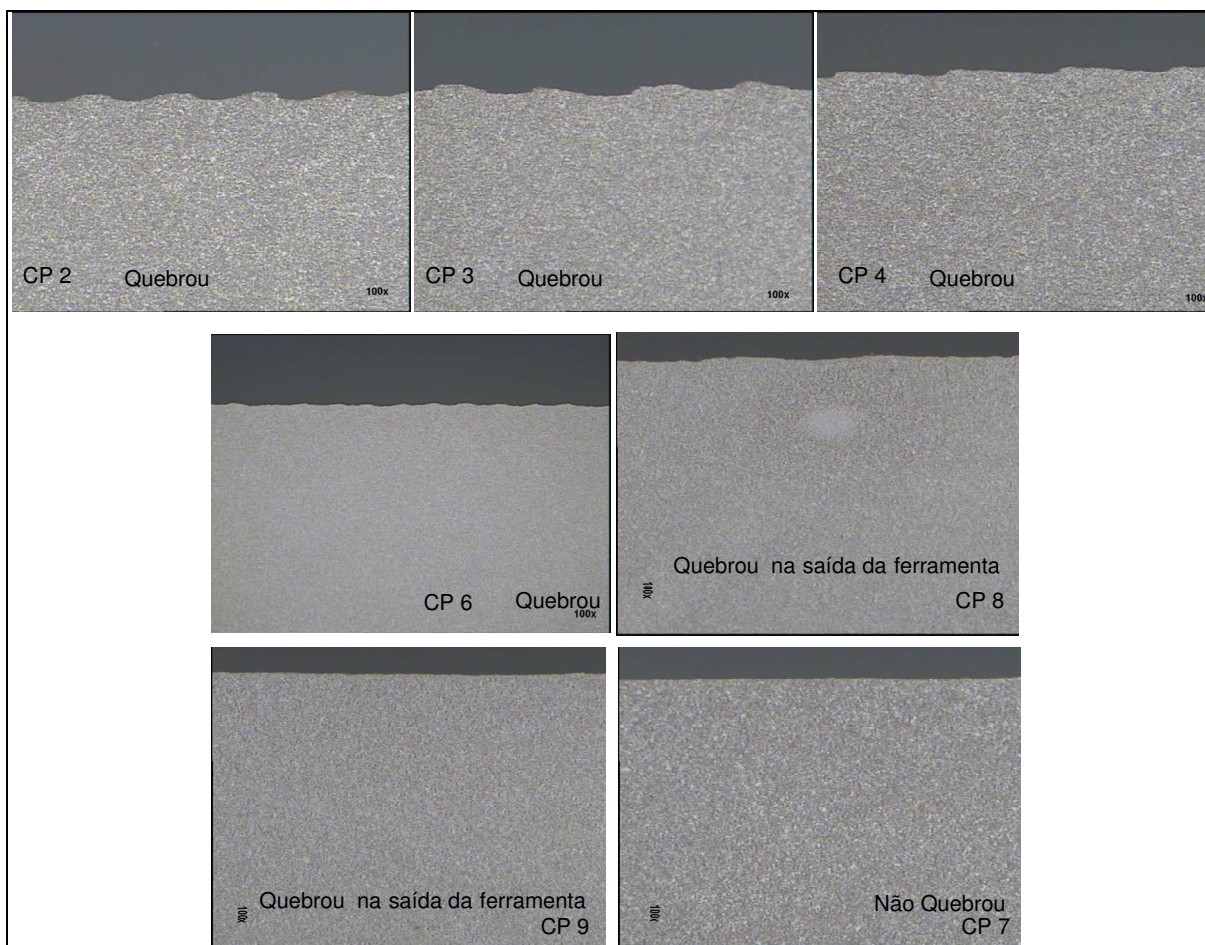


Figura 28. Micrografias com aumento de 100x dos corpos de prova cujas ferramentas quebraram durante o torneamento. No corpo de prova 9 a ferramenta quebrou bem no final do passe e o corpo de prova 7 a ferramenta não quebrou (Fonte: elaborado pelo autor).

Com base nos resultados obtidos e apresentados na Figura 28, foram levantadas as seguintes hipóteses:

**Primeira Hipótese:** As arestas de corte dos insertos que quebraram não estavam com afiação perfeita e reproduziram na superfície usinada dos corpos de prova uma marca de avanço, que permaneceu registrado a imperfeição. Tais imperfeições teriam sido responsáveis pela quebra da aresta de corte dos insertos dos corpos de prova CP 2, CP 3, CP 4 e CP 6. Para os corpos de prova CP 8 e CP 9 a presença de imperfeições dos respectivos insertos não aparecem na superfície usinada. Apesar das arestas de corte de terem quebrado, isso ocorreu bem no final do primeiro passe. Finalmente, a total ausência de imperfeições no CP 7, que não quebrou, comprova a grande possibilidade desta hipótese.

**Segunda Hipótese:** Como os corpos de prova têm o formato de um anel, o ajuste na centralização da ferramenta necessitou do uso de um dispositivo. Existe a possibilidade de esta providência ter provocado dificuldade com a perfeita centralização da ferramenta e este fato ter sido responsável por provocar um efeito de vibração da ferramenta. Um ruído típico de vibração foi sentido no momento da usinagem que dá algum reforço a esta hipótese. Entretanto, ela não foi bem aceita, pois, para a mesma centralização algumas das ferramentas não apresentaram quebra da aresta de corte.

**Terceira Hipótese:** A máquina utilizada é bastante robusta para realização de torneamentos externos, mas sua torre pode apresentar vibrações para torneamento interno. Houve algumas ferramentas que não apresentaram quebra prematura portanto a vibração da torre pode ter ocorrido somente em alguns ensaios.

**Quarta Hipótese:** Como a estrutura dos corpos de prova de metal duro sinterizado é produzido a partir de pós de óxidos químicos de sua composição, e pode ter a influência de tamanhos de grãos diferentes na distribuição destes e nos diferentes corpos de prova. Os tamanhos de grãos podem ser próximos ao avanço o que causaria a quebra das ferramentas. Foram realizadas análise de microestruturas e foi possível descartar esta hipótese. As micrografias estão apresentadas no ANEXO 2. Conforme a Figura 29 os maiores grãos do material não alcançam 0,007mm, tendo em vista que o avanço varia entre 0,08mm e 0,1mm, não há proximidade entre as dimensões. A dimensão e a distribuição dos grãos são muito menores que o avanço adotado e, portanto, a usinagem ocorreu de forma a não ocorrer variações bruscas de esforços de corte.

**Quinta Hipótese:** Para explicar o número alto de quebras de insertos e acredita-se que presença de contaminação ou porosidade no material usinado, que poderia ocasionar uma variação na força de usinagem, podendo levar o inserto a quebra. Essa possibilidade foi rejeitada após a visualização da estrutura do material em aumento de 1000x por MEV e análise via EDS. Pode-se verificar nas Figuras 30 e 31 a homogeneidade e ausência de porosidade no material.

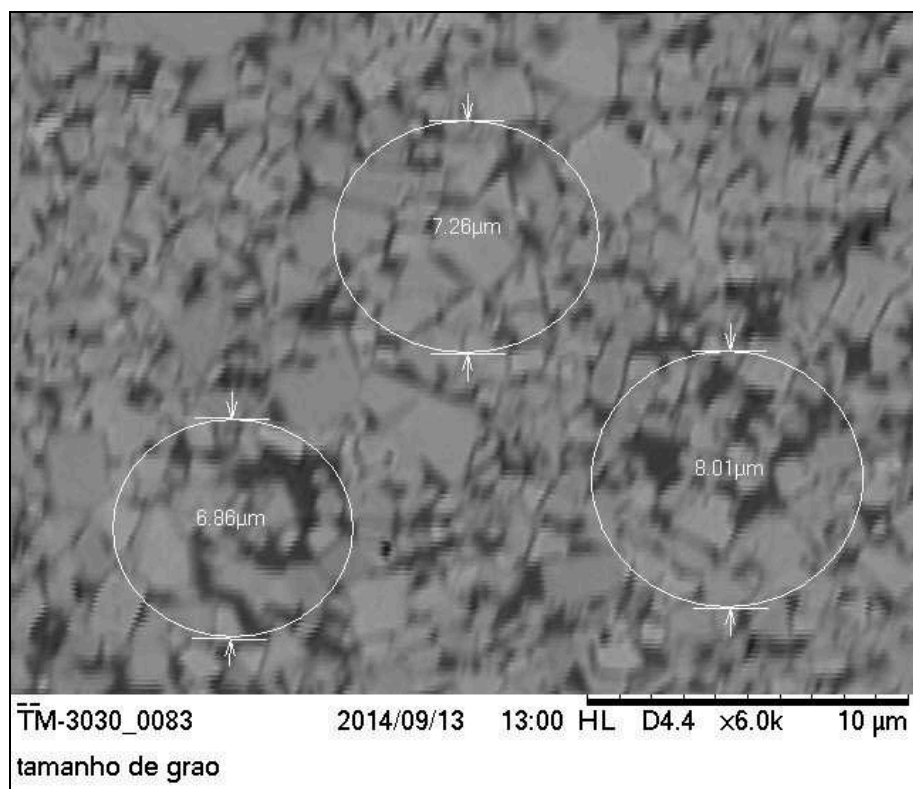


Figura 29 - Visualização de tamanho de grão do corpo de prova de metal duro H11N sinterizado, obtido por MEV (Fonte: elaborado pelo autor).

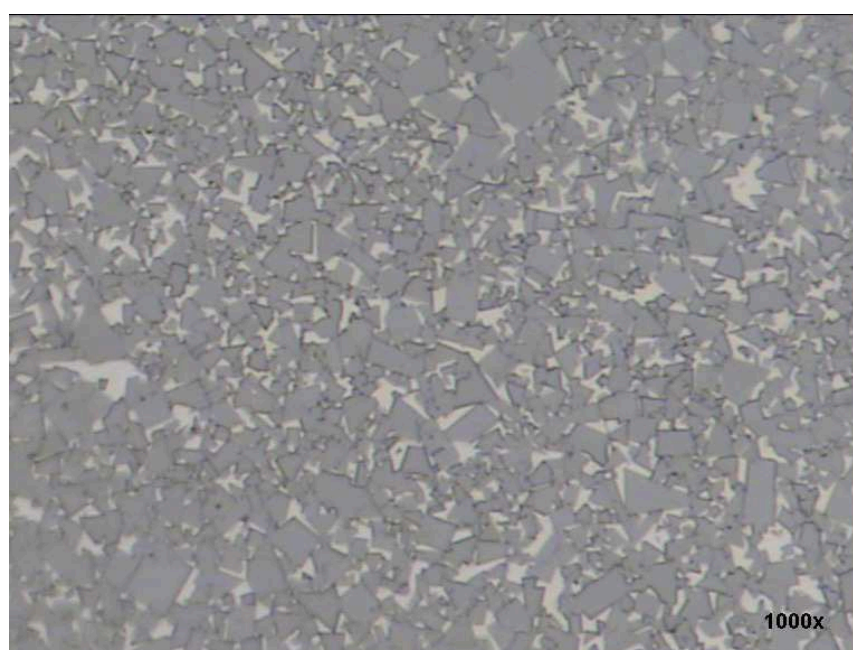


Figura 30 - Corpo de prova 3 - estrutura do material obtida pelo Microscópio Trinocular (Fonte: elaborado pelo autor).

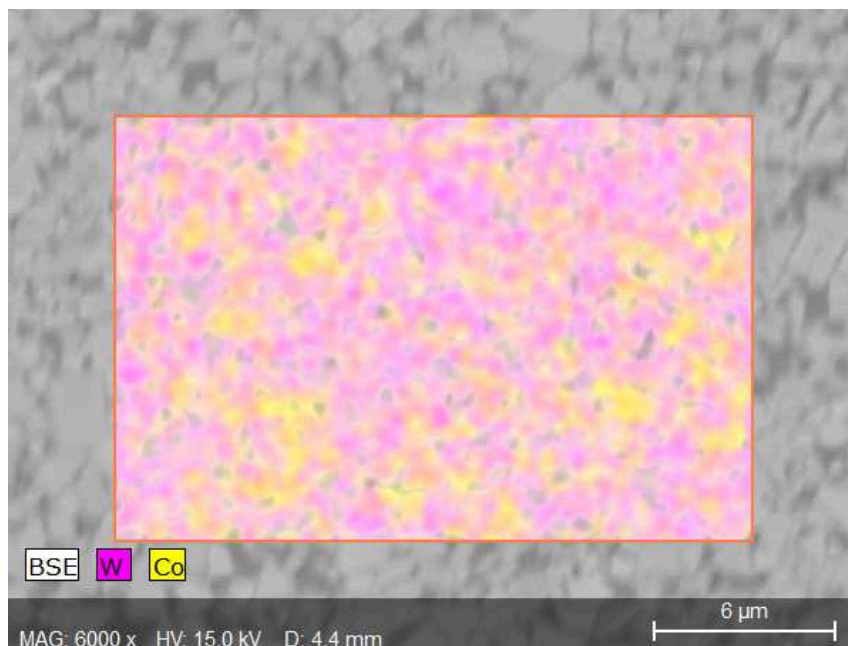


Figura 31 – Composição do material metal duro H11N siterizado em análise por EDS (Fonte: elaborado pelo autor).

Conforme a Tabela 12 a rugosidade medida nos testes preliminares variou entre 0,68 e 2  $\mu\text{m}$  para os insertos que não quebraram. Os valores para os insertos que quebraram foram maiores e as medidas foram realizadas na parte do corpo de prova que foi permitido usinar, ou seja, sempre menor que o comprimento de avanço total adotado para um passe. A Figura 32 apresenta a rugosidade dos ensaios preliminares.

