

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

ANTONIO WOLSKI

MARIO CEZAR SOUZA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE REVESTIMENTOS APLICADOS
POR PVD NA VIDA ÚTIL DE BROCAS CANHÃO E HELICOIDAIS
DE METAL DURO EM PROCESSO DE FURAÇÃO DE FERRO
FUNDIDO E ALUMÍNIO EM CONDIÇÕES REAIS DE PROCESSO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(Tcc 2)

CURITIBA

2015

ANTONIO WOLSKI
MARIO CEZAR DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE REVESTIMENTOS APLICADOS
POR PVD NA VIDA ÚTIL DE BROCAS CANHÃO E HELICOIDAIS
DE METAL DURO EM PROCESSO DE FURAÇÃO DE FERRO
FUNDIDO E ALUMÍNIO EM CONDIÇÕES REAIS DE PROCESSO**

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

Orientador: Prof. Rodrigo Lupinacci Villanova

CURITIBA

2015

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a Proposta de Projeto de Pesquisa “ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE REVESTIMENTOS APLICADOS POR PVD NA VIDA ÚTIL DE BROCAS CANHÃO E HELICOIDAIS DE METAL DURO EM PROCESSO DE FURAÇÃO DE FERRO FUNDIDO E ALUMÍNIO EM CONDIÇÕES REAIS DE PROCESSO”, realizada pelos alunos ANTONIO WOLSKI e MARIO CEZAR SOUZA DE OLIVEIRA, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Rodrigo Lupinacci Villanova
UTFPR - Damec
Orientador

Prof. Dr. Ricardo Fernando do Reis
UTFPR - Damec
Avaliador

Prof. Dr. Eduardo Matos Germer
UTFPR - Damec
Avaliador

Curitiba, 08 de junho de 2015.

RESUMO

Nos processos de usinagem utilizam-se ferramentas de materiais apropriados para suportarem altas temperaturas e esforços mecânicos, e, por isso, elas possuem preços elevados. Com o intuito de aumentar a vida útil das ferramentas sem elevar muito seu preço, são utilizados revestimentos que apresentam características mecânicas melhores que o material de base, ou seja, melhores que ferramentas sem revestimento. O presente trabalho teve como objetivo comparar a vida útil de brocas helicoidais escalonadas e canhão, em condições reais de processo de usinagem, sem revestimento e com revestimento, na usinagem de alumínio AA C355 e ferro fundido cinzento SAE G3000. Após os testes realizados foi possível selecionar a opção econômica mais viável para empresa. Para a broca que usinou o ferro fundido (broca escalonada) a escolha do revestimento *Firex*, resultando um aumento na vida de 67%, enquanto que com o revestimento *Pertura* o aumento foi de 65% e o revestimento *Alcrona* de apenas 6%. Visto que o revestimento *Firex* e *Pertura* tem aumentos na vida similares o fator decisivo foi o custo de cada um, sendo o *Firex* de menor custo. E para a broca de usinagem do alumínio (broca canhão) o revestimento *Balinit C* foi o único utilizado, mas mostrou um aumento na vida da ferramenta de 95%, se mostrando uma escolha economicamente viável para substituir a usinagem sem nenhum tipo de revestimento, gerando uma economia final significativa.

Palavras-chave: usinagem, broca, revestimento, ferro fundido, alumínio.

ABSTRACT

Cutting tools are made of materials able to withstand high temperatures and high mechanical loads and, because of that, their prices are elevated. In order to increase their lifetime without increasing their costs significantly, coatings with better mechanical characteristics than the base materials are generally used. The aim of the present work is to compare the lifetime of stepped twist drills and gun drills with and without PVD coatings in the drilling process of AA C355 aluminum alloy and SAE G3000 gray cast iron in real machining process conditions. After the tests, it was possible to determine the most economical choice considering the tested coatings. In the case of gray cast iron, which is machined using the stepped twist drill, the results showed that the Firex coating increased the tool life in 67%, while Pertura and Alcrona coatings yielded 65% and 6% life increase, respectively. In terms of costs, Firex coating has lower cost than Pertura, being the most economical choice in this case. Considering the gun drills used to machine aluminum, the Balinit C coating improved the tool life in 95%, leading to significant savings when compared to the uncoated drill.

Keywords: machining, drill, finish, cast iron, aluminum.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Furação em Cheio.....	14
Figura 2.2 - Furação Escalonada	15
Figura 2.3 - Partes de uma Broca Helicoidal.....	16
Figura 2.4 - Partes de uma Broca Helicoidal Escalonada	18
Figura 2.5- Partes de uma Broca Canhão.....	18
Figura 2.6– Desgaste de Flanco	28
Figura 3.1 – Desenho da broca canhão de diâmetro 11,3 utilizada na furação do cabeçote.....	30
Figura 3.2 – Furos de junção do cabeçote com bloco.....	30
Figura 3.3 – Cabeçote de furação utilizado na usinagem dos furos de junção do cabeçote com o bloco.	31
Figura 3.4 – Desenho da broca helicoidal escalonada de diâmetros de 13,2 mm e 9,2mm.	32
Figura 3.5- Furos de junção do bloco com o cárter.	32
Figura 3.6 - Cabeçote de furação utilizado na usinagem dos furos de junção do bloco com o cárter.	33
Figura 4.1 Imagem do desgaste da guia lateral da broca sem revestimento à uma vida de 13000 peças usinadas.....	39
Figura 4.2 Imagem do desgaste da aresta de corte da broca sem revestimento à uma vida de 13000 peças usinadas.....	40
Figura 4.3 Imagem superior do desgaste das arestas de corte da broca sem revestimento à uma vida de 13000 peças usinadas.	40
Figura 4.4 Imagem do desgaste da guia lateral da broca com revestimento <i>Balinit C</i> à uma vida de 25400 peças usinadas.....	41
Figura 4.5 Imagem do desgaste da aresta de corte da broca com revestimento <i>Balinit C</i> à uma vida de 25400 peças usinadas.	41

Figura 4.6 Imagem superior do desgaste das arestas de corte da broca com revestimento <i>Balinit C</i> à uma vida de 25400 peças usinadas.	42
Figura 4.7 – Imagem superior do desgaste das arestas de corte da broca helicoidal com revestimento <i>Alcrona</i> a uma vida de 3200 peças usinadas.....	44
Figura 4.8 – Imagem lateral do desgaste da aresta de corte da broca helicoidal com revestimento <i>Alcrona</i> a uma vida de 3200 peças usinadas.	44
Figura 4.9 - Imagem superior do desgaste das arestas de corte da broca helicoidal com revestimento <i>Pertura</i> a uma vida de 4950 peças usinadas.....	45
Figura 4.10 - Imagem lateral do desgaste da aresta de corte da broca helicoidal com revestimento <i>Pertura</i> a uma vida de 4950 peças usinadas.....	45
Figura 4.11 - Imagem superior do desgaste das arestas de corte da broca helicoidal com revestimento <i>Firex</i> a uma vida de 5000 peças usinadas.....	46
Figura 4.12 - Imagem lateral do desgaste das arestas de corte da broca helicoidal com revestimento <i>Firex</i> a uma vida de 5000 peças usinadas.....	46
Figura 4.13- Gráfico comparativo do Custo por Peça devido ao consumo de ferramenta para cada tipo de ferramenta/revestimento.	47
Figura 4.14 - Gráfico comparativo do Custo por Peça devido à troca de ferramenta para cada tipo de ferramenta/revestimento.....	49
Figura 4.15 - Gráfico comparativo do Custo por Peça Total devido à troca de ferramenta para cada tipo de ferramenta/revestimento	50
Figura 4.16 – Gráfico comparativo da redução d custo por peça para cada tipo de revestimento utilizado.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de Brocas Helicoidais	17
Tabela 2 – Revestimentos oferecidos pela empresa Oerlikon Balzers S/A para a realização dos testes. (OERLIKON 2014)	35
Tabela 3 – Propriedades do revestimento <i>Firex</i>	36
Tabela 4 – Parâmetros de corte utilizados nos testes.	36
Tabela 5 - Desdobramento dos custos por peça devido ao consumo de ferramenta por ferramenta/revestimento	47
Tabela 6 - Desdobramento dos custos por peça devido à parada de máquina por ferramenta/revestimento	48
Tabela 7 - Custo por peça total por ferramenta/revestimento	49
Tabela 8 – Resumo dos resultados	51