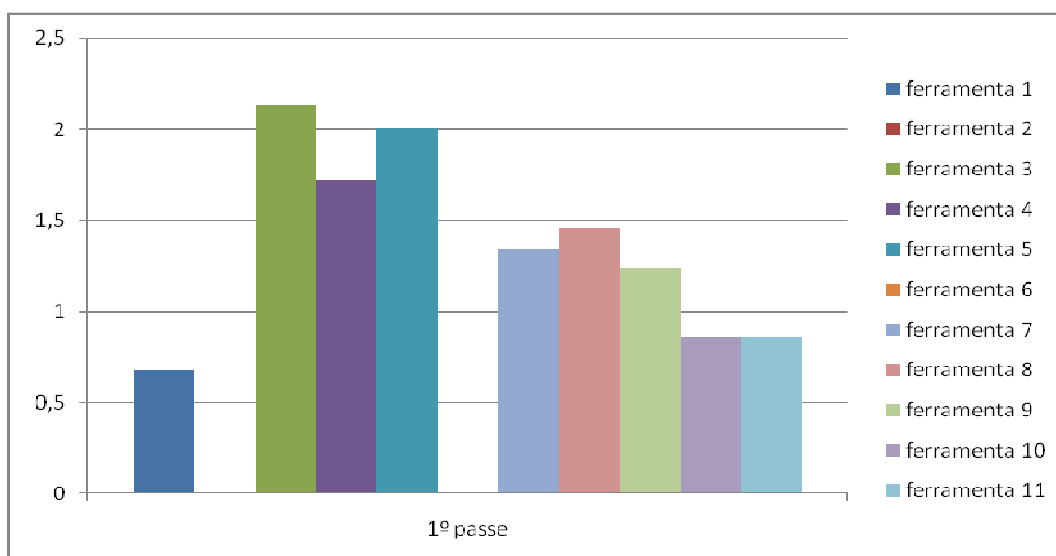


Figura 32 - Rugosidade alcançada nos testes preliminares (fonte: elaborado pelo autor).

### 4.3.2. Ensaio finais

Na fase de ensaios finais, de acordo com o número de valores apresentados na Tabela 8, foram realizados os 11 testes, utilizando-se para tanto todas as ferramentas e corpos de prova disponíveis. O Tabela 13 resume os resultados destes ensaios.

Observa-se que os resultados dos ensaios finais foram melhores do que os obtidos nos preliminares. Com isso foi possível selecionar 8 ferramentas que conseguiram realizar em média aproximadamente 7 passes antes de apresentar quebra. Os passes variaram entre 5 e 9.

Observa-se que velocidade de corte maior, mesmo quando combinada com qualquer dos dois avanços testados, apresentou resultados positivos. Foi possível inferir que os poucos casos de quebras prematuras de arestas de corte, para qualquer dos pares de parâmetros utilizados, ocorreu devido a acidentes imprevisíveis.

Conforme apresentado na Tabela 13, todos os corpos de prova tiveram a rugosidade da superfície usinada medida. Entretanto, apesar de ter sido positivo encontrar uma vida para usinagem alta para esse material de elevada dureza, os resultados de rugosidade não alcançaram os mesmos valores que os do processo de retificação.

Tabela 13 - Resultado do teste final referente a quantidade de passes até a quebra da ferramenta  
(Fonte: elaborado pelo autor).

Ferramenta	Avanço (f - mm/rev)	Velocidade de corte (Vc - m/min)	(ap - mm)	Desgastes - VB (*), mm	Rugosidade após o último passe (Ra - $\mu\text{m}$ )	Quantidade de passes até a quebra da ferramenta
12	0,08	15	0,4	0,04	0,71	2
13	0,08	15		0,32	2,3	9
14	0,09	22,1		0,28	1,43	8
15	0,09	22,1		0,17	1,64	7
16	0,08	22,1		0,25	1,07	6
17	0,08	22,1		0,22	1,42	9
18	0,08	22,1		0,34	1,03	9
19	0,09	15		0,38	2,02	6
20	0,09	15		0,33	1,08	4
21	0,09	22,1		0,17	1,37	5
22	0,09	22,1		0,09	1,11	2

(\*) desgaste medido no último passe antes da falha por quebra da aresta de corte.

A partir dos resultados dos testes finais foi obtida a Figura 33, que mostra a evolução da rugosidade diante dos passes realizados na usinagem e verifica-se que, de modo geral, a rugosidade tende a piorar quanto maior número de passes realizados com a mesma ferramenta. Esse aumento do desgaste a cada passe ocorre na maioria das vezes, mas há exceções como citado no artigo escrito por De Godoy e Diniz (2011).

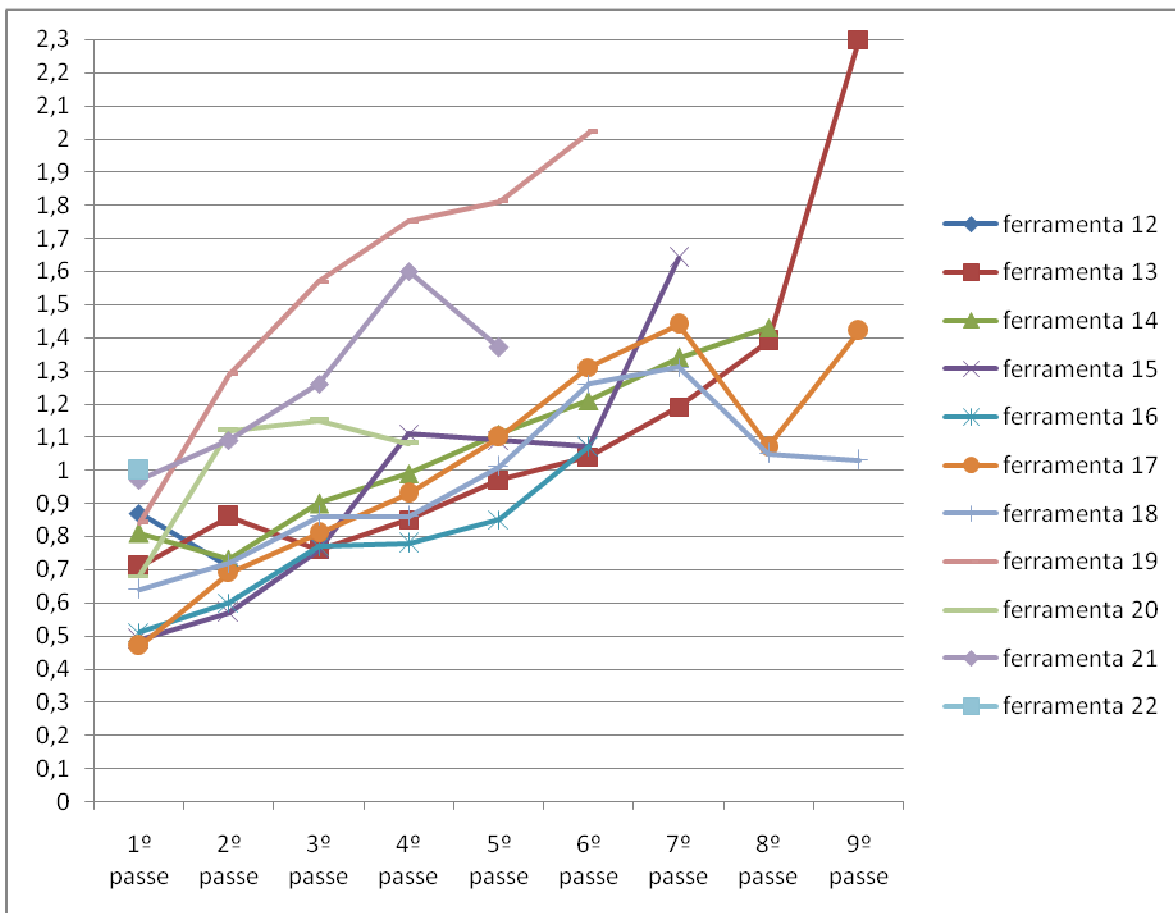


Figura 33 - Evolução da rugosidade em relação aos passes realizados durante os ensaios finais (Fonte: elaborado pelo autor).

A evolução do desgaste nas ferramentas pode ser visualizado na Figura 34. Pode-se observar que entre os desgastes de 0,15 e 0,25 há quebra de ferramenta ou um grande aumento de desgaste, de modo que a aresta de corte a falha por quebra no passe seguinte. Com essas informações, pode-se definir como critério de fim de vida útil para os insertos o desgaste de flanco ( $V_b$ ) de 0,20mm, sendo que acima deste limite as arestas de corte estarão na iminência de falha por quebra.



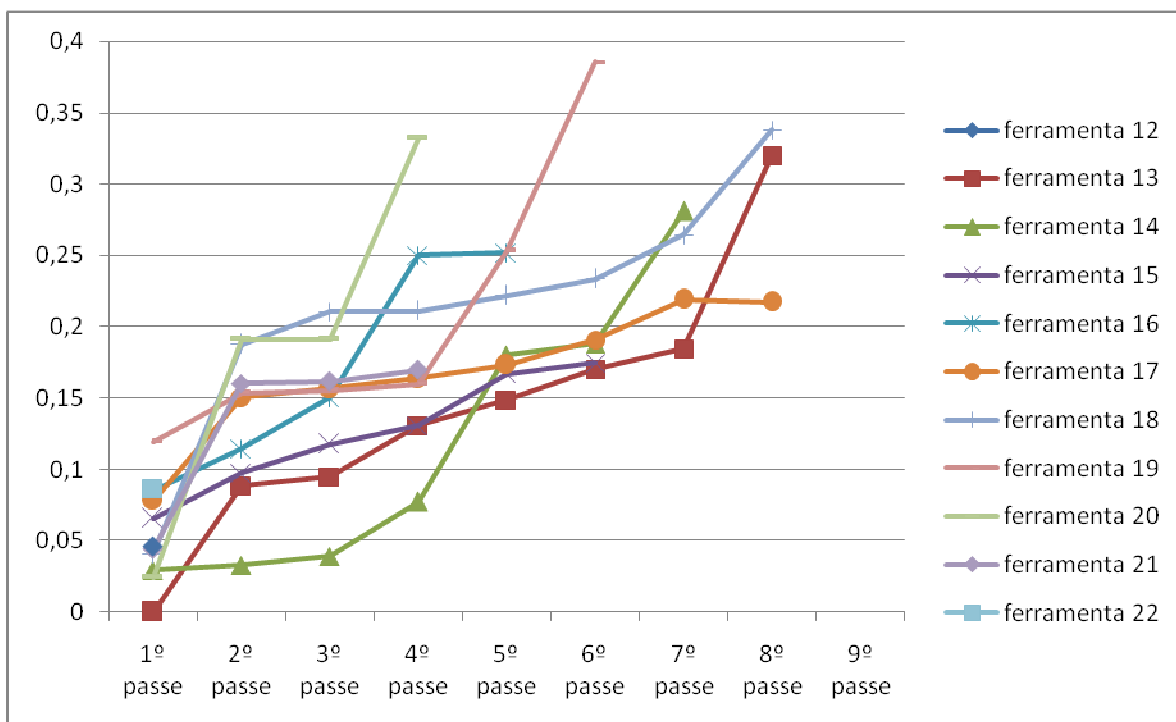


Figura 34 - Evolução do desgaste das ferramentas em relação ao número de passes (Fonte: elaborado pelo autor).

## **5. CONCLUSÕES**

### **5.1. Ensaio Preliminares**

O presente trabalho apresentou as seguintes conclusões preliminares

- A análise de EDS mostra que os materiais dos corpos de prova cujas ferramentas quebraram não possuem impurezas. Portanto este fator não é o que justificaria o número de quebras exagerado que ocorreu;
- A porcentagem de insertos que quebraram foi de 54%. Uma possibilidade de explicação para o grande número de quebras é que elas ocorreram por acidentes não passíveis de serem identificados, ou devido à possíveis imperfeições eventualmente ocorridas na preparação e ou afiação das arestas de corte;
- Outras hipóteses levantadas para justificar a alta frequência de quebra (54%) e que foram descartadas são: vibrações provindas do sistema da máquina; vibrações devido às dificuldades de centralização da ferramenta; presença de grãos de dimensões relativas ao raio do inserto, que pudessem provocar variações bruscas dos esforços de corte durante a usinagem; presença de poros ou impurezas no material dos corpos de prova. Estas hipóteses foram todas descartadas durante a análise dos resultados.

### **5.2. Conclusões Finais**

- Conclui-se que a vibração presente na torre do torno CNC (terceira hipótese formulada) foi a que melhor explica a alta incidência de quebra das arestas de corte dos insertos.
- Apesar da grande diferença de desempenho entre as ferramentas utilizadas nos ensaios preliminares e finais, o projeto de experimentos foi adequado para definir os parâmetros relativos aos ensaios finais;

- A vida das arestas de corte das ferramentas utilizadas nos ensaios finais foi superior às expectativas.
- Os parâmetros testados na fase final da pesquisa podem ser recomendados como viáveis para a prática do torneamento do metal duro H11N sinterizado, desde que a velocidade de corte de 22,1 m/min combinada com avanço de 0,09;
- O critério de vida adequado para troca da aresta de corte foi determinado como sendo o desgaste  $VB = 0,2$  mm;
- Não foi conseguido níveis de rugosidade superficial que permitissem concluir que o torneamento duro, realizado neste ensaio, possa substituir o processo de retificação.

### **5.3. Sugestões para trabalhos futuros**

- Realizar um número maior de ensaios para consolidar estatisticamente os resultados obtidos neste trabalho, o qual foi limitado por disponibilidade de corpos de prova e ferramentas;
- Analisar diferentes geometrias de aresta de corte visando acabamentos superficiais com rugosidades equivalentes às conseguidas por retificação;
- Pesquisar outras composições para peças de metais duros sintetizados;
- Pesquisar outros materiais e geometrias de arestas de corte como alternativa ao PCD, como por exemplo, o CBN;
- Desenvolver placa para estabilidade da torre em torneamento interno;
- Realizar torneamento externo do metal duro sinterizado H11N e qualificar parâmetros viáveis para esse processo.

## REFERÊNCIAS

AOUICI, H.; YALLESE, M. A.; CHAOUI, K.; MABROUKI, T.; RIGAL, J. F. **Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turnin with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization.** Measurement, 2011.

BARTARYA, G.; CHOUDHURY, S. K. **State of the art in hard turning.** International journal of Machine Tools & Manufacture, 2011.

BELMONTE, M.; FERRO, P.; FERNANDES, A. J. S.; COSTA, F. M.; SACRAMENTO, J.; SILVA, R. F. **Wear resistant CVD diamonds tools for turning of sintered hard metals.** Diamond and related materials, 2002.

BENGA, G. C.; ABRAO, A. M. **Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools.** Journal of material processing technology, 2003.

BONANDI, M. **Estudo nas condições de corte no torneamento do aço AISI M4 endurecido, utilizando a metodologia de projeto de experimentos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Nove de Julho, São Paulo. 2012.

BOUACHA, K.; YALLESE, M. A.; MABROUKI, T.; RIGAL, J. F. **Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool.** International journal of refractory metals & hard materials, 2009.

CHINCHANIKAR, S.; CHOUDHURY, S. K. **Effect of work material hardness and cutting parameters on performance of coated carbide tool when turning hardened steel: An optimization approach.** Measurement, 2012.

CHINCHANIKAR, S.; CHOUDHURY, S. K. **Investigation on machinability aspects of hardened AISI 4340 steel at different levels of hardness using coated carbide tools.** International journal of refractory metals and hard materials, 2013.

COPPINI, N. L.; DINIZ, A. E.; BONANDI, M.; DE SOUZA, E. M.; BAPTISTA, E. A . **Hard turning of sintered cemented carbide parts: A shop floor experience.** Procedia, 2013.

COPPINI, N. L.; DE ROSA, D. B.; BAPTISTA, E. A.; SANTANA, J. C. C. **Determination of maximum efficiency interval for data collected during the milling of parts in manufacturing environment.** Universidade nove de julho, 2011.

DE GODOY, V. A. A.; DINIZ, A. E. **Turning of interrupted and continuous hardened steel surfaces using ceramic and CBN cutting tools.** Journal of material processing technology, 2011.

DE OLIVEIRA, A. J.; DINIZ, A. E.; URSOLINO, D. J. **Hard turning in continuous and interrupted cut with PCBN and whisker-reinforced cutting tools.** Journal of material processing technology, 2009.

DING, X.; LIEW, W. Y. H.; LIU, X. D. **Evaluation of machining performance of MMC with PCBN and PCD tools.** Wear, 2005.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** 8ª edição. São Paulo, Artliber editora, 2014.

FILHO, P. J. F. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas com aplicação arena.** 2ª edição. Visual books, 2008.

GALOPPI, G. S.; FILHO, M. S.; BATALHA, G. F. **Hard turning of tempered DIN 100Cr6 steel with coated and no coated CBN inserts.** Journal of materials processing technology, 2006.

GRZESIK, W.; WANAT, T. **Comparative assessment of surface roughness produced by hard machining with mixed ceramic tool includings 2D and 3D analysis**. Journal of materials processing technology, 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3685:1993 – Tool-life testing with single point turning tools**. 1993, 48p.

JIANG, W.; MALSHE, A. P.; GOFORTH, R. C. **Cubic boron nitride (CBN) based nanocomposite coatings on cutting inserts with chip breakers for hard turning applications**. Surface and coatings technology, 2005.

KAÇAL, A.; YILDIRIM, F. **High speed hard turning of AISI S1 (60WCrV8) Cold work tool steel**. Acta Polytechnica Hungarica, 2013.

KADIRGAMA, K.; HOSSEIN, K. A. A. E.; NOOR, M. M.; SHARMA, K. V.; MOHAMMAD, B. **Tool life and wear mechanism when machining hastelloy C-22HS**. Wear, 2010.

KULJANIC, E.; SORTINO, M.; TOTIS, G. **Machinability of difficult machining materials**. 14th International research - Trends in the development of machinery and associated technology, 2010.

LALWANI, D. I.; MEHTA, N. K.; JAIN, P. K. **Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel**. Journal of materials processing technology , 2008.

LANDI, D. **O mundo da usinagem**. São Paulo, Publicação da divisão Coromant da Sandvik do Brasil, 2002.

MORE, A. S.; JIANG, W.; BROWN, W. D.; MALSHE A. P. **Tool wear and machining performance of CBN-Ti coated carbide inserts and PCBN compact inserts in turning AISI 4340 hardened steel**. Journal of materials processing technology, 2006.

REAMADNA, M.; RIGAL, J. F. **Evolution during time of tool wear and cutting forces in the case of hard turning with CBN inserts.** Journal of material processing technology, 2006.

ROSA, D. B.; COPPINI, N. L.; BAPTISTA, E. A.; RAEL V. A. **Procedimento experimental em ambiente industrial visando a otimização do processo de fresamento.** 20º congresso internacional de engenharia mecânica, Gramado, RS, 2009.

SAHIN, Y.; MOTORCU, A. R. **Surface roughness model in machining hardened steel with cubic boron nitride cutting tool.** International journal of refractory metals & hard materials, 2007.

SAHOO, A. K.; ORRA, K.; ROUtra, B. C. **Application of response surface methodology on investigating flank wear in machining hardened steel using PVD TiN coated mixed ceramic insert.** International journal of industrial of engineering computations, 2013.

SAHOO, A. K.; SAHOO, B. **Experimental investigations on machinability aspects in finish hard turning of AISI 4340 steel using uncoated and multilayer coated carbide inserts.** Measurement, 2012.

SAHOO, A. K.; SAHOO, B. **Experimental investigation on flank wear and tool life, cost analysis and mathematical model in turning hardened steel using coated carbide inserts.** International journal of industrial of engineering computations, 2013.

SOUZA, A. M.; ETHUR, A. B. M.; LOPES, L. F. D.; ZANINI, R. R. **Introdução a projeto de experimentos.** Universidade de Santa Maria, 2002.

SURESH, R.; BASAVARAJAPPA, S.; GAITONDE, V. N.; SAMUEL, G. L. **Machinability investigations on hardened AISI 4340 steel using coated carbide insert.** International journal of refractory metals and hard materials, 2012.

## ANEXO 1 – Aresta de corte

Imagens obtidas por microscópio estereoscópico binocular.

### A1.1. Ensaaios Preliminares

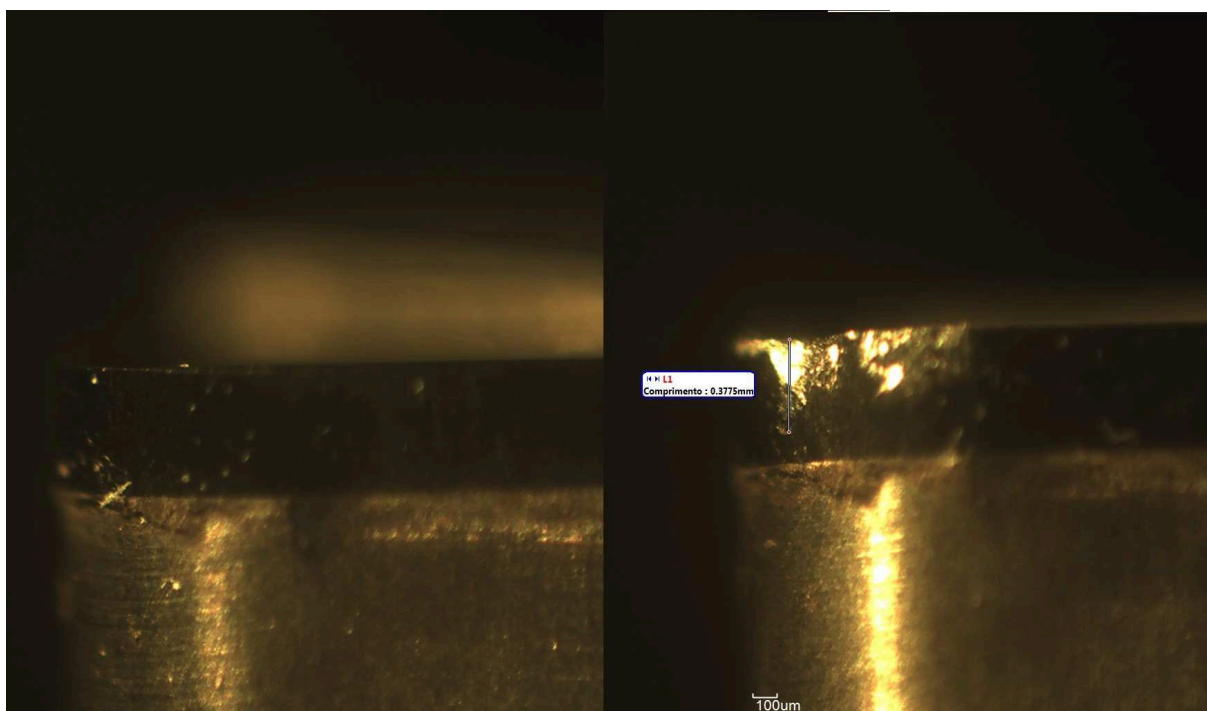


Figura 35 - ferramenta 1 antes e após usinar, apresentando desgaste de 0,3775mm (Fonte: elaborado pelo autor).



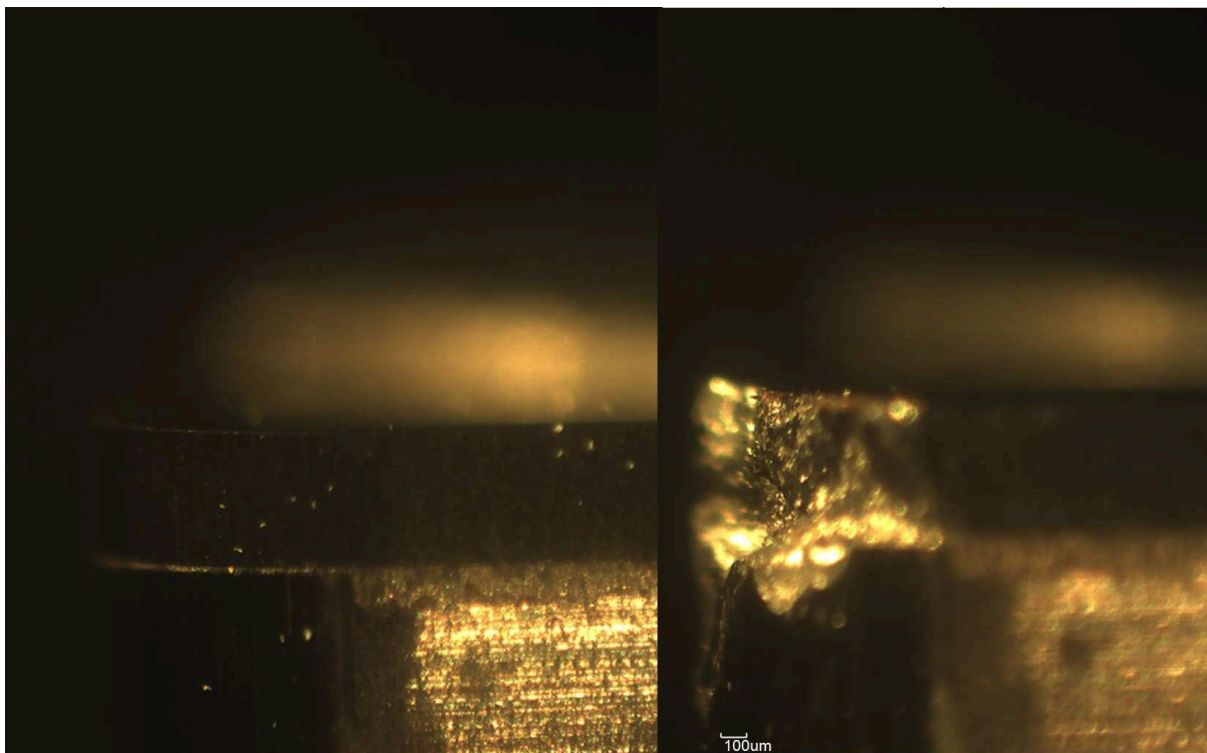


Figura 36 - ferramenta 2 antes e após usar, apresentando falha por quebra (Fonte: elaborado pelo autor).

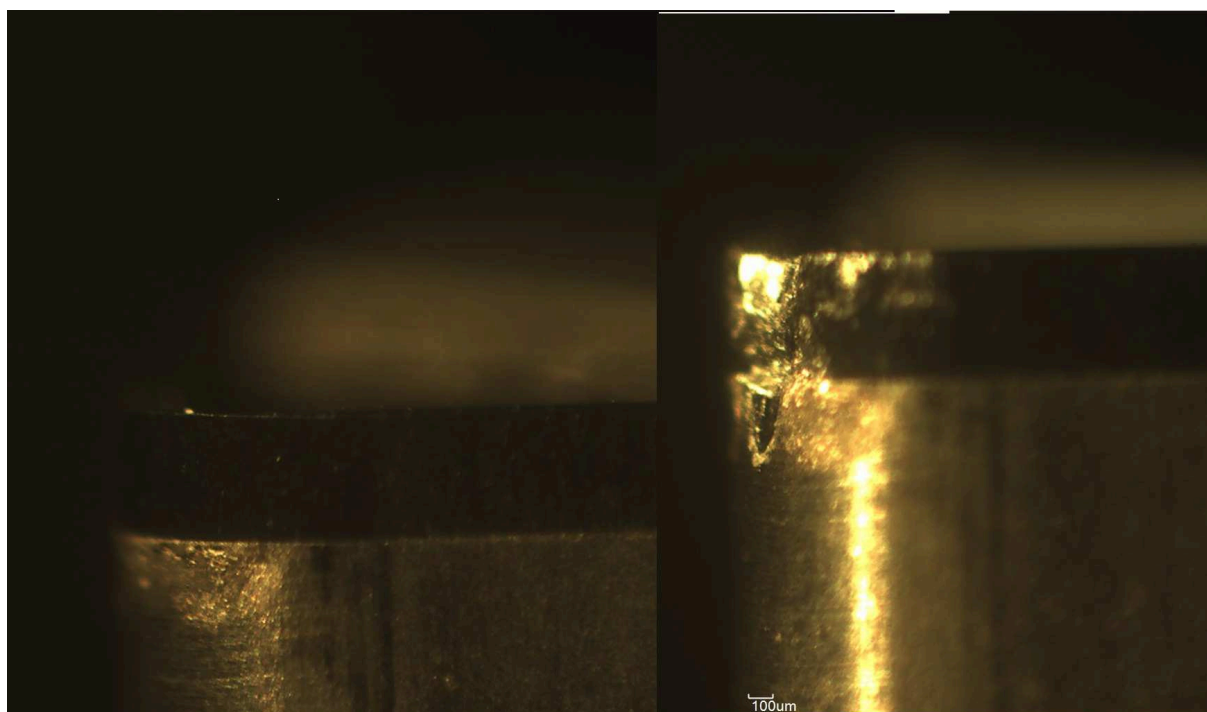


Figura 37 - ferramenta 3 antes e após usar, apresentando falha por quebra (Fonte: elaborado pelo autor).