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

α – Ângulo de Ponta

γ – Ângulo de Hélice

CNC – Comando Numérico Computadorizado

CMM – Centro de Medições Metrológicas CPP – Custo de Ferramenta por Peça Usinada

CPP-troca – Custo de Máquina Parada para Troca de Ferramenta por Peça Usinada

CVD – Chemical Vapor Deposition

Funcex – Fundação Centro de Estudos do Comércio Exterior

Ilafa – Instituto Latino Americano de Ferro e Aço

NbC – Carboneto de Níbio

PIB – Produto Interno Bruto

PVD – Physical Vapor Deposition (Processo Físico de Deposição por Vapor)

TiC – Carboneto de Titânio

TaC – Carboneto de Tântalo

WC – Carboneto de Tungstênio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Contexto do Tema	11
1.2	Caracterização do Problema	11
1.3	Objetivos	12
1.4	Justificativa	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Processos de usinagem	14
2.2	Processo de furação	14
2.2.1	Tipos de brocas	15
2.2.2	Material usinado X Tipos de brocas	19
2.3	Materiais utilizados em ferramentas de corte	19
2.4	Tipos de revestimento	21
2.4.1	Metais duros com revestimento	21
2.5	Revestimentos em PVD	24
2.6	Usinabilidade dos materiais	26
2.7	Determinação da Vida de Ferramentas	27
2.7.1	Desgaste Frontal	27
2.8	Análise Financeira	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	Critérios e seleção das brocas a serem testadas	29
3.2	Materiais usinados	33
3.3	Revestimentos utilizados	34
3.4	Parâmetros de corte e condições de usinagem	36
3.5	Descrição da Metodologia	37
3.6	Critério de determinação da vida útil das brocas	37
4	RESULTADOS	39
4.1	Resultado obtido com o revestimento Balinit C nas brocas canhão	39
4.2	Resultado obtido com os revestimentos Alcrona e Pertura nas brocas helicoidais	43
4.3	Análise da viabilidade econômica dos revestimentos	47
5	DIFICULDADES ENCONTRADAS	52
	CONCLUSÕES	54
	REFERÊNCIAS	57
	ANEXO I medição da rugosidade dos furos do cabeçote usinados com broca canhão sem revestimento – 1ª peça	58
	ANEXO II medição da rugosidade dos furos do cabeçote usinados com broca canhão com revestimento – 1ª peça	61
	ANEXO III medição da rugosidade dos furos do cabeçote usinados com broca canhão sem revestimento – última peça (peça nº12400)	64
	ANEXO IV medição da rugosidade dos furos do cabeçote usinados com broca canhão com revestimento – última peça (peça nº 25400)	67

1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho é dedicada atenção ao processo de furação em cabeçotes de alumínio e blocos de motor de ferro fundido com a utilização de brocas sem e com revestimentos PVD (Physical Vapor Deposition). A seguir é descrito sucintamente como se desenvolve o processo de furação, os diversos tipos de materiais usinados, materiais utilizados nas brocas e tipos de revestimentos e sua influência no processo.

1.1 Contexto do Tema

A indústria tem grande participação na geração de riquezas no Brasil. Segundo a revista Exame (2012), o Produto Interno Bruto da economia brasileira em 2012 foi de 4, 403 trilhões de reais. De toda a riqueza produzida, 22% correspondem à participação da indústria, ou seja, 983,4 bilhões de reais.