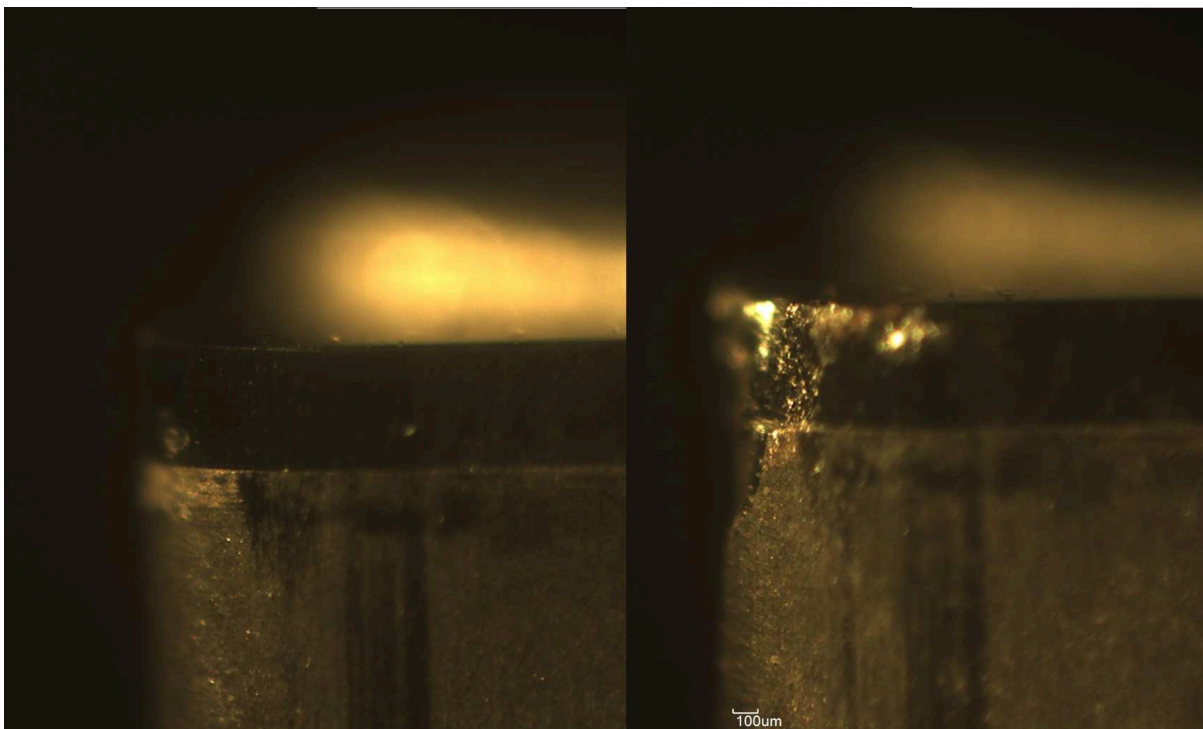


Figura 38 - ferramenta 4 antes e após usinar, apresentando falha por quebra (Fonte: elaborado pelo autor).

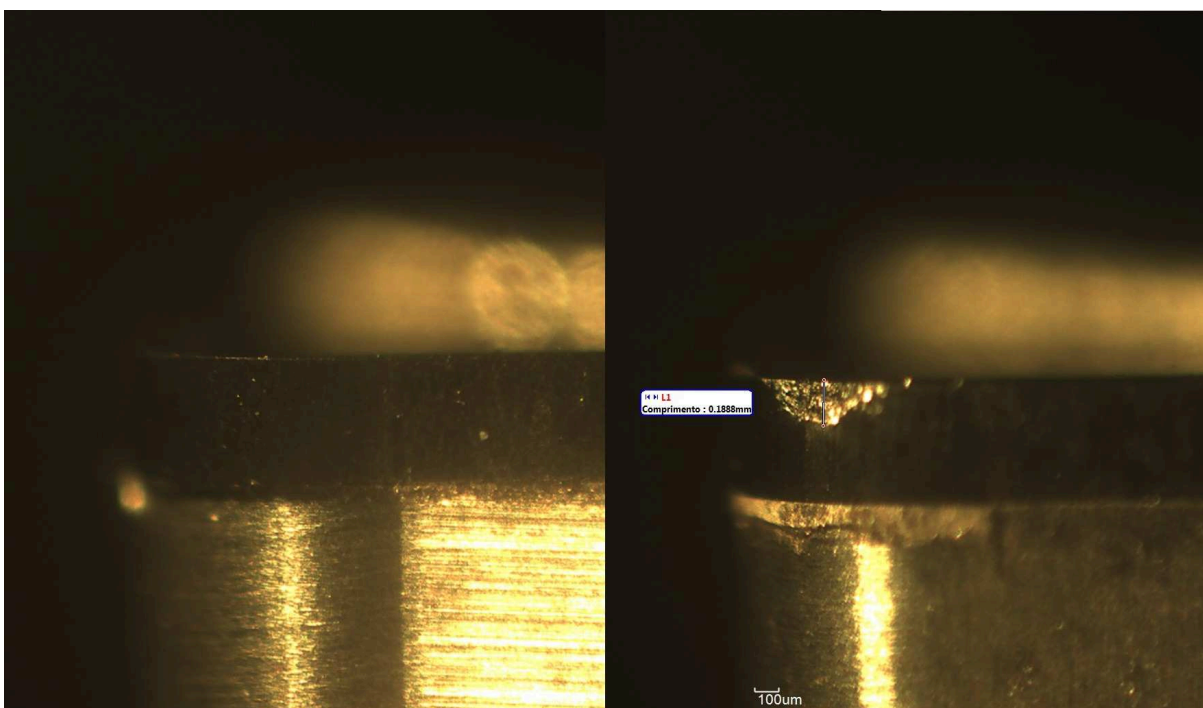


Figura 39 - ferramenta 5 antes e após usinar, apresentando desgaste de 0,1888mm (Fonte: elaborado pelo autor).

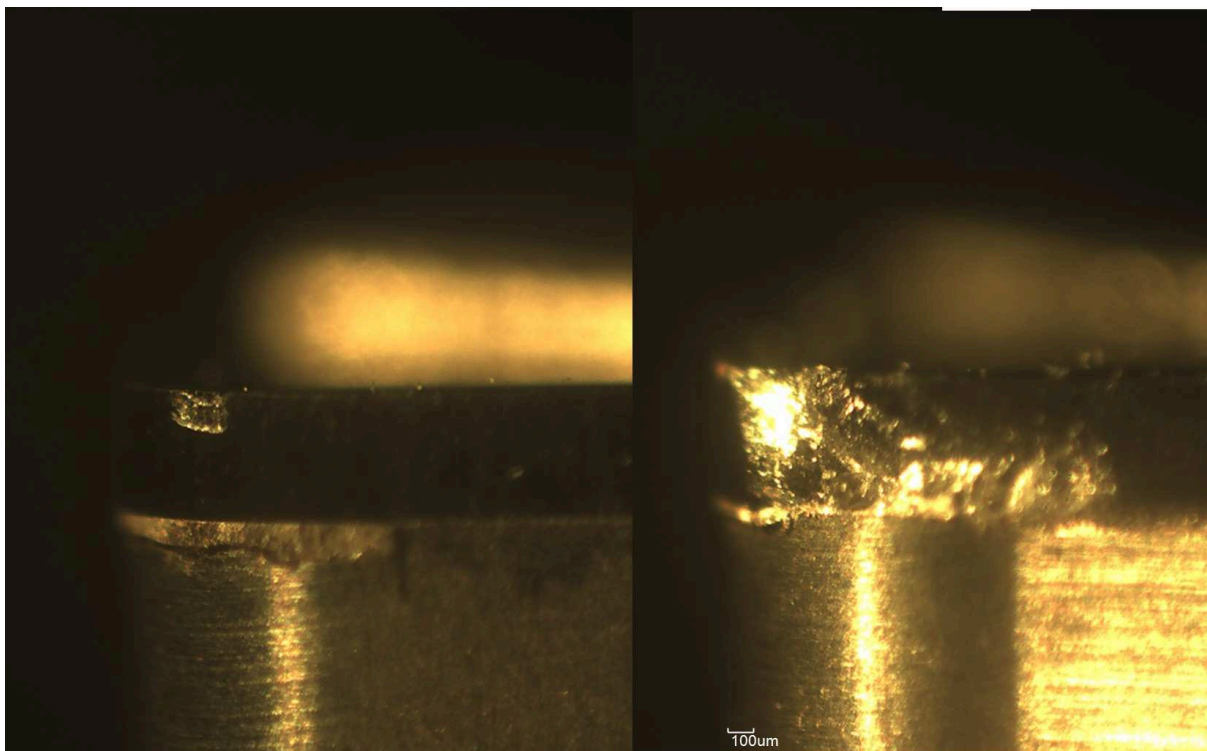


Figura 40 - ferramenta 6 antes e após usinar, apresentando falha por quebra (Fonte: elaborado pelo autor).

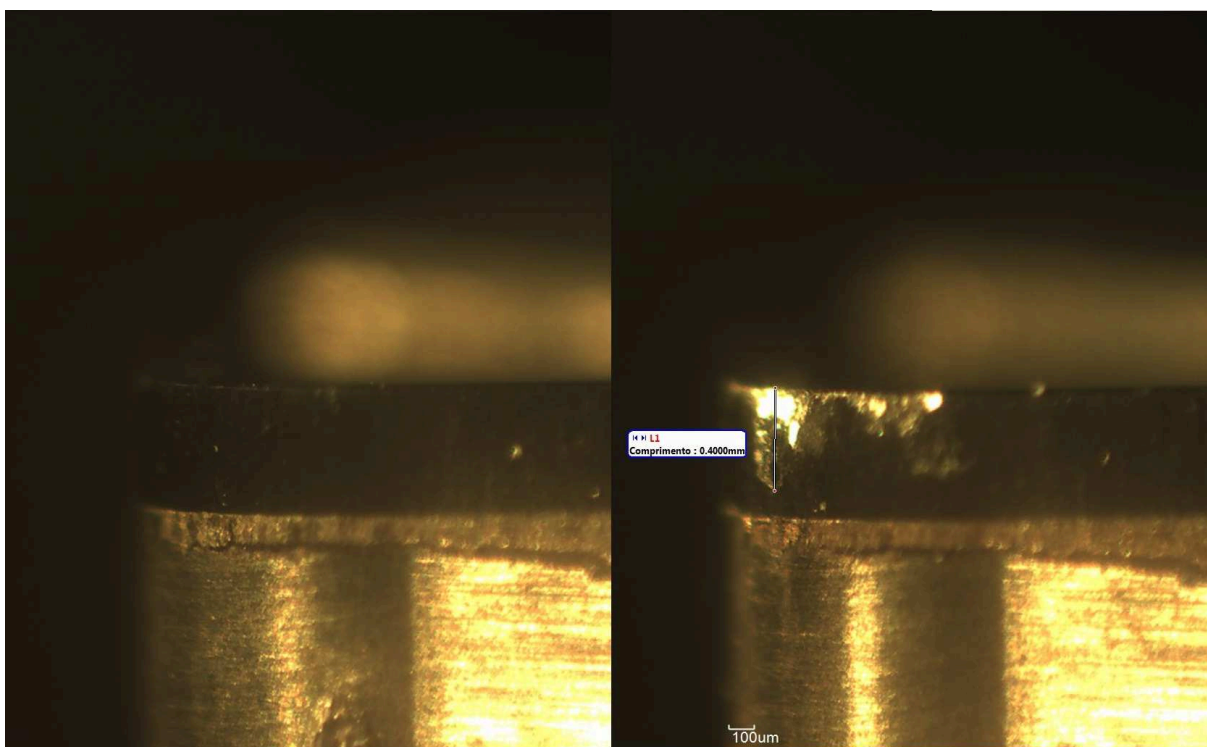


Figura 41 - ferramenta 7 antes e após usinar, apresentando desgaste de 0,4000mm (Fonte: elaborado pelo autor).

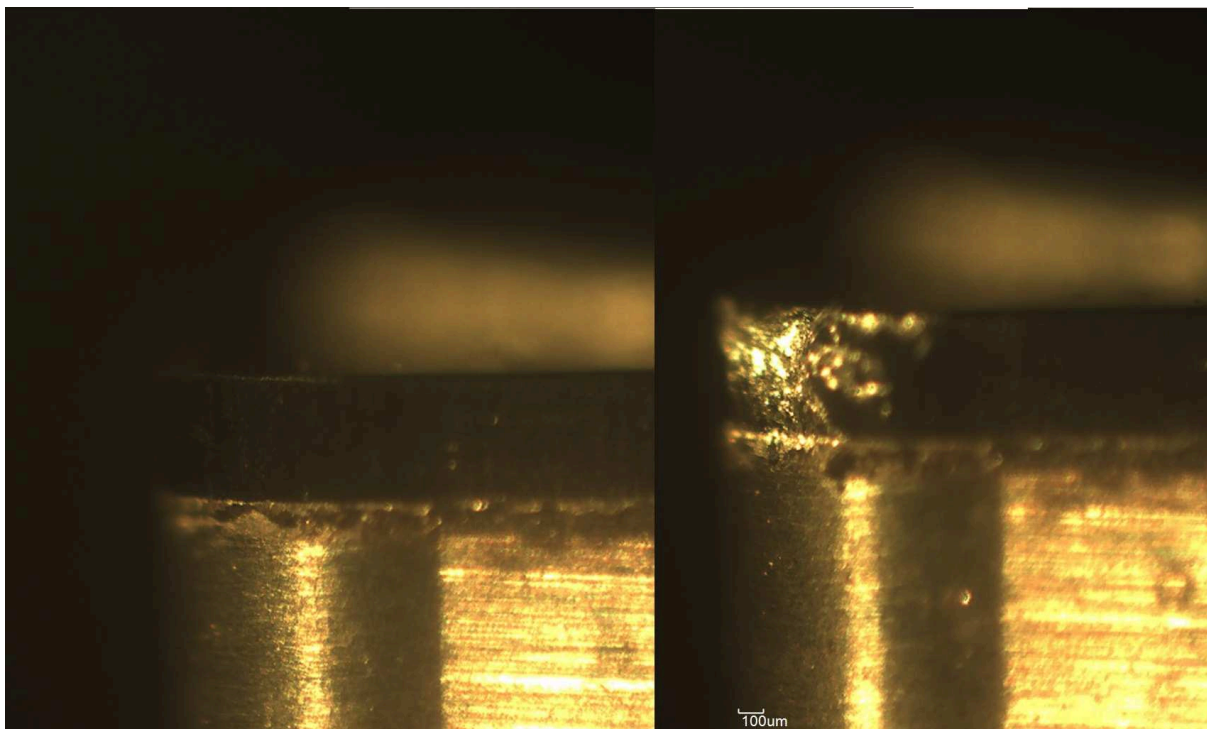


Figura 42 - ferramenta 8 antes e após usinar, apresentando falha por quebra (Fonte: elaborado pelo autor).

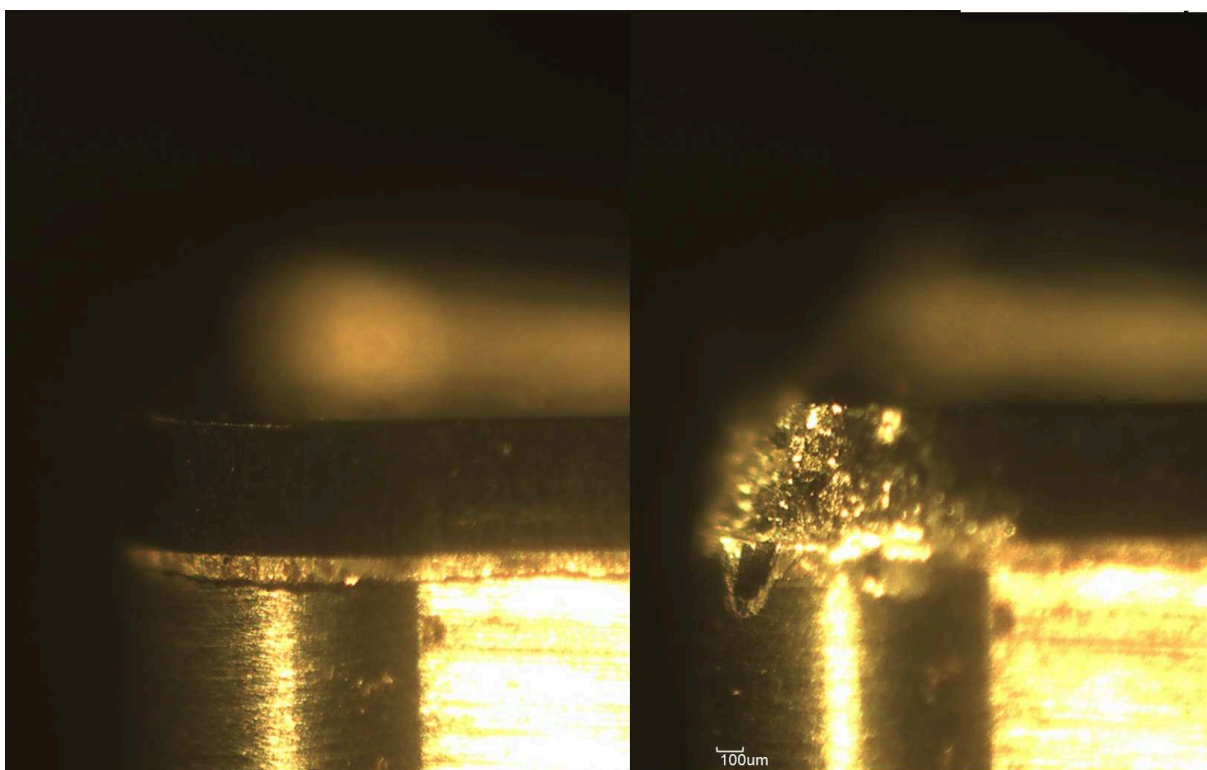


Figura 43 - ferramenta 9 antes e após usinar, apresentando falha por quebra (Fonte: elaborado pelo autor).

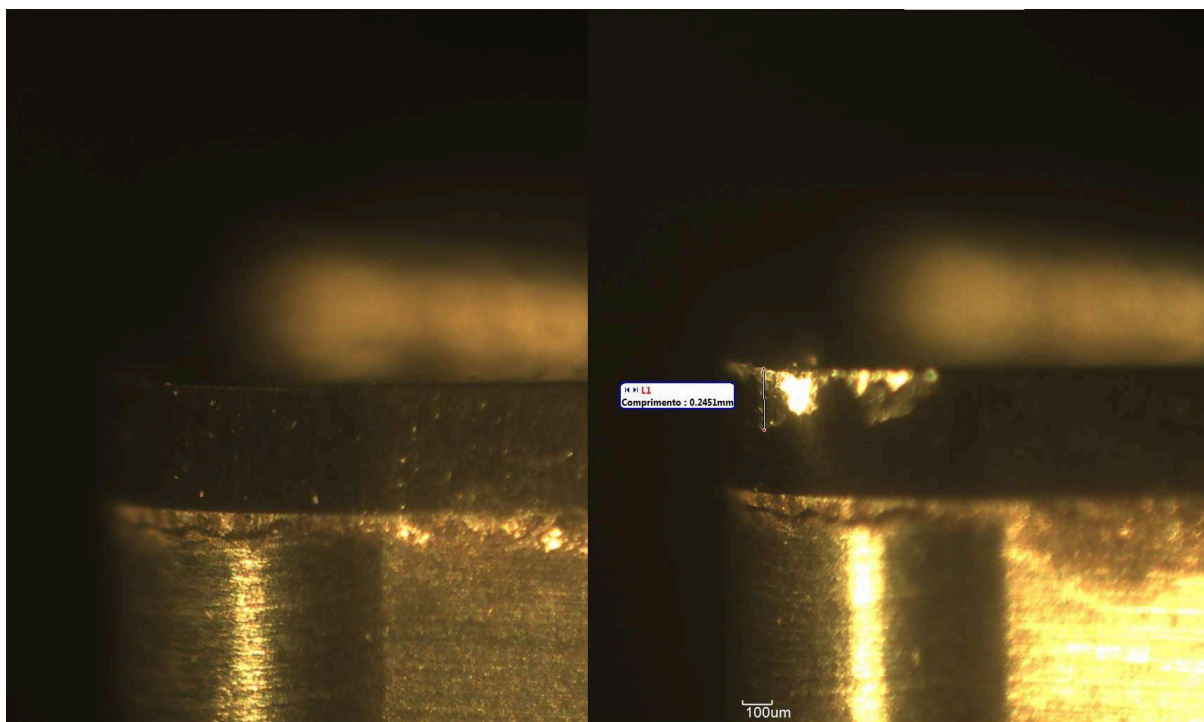


Figura 44 - ferramenta 10 antes e após usar, apresentando desgaste de 0,2451 mm (Fonte: elaborado pelo autor).

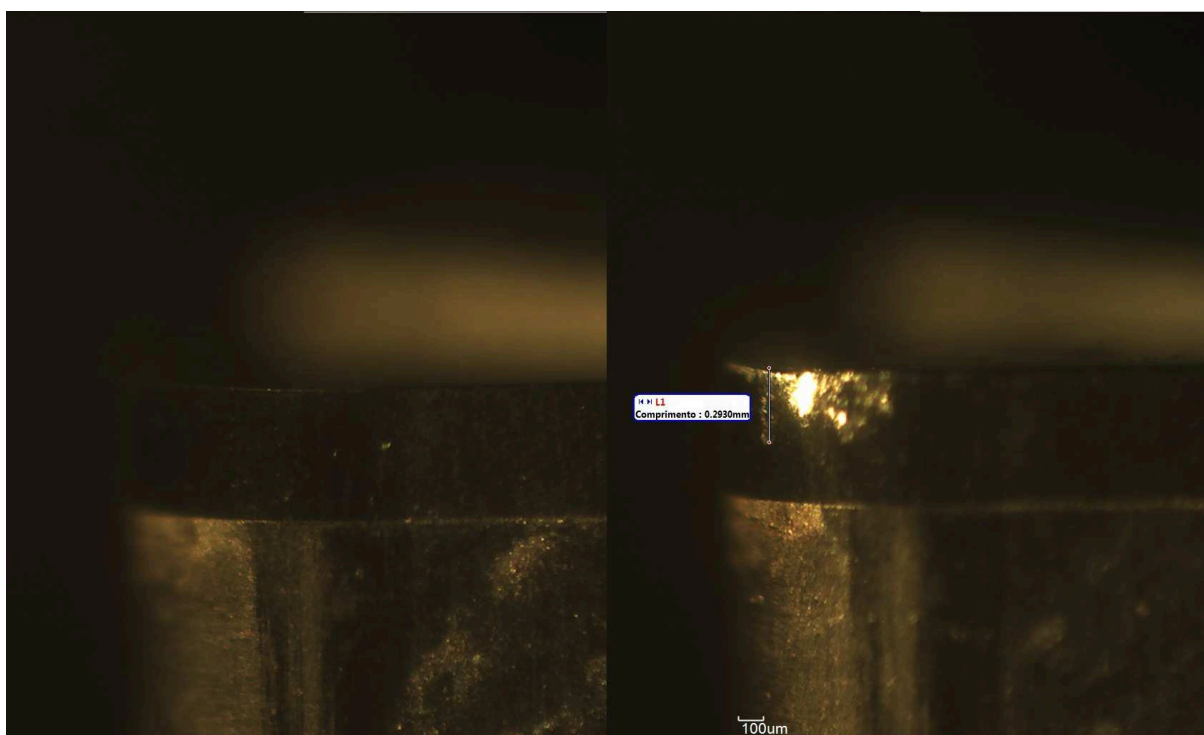


Figura 45 - ferramenta 11 antes e após usar, apresentando desgaste de 0,2930mm (Fonte: elaborado pelo autor).

## A1.2. Ensaio Finais

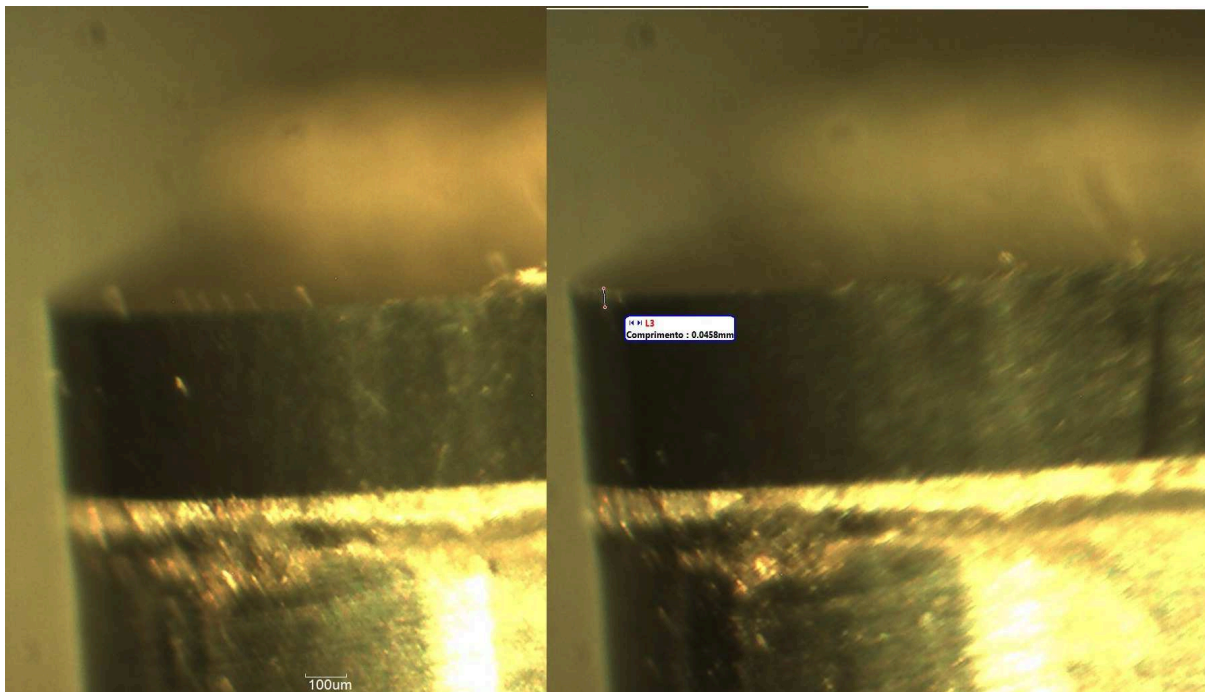


Figura 46 - ferramenta 1 antes e após usar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,0458mm (Fonte: elaborado pelo autor).