Em 2010, a participação da indústria metalmeccânica do Brasil (grande consumidor de aço na fabricação de bens, máquinas e equipamentos) em relação ao Produto Interno Bruto (PIB) foi de 15,8%, segundo levantamento da Fundação Centro de Estudos do Comércio Exterior (Funcex), patrocinado pelo Instituto Latino Americano de Ferro e Aço (Ilafa) e divulgado em Metalmeccânica (2011).

Na indústria metal mecânica, os processos de usinagem são amplamente utilizados em diversos setores, tais como o automotivo, o naval, o aeroespacial, eletrônico, e de eletrodomésticos. Para realizar esses processos, diversas máquinas necessitam serem utilizadas, como tornos, fresadoras, retíficas, furadeiras, mandriladoras, entre outras. Essas máquinas, por sua vez, utilizam ferramentas com geometrias e materiais especiais, que são consumidas em grande quantidade (FERRARESI, 1972).

1.2 Caracterização do Problema

Na produção industrial, dentro dos processos de usinagem, o custo das ferramentas de corte e os demais custos relacionados ao “setup” (tempo em que máquina fica parada durante a troca de ferramenta, por exemplo), correspondem à grande parte dos custos de produção.

O aumento da vida útil das ferramentas, em qualquer processo de usinagem, pode gerar grandes economias, tornando o processo mais eficiente, mais barato e, em consequência, mais rentável e competitivo.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é a avaliação da viabilidade técnica e econômica da utilização de revestimentos PVD em brocas utilizadas em processos de furação de cabeçotes de alumínio e blocos de motor de ferro fundido.

Para tanto, serão avaliados dois tipos de revestimento para cada situação, totalizando quatro condições diferentes, e serão feitos estudos comparativos da vida útil e do custo de cada revestimento em relação à vida das brocas atualmente utilizadas no processo, ou seja, sem revestimento.

1.4 Justificativa

O aumento da vida útil acarreta na menor frequência de troca das brocas (setups) e menor gasto com ferramentas.

A diminuição dos *setups* pode trazer outros ganhos, entre eles o aumento da disponibilidade de máquina, tendo em vista que a troca de ferramentas se faz com a máquina parada e nem sempre a troca se faz automaticamente, ou seja, necessita-se de uma pessoa para realizar a troca. Em alguns casos, quando a ferramenta é de difícil acesso, ou possui alguma outra peculiaridade, o tempo de troca pode ser significativo em relação à eficiência da máquina, impactando severamente na produtividade da linha e/ou fábrica. Outros fatores inerentes aos *setups* são as falhas causadas durante a parada ou no *restart* da máquina, por diversos fatores, sejam eles relacionados ao método utilizado ou às características mecânicas do equipamento, podendo gerar problemas de não qualidade nas primeiras peças usinadas e necessidade de intervenção da equipe de manutenção, impactando na produtividade, qualidade e custos de manutenção.

Com a realização de testes de diferentes tipos de revestimentos em brocas em processo real de usinagem, obtém-se informação sobre o ganho na vida útil da ferramenta em cada caso. Conhecendo-se os ganhos na vida útil e o custo dos revestimentos, podem-se realizar estudos de viabilidade técnica e econômica, informações úteis para auxiliar na escolha do tipo de revestimento mais adequado

para o processo em que estão, ou se não há vantagem em utilizar revestimentos. Em alguns casos, nos quais os preços das ferramentas são muito altos e os revestimentos são eficientes e não muito caros, pode-se conseguir ganhos significativos em custos de processo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Processos de usinagem

O termo usinagem compreende todo o processo mecânico no qual uma peça é submetida a um processo de remoção de material. Isso ocorre com o auxílio de máquinas e ferramentas específicas para cada operação (FERRARESI, 1972).

Os processos de usinagem são amplamente utilizados na indústria mecânica, como a automotiva, a naval, a aeroespacial, a eletrônica, a de eletrodomésticos. Para realizar esses processos muitas máquinas necessitam ser utilizadas como, tornos, fresadoras, retificadoras, furadeiras, mandriladoras, entre outras. Essas máquinas começaram inteiramente manuais, mas o mais comum de se encontrar na indústria são as máquinas CNC, de comando computadorizado (FERRARESI, 1972).