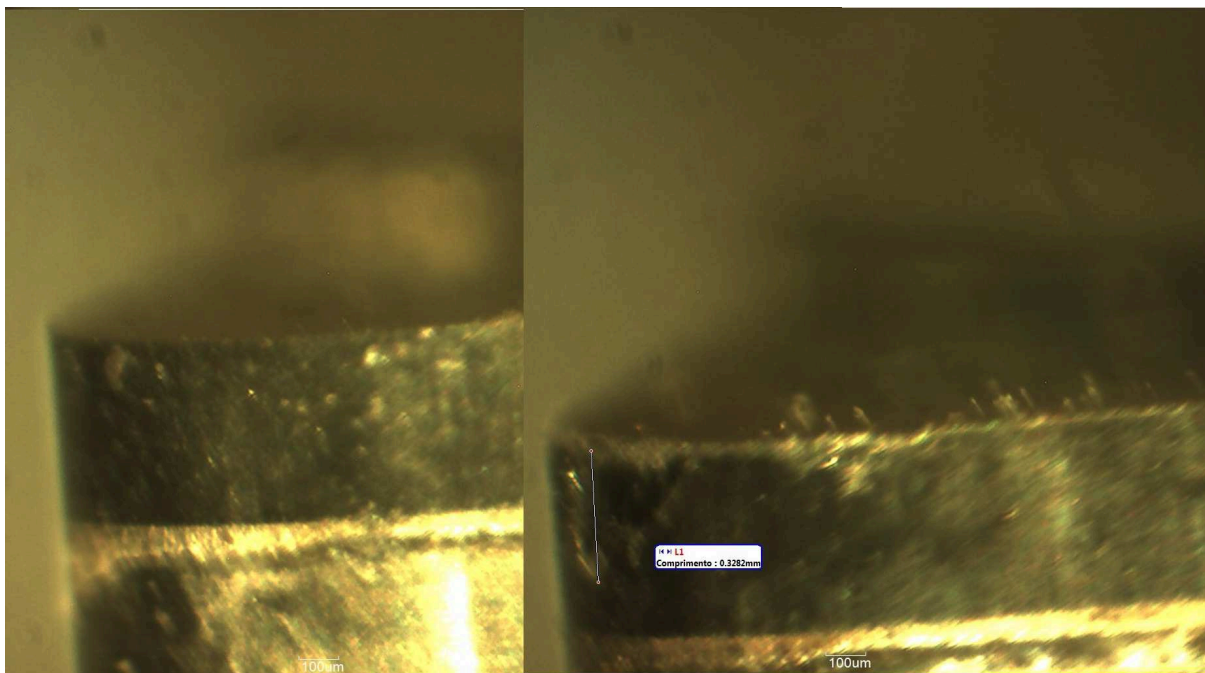


Figura 47 - ferramenta 2 antes e após usar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,3282mm (Fonte: elaborado pelo autor).

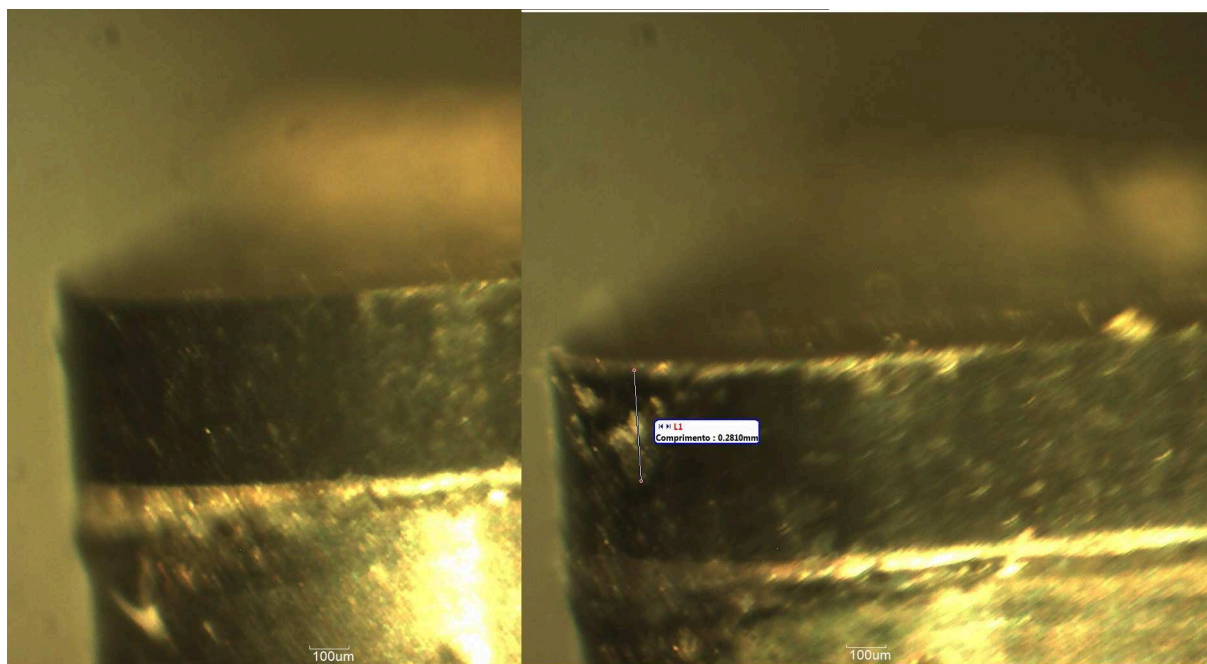


Figura 48 - ferramenta 3 antes e após usar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,2810mm (Fonte: elaborado pelo autor).

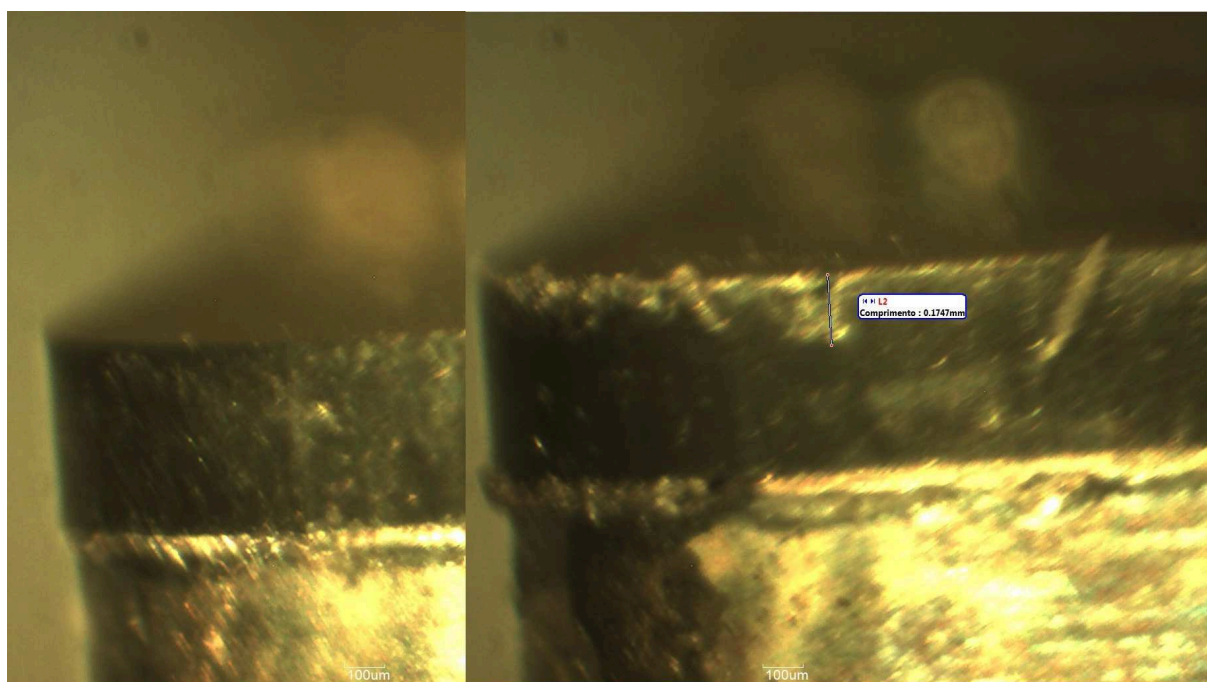


Figura 49 - ferramenta 4 antes e após usar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,1747mm (Fonte: elaborado pelo autor).

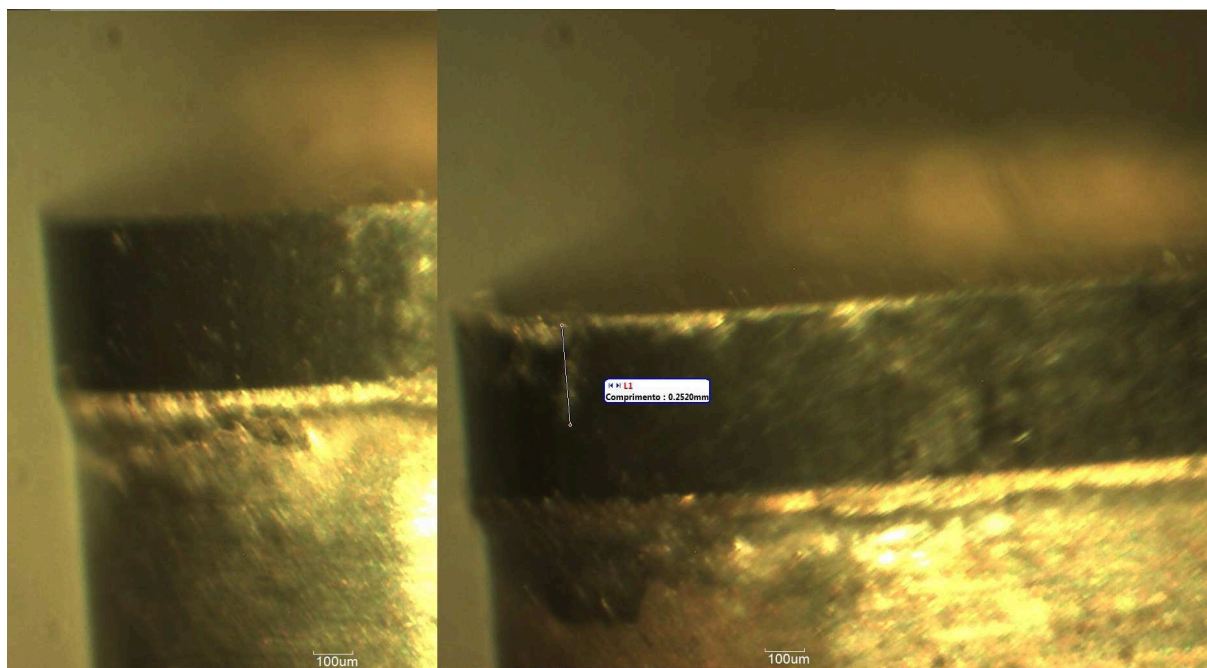


Figura 50 - ferramenta 5 antes e após usar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,2520mm (Fonte: elaborado pelo autor).

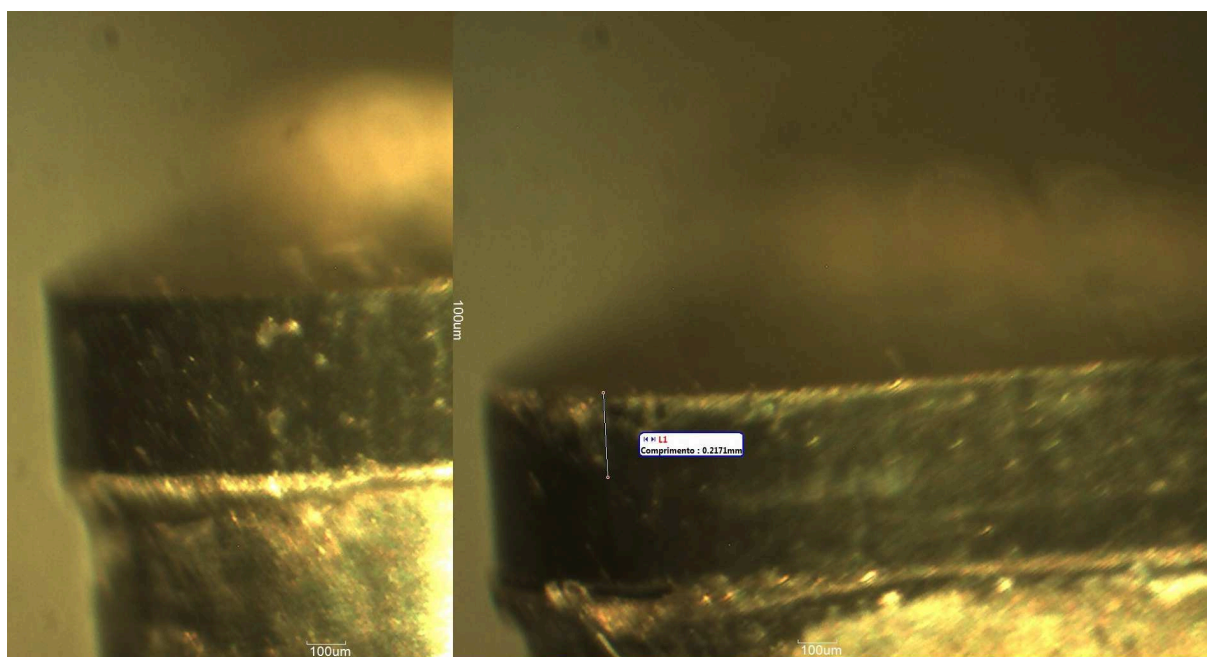


Figura 51 - ferramenta 6 antes e após usar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,2171mm (Fonte: elaborado pelo autor).



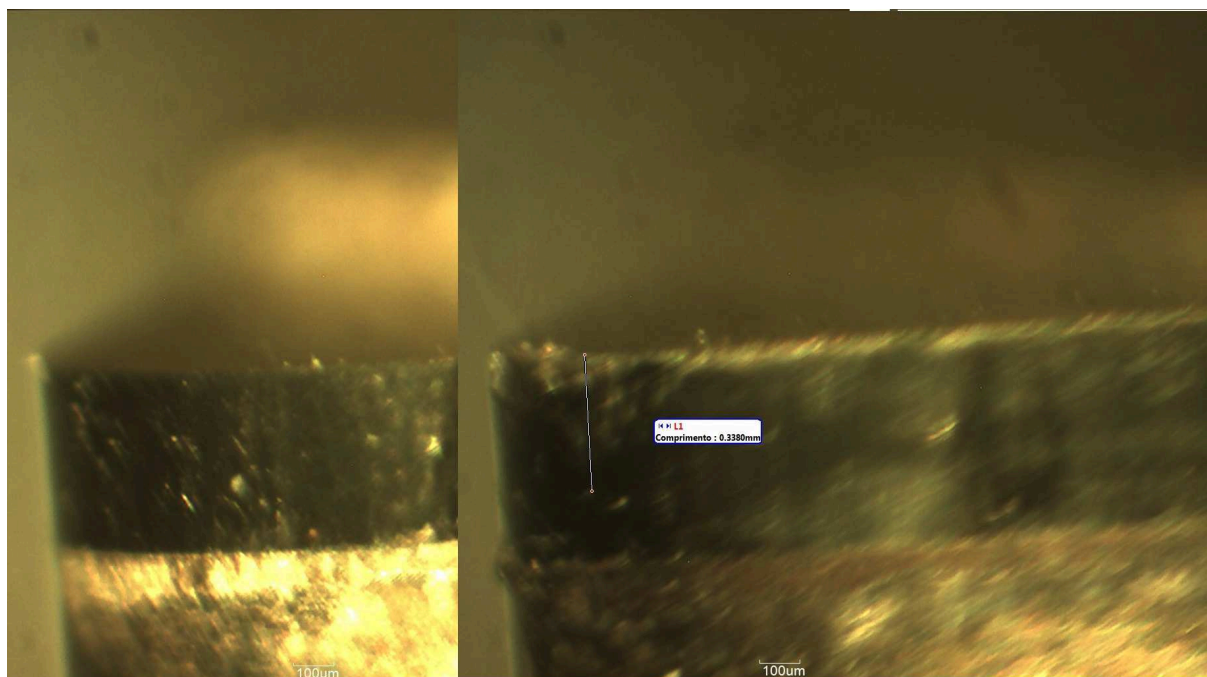


Figura 52 - ferramenta 7 antes e após usar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,3380mm (Fonte: elaborado pelo autor).

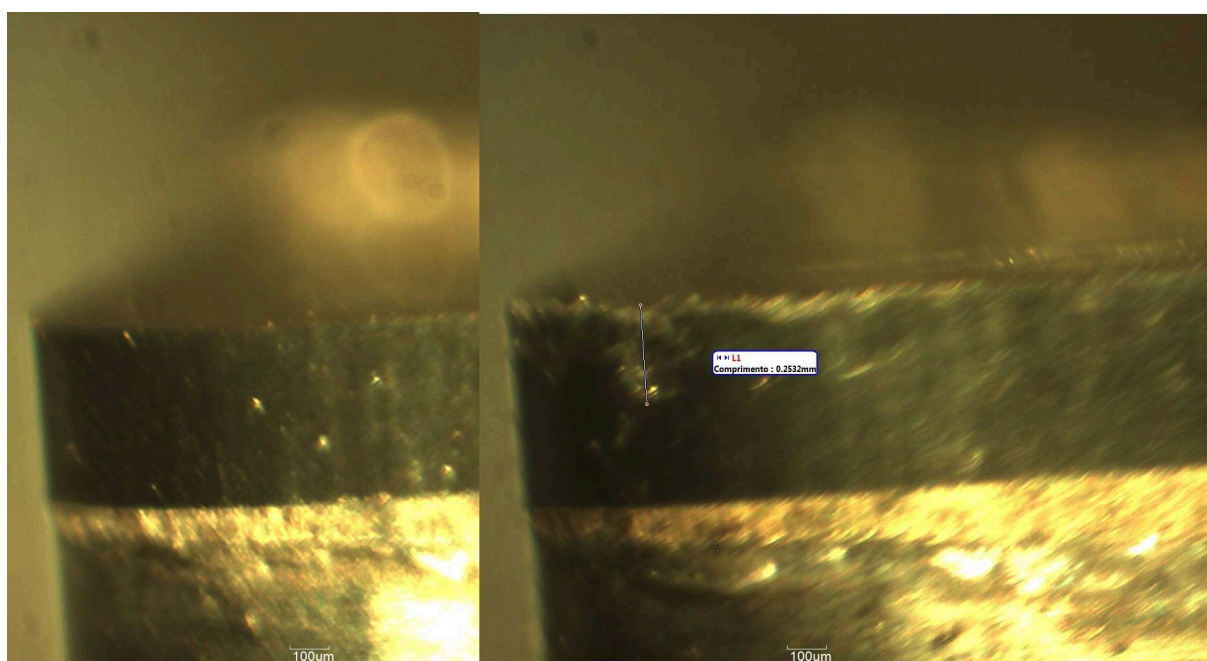


Figura 53 - ferramenta 8 antes e após usar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,2532mm (Fonte: elaborado pelo autor).

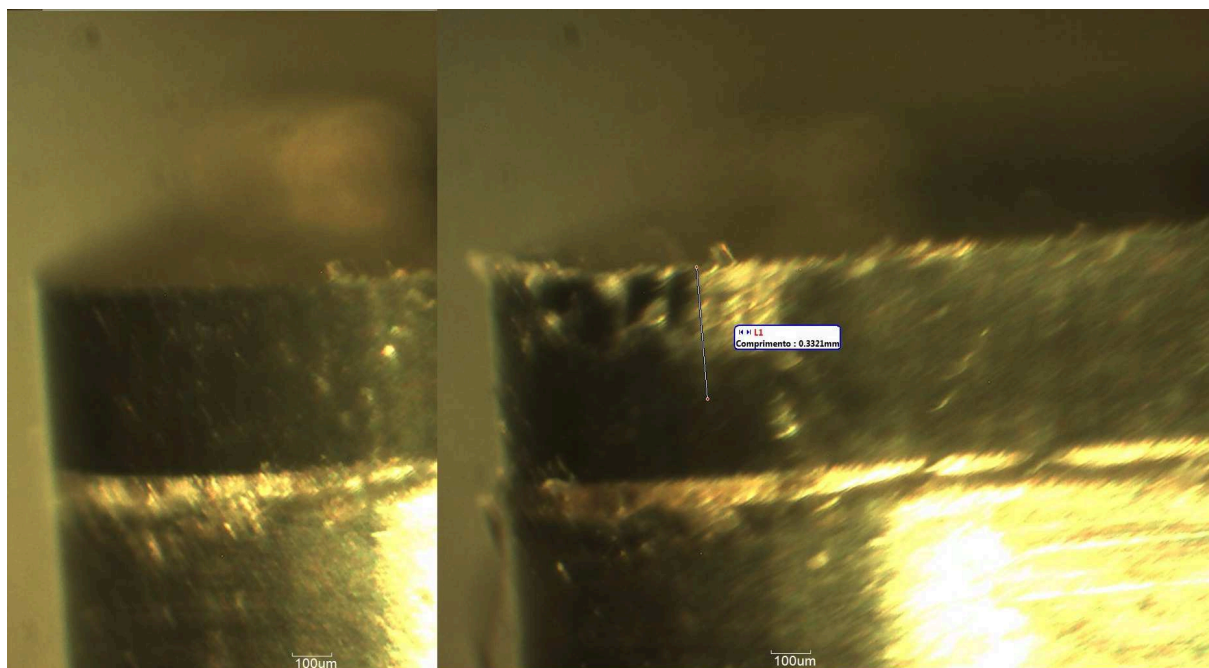


Figura 54 - ferramenta 9 antes e após usinar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,3321mm (Fonte: elaborado pelo autor).

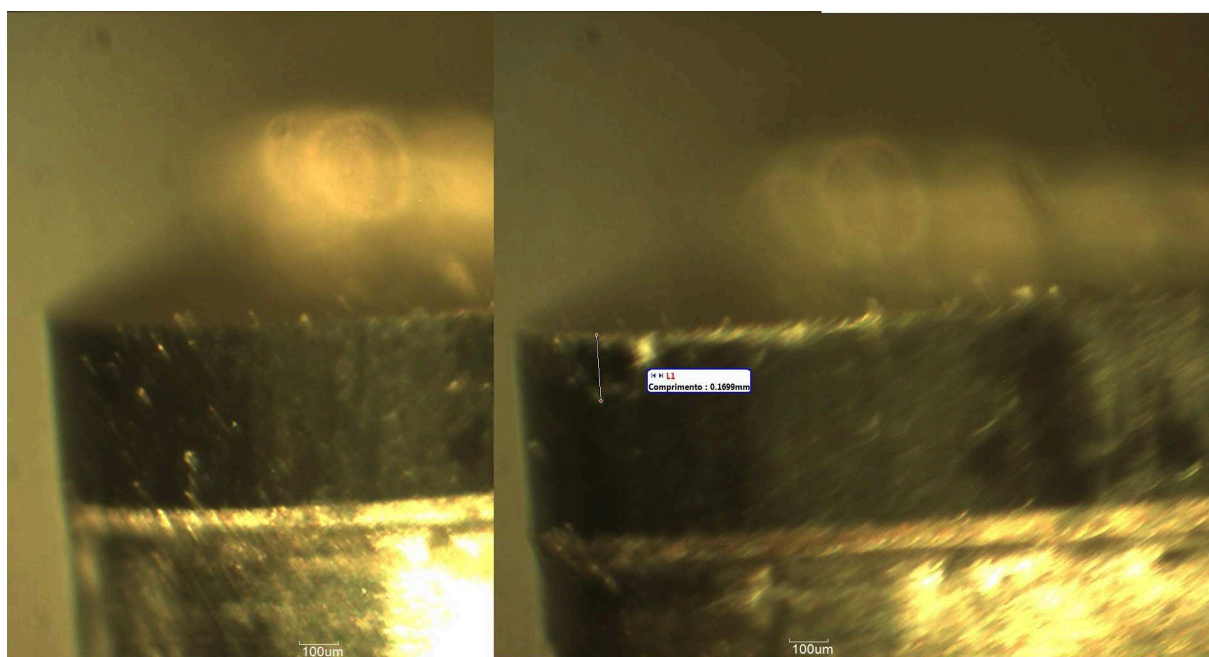


Figura 55 - ferramenta 10 antes e após usinar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,1699mm (Fonte: elaborado pelo autor).

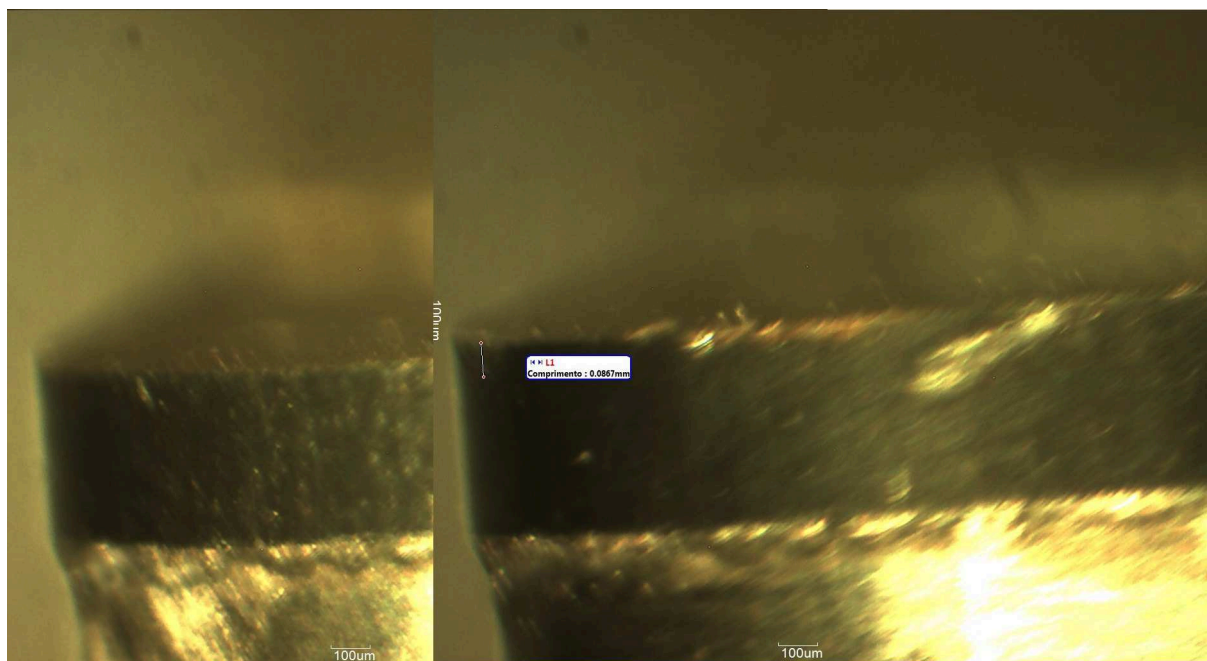


Figura 56 - ferramenta 11 antes e após usinar no passe antes da falha por quebra, apresentando desgaste de 0,0867mm (Fonte: elaborado pelo autor).

## ANEXO 2 – Foto micrografia

Neste anexo são apresentadas as micrografias de diversos corpos de prova que sofreram quebras ou não.