Para a continuidade deste trabalho o foco será dado no processo de furação.

2.2 Processo de furação

O processo de furação destina-se a obter um furo geralmente cilíndrico em uma peça. Para isso a peça, ou a ferramenta, se desloca coincidentemente ou paralelamente ao eixo principal da máquina (STEMMER, 1995).

Dentre os processos de furação, o escopo do trabalho está focado nos seguintes processos de furação:

Furação em Cheio:

Destina-se a obter um furo cilíndrico na peça, conforme mostrado na Figura 2.1.

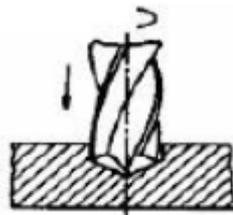


Figura 2.1 - Furação em Cheio

Fonte: Stemmer (1995)

Furação Escalonada:

Destina-se a obter um furo com dois ou mais diâmetros, simultaneamente, conforme mostrado na Figura 2.2.

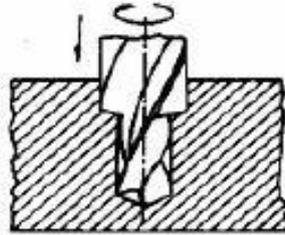


Figura 2.2 - Furação Escalonada

Fonte: Stemmer (1995)

Para a abertura de furos empregam-se ferramentas denominadas de brocas. Durante a furação, devem-se levar em consideração alguns fatores, como diâmetro de furo, profundidade, tolerâncias de forma e medida, e volumes de produção. As operações de furação se realizam sempre sob condições relativamente severas, pois a velocidade de corte varia de zero no centro da broca até o máximo na extremidade. Além disso, o fluido de corte que atua como refrigerante e lubrificante e auxilia na remoção de cavacos, chega com dificuldade no gume da ferramenta, onde é mais necessário (STEMMER, 1995).

2.2.1 Tipos de brocas

Para efetuar os processos de furação existe uma diversidade de brocas, entre elas brocas chatas, brocas helicoidais, brocas canhão, brocas ocas e outras (STEMMER, 1995). Para a continuidade deste trabalho serão exploradas as características das brocas helicoidais escalonadas e das brocas canhão, que serão as brocas utilizadas no escopo desse trabalho.

Brocas Helicoidais:

São as ferramentas mais utilizadas na execução de furos. Um exemplo de broca helicoidal e suas principais partes podem ser mostrados na Figura 2.3.

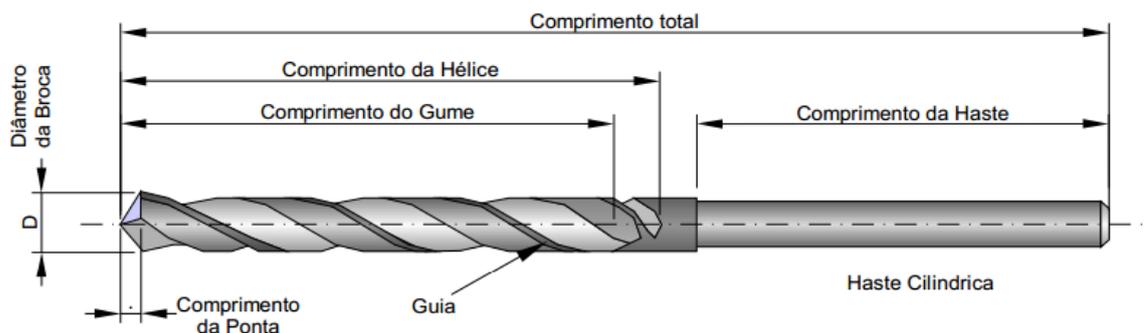


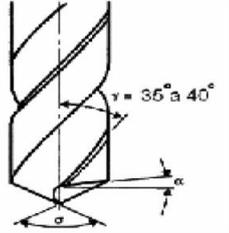
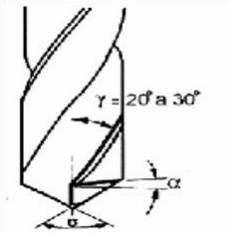
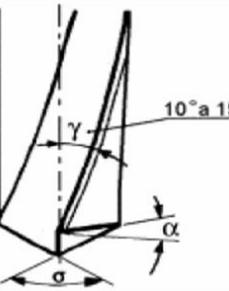
Figura 2.3 - Partes de uma Broca Helicoidal
Fonte: Stemmer (1995)

Algumas características importantes a serem ressaltadas:

- Canais Helicoidais: destinados a criar espaço para a remoção de cavacos.
- Dois gumes principais: é a parte da broca que de fato remove material, uma característica é que se vistos de frente esses gumes são paralelos, e se vistos de lado formam entre si o chamado ângulo de ponta, que varia conforme o material a ser usinado.
- Gume Transversal: situa-se na ponta da broca, liga entre si os dois gumes principais. É a região da broca responsável por aproximadamente 40 a 65% da força de avanço.
- Guias e Nervuras: constituem a parte sólida da broca, servem para reduzir atrito da broca com o furo.
- Haste: para a fixação da broca na máquina.
- Ângulo da ponta – ângulo formado pelo encontro das duas arestas principais.
- Ângulo de Hélice: é o ângulo formado entre o centro da broca e a guia. De acordo com o material a ser usinado este ângulo varia, podendo ser classificado a broca em três tipos diferentes, tipo N (para aço, ferro fundido maleável, níquel), tipo H (para materiais duros e frágeis), tipo W (para materiais moles), conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Tipos de Brocas Helicoidais

Fonte: Diniz (2001)

<i>Tipo</i>	<i>Aplicação</i>	<i>Representação</i>
W	Para usinagem de alumínio, zinco, cobre, madeira e plástico. $\sigma=130^\circ$ $Y=35$ a 40°	
N	$\sigma=130^\circ$ (Para usinagem de aço alto carbono) $\sigma=118^\circ$ (Para usinagem de aço macio, ferro fundido, latão e níquel) $Y=20$ a 30°	
H	$\sigma=80^\circ$ (Para usinagem de materiais prensados, ebonite, náilon, PVC, mármore, granito) $\sigma=118^\circ$ (Para usinagem de ferro fundido duro, latão, bronze, celeron, baquelite) $\sigma=140^\circ$ (Para usinagem de aço de alta liga) $Y=10$ a 15°	

Brocas Helicoidais Escalonadas:

As brocas helicoidais escalonadas possuem características conforme as brocas helicoidais, mas com a única diferença de ter pelo menos dois diâmetros diferentes, conforme pode ser visto na Figura 2.4.

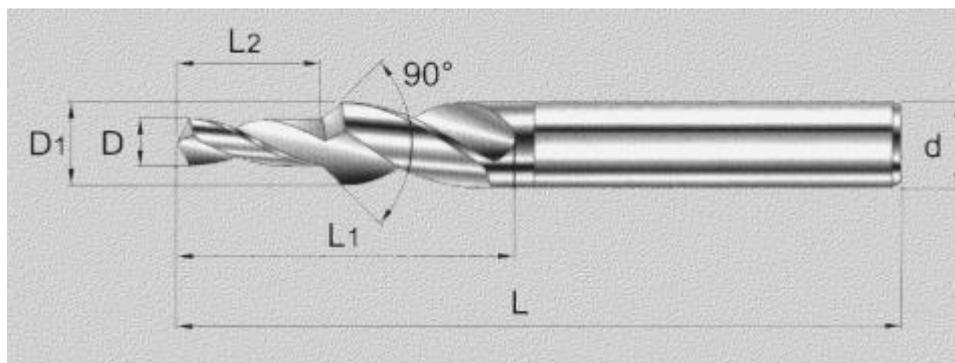


Figura 2.4 - Partes de uma Broca Helicoidal Escalonada
Fonte: Stemmer (1995)

Brocas Canhão:

Utilizada para furação profunda, em que a profundidade do furo corresponde a pelo menos 10 vezes o diâmetro da broca. Na broca helicoidal os canais helicoidais das brocas tendem a enfraquecer a broca, limitando assim o torque máximo. Sendo que para uma furação profunda a broca helicoidal necessita de um grande torque, por conta de seu alto comprimento. Por essas razões a escolha para furação profunda é pela broca canhão (STEMMER, 1995). Um exemplo de broca canhão é demonstrado na Figura 2.5.

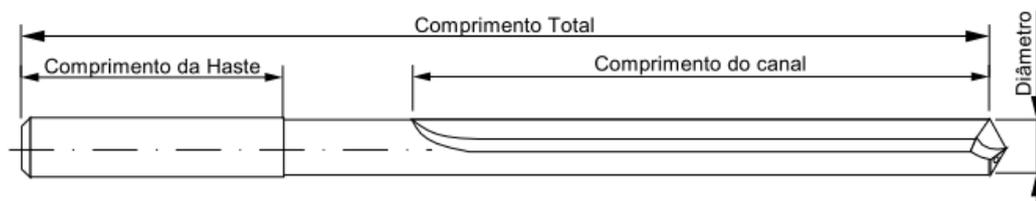


Figura 2.5- Partes de uma Broca Canhão
Fonte: Stemmer (1995)

Além das características anteriores as brocas canhão são preferíveis por oferecerem maior precisão de corte, precisão de alinhamento e melhor qualidade superficial. Por ser também uma broca específica para furação profunda, a operação se torna mais segura, pois os riscos de quebra são significativamente reduzidos (GUHRING, 2014).

2.2.2 Material usinado X Tipos de brocas

Dependendo da aplicação, algumas condições específicas são recomendadas. Neste trabalho estão detalhadas as condições recomendadas para a furação genérica de alumínio e ferro fundido (STEMMER, 1995).

- Ferro Fundido

Recomendam-se brocas tipo N (Helicoidal).

- Alumínio

Recomendam-se brocas do tipo W, para obter-se uma boa saída de cavaco convém polir as ranhuras. Avanços excessivos provocam a colagem de cavacos no interior do furo. Para furos muito profundos, como mencionado anteriormente, é preferível a utilização de broca canhão (STEMMER, 1995).

2.3 Materiais utilizados em ferramentas de corte

Os materiais utilizados em ferramentas de corte devem satisfazer algumas exigências básicas (STEMMER, 2001):

- Elevada dureza a frio, superior à da peça usinada;
- Elevada dureza a quente;
- Tenacidade para resistir a consideráveis esforços de corte e impacto;
- Resistência à abrasão;
- Estabilidade química;
- Facilidade de obtenção a preços econômicos;

Dentre os materiais utilizados em ferramentas de corte, nenhum apresenta todas as qualidades no mais alto grau. Cada material possui excelência em um ou em alguns dos requisitos apresentados acima, porém é inferior nos demais, ou ainda, é intermediário em praticamente todos os requisitos (STEMMER, 2001).

Os materiais de corte podem ser agrupados em várias categorias (STEMMER, 2001). Em função do escopo do trabalho, abordaremos detalhes de ferramentas de metal duro.

Uma composição típica de metal duro utilizado em ferramentas de corte é a dada por: 81% de tungstênio, 6% de carbono e 13% de cobalto (em massa). O tungstênio, utilizado na fabricação dos metais duros, é o metal de mais alto ponto de fusão (3387°C) e mais alta resistência à tração (4200N/mm²); a dificuldade da fusão do tungstênio e inexistência de cadinhos que possam suportar sua temperatura de fusão levou ao desenvolvimento da técnica de sinterização e ao desenvolvimento da denominada metalurgia do pó, processo que permite a fabricação de ferramentas de metal duro (STEMMER, 2001).

Ferramentas de carboneto de tungstênio apresentam resultados excelentes na usinagem de ferro fundido