### A2.1. Ensaios Preliminares

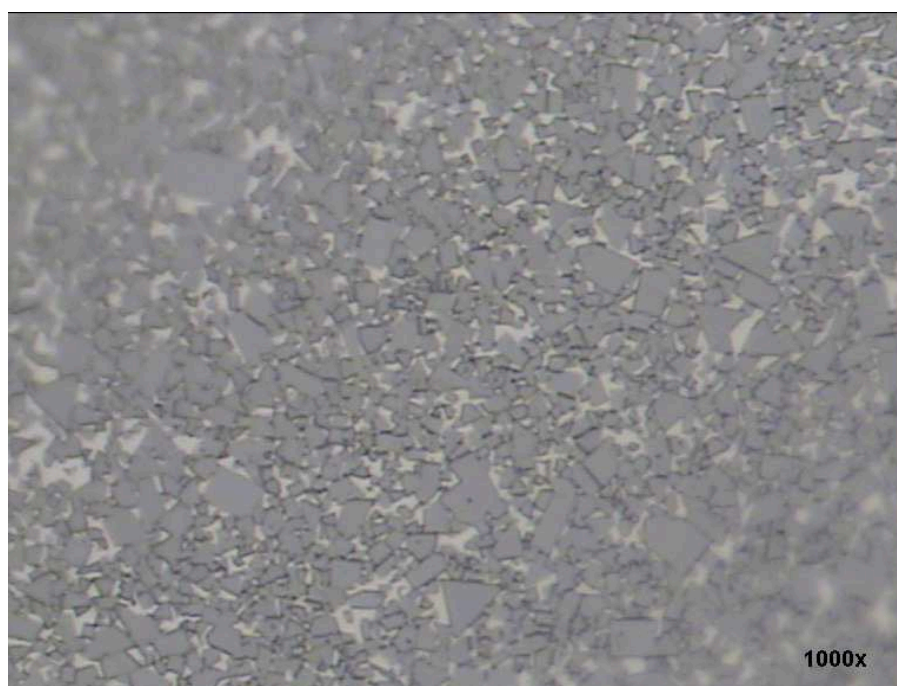


Figura 57 - Foto micrografia obtida com microscópio trinocular do corpo de prova 2 (Fonte: elaborado pelo autor).

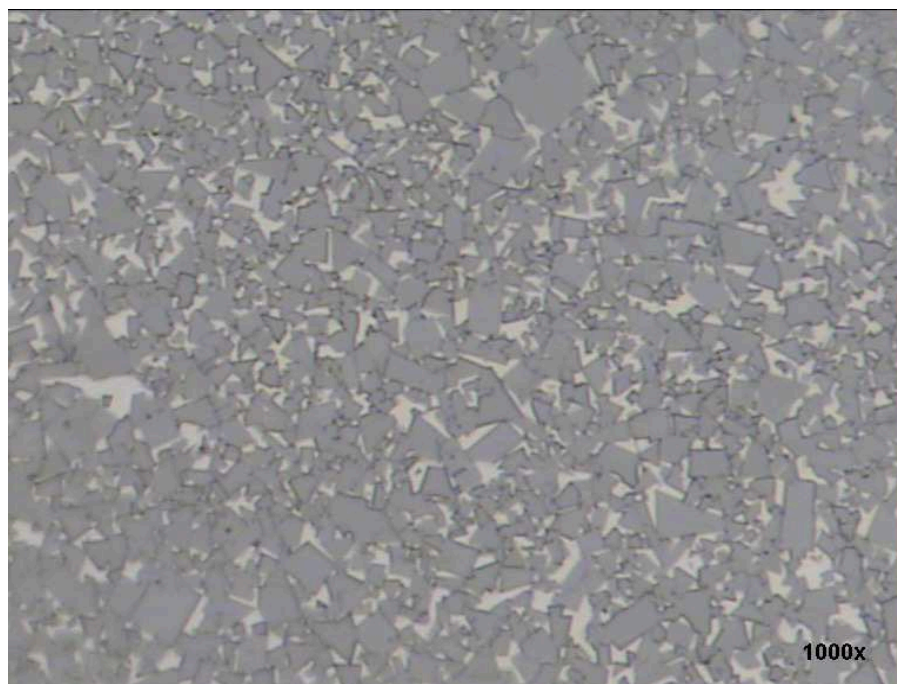


Figura 58 - Foto micrografia obtida com microscópio trinocular do corpo de prova 3 (Fonte: elaborado pelo autor).

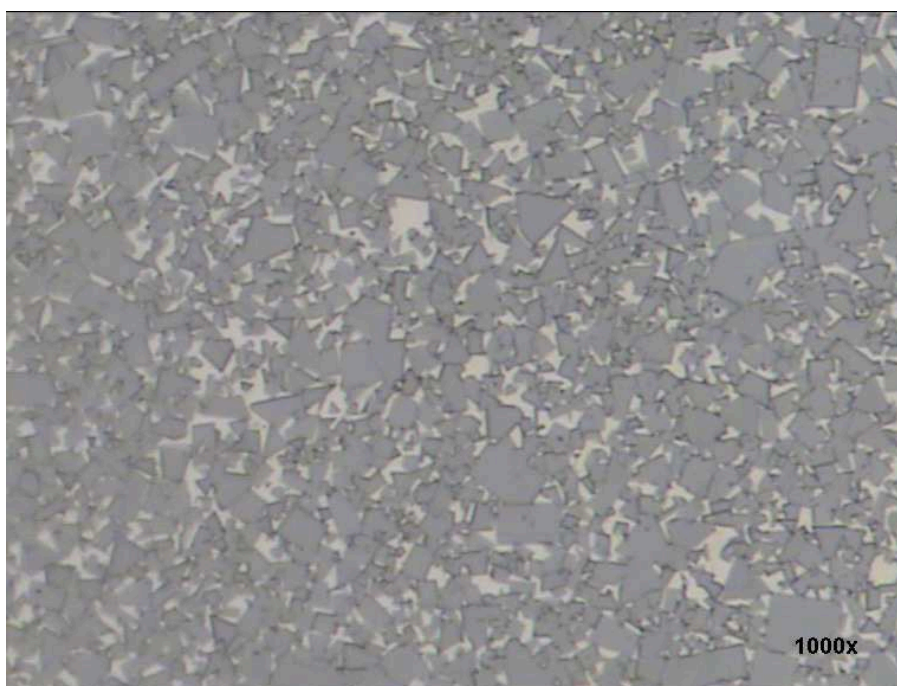


Figura 59 - Foto micrografia obtida com microscópio trinocular do corpo de prova 4 (Fonte: elaborado pelo autor).

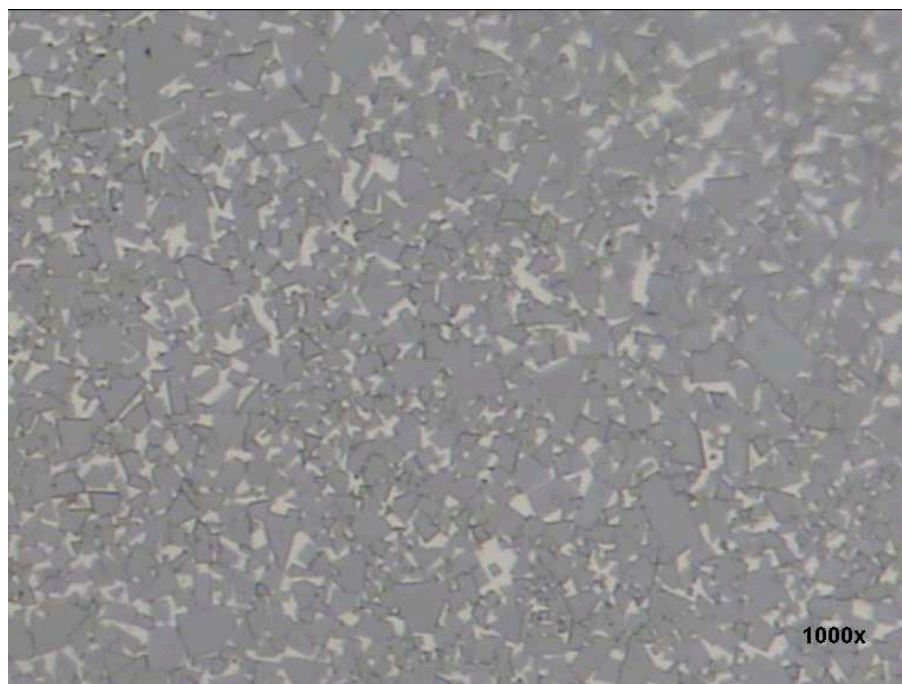


Figura 60 - Foto micrografia obtida com microscópio trinocular do corpo de prova 6 (Fonte: elaborado pelo autor).

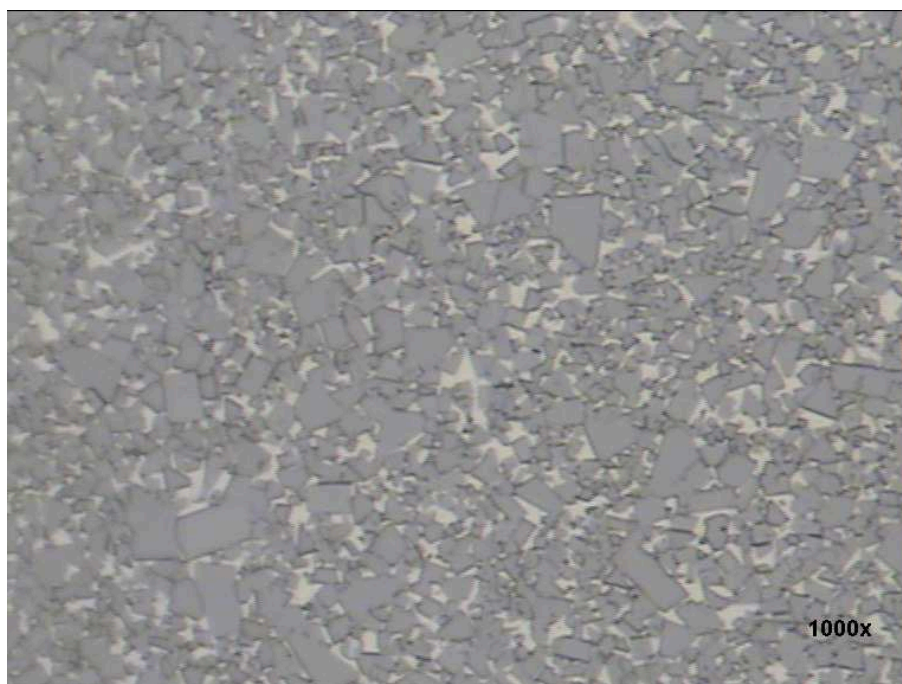


Figura 61 - Foto micrografia obtida com microscópio trinocular do corpo de prova 7 (Fonte: elaborado pelo autor).

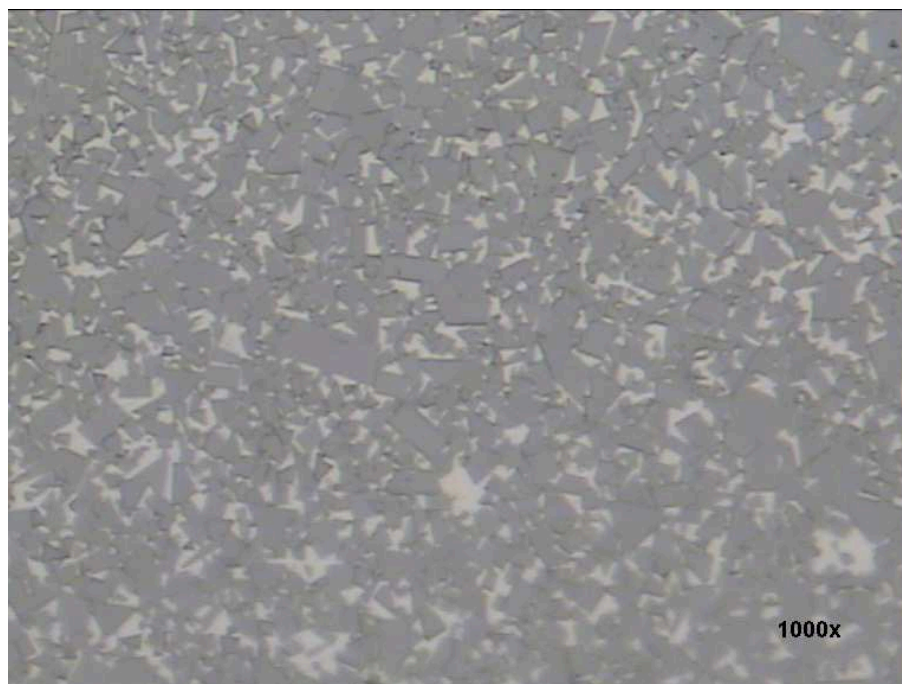


Figura 62 - Foto micrografia obtida com microscópio trinocular do corpo de prova 8 (Fonte: elaborado pelo autor).

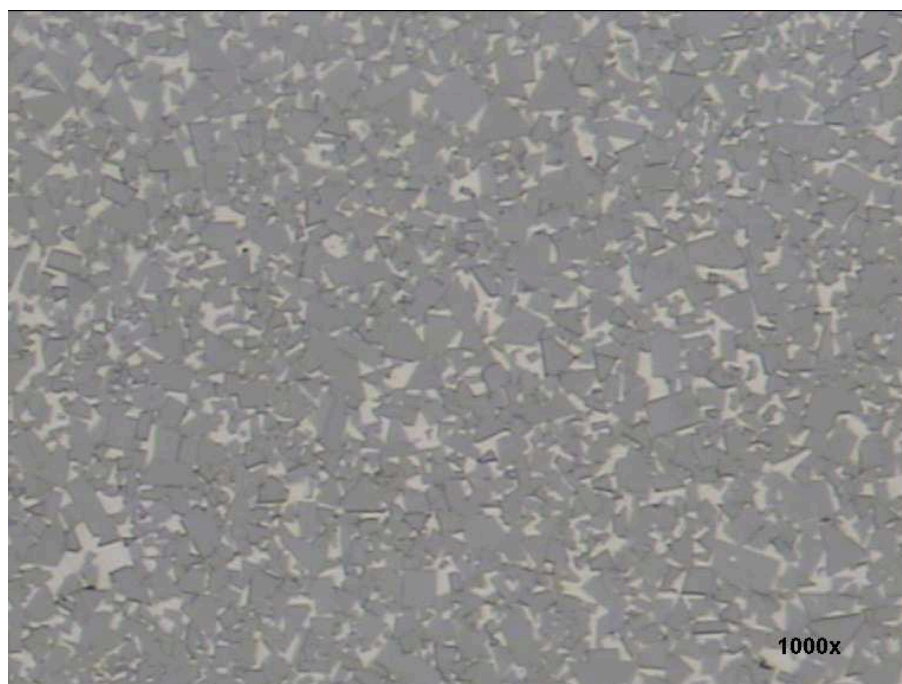


Figura 63 - Foto micrografia obtida com microscópio trinocular do corpo de prova 9 (Fonte: elaborado pelo autor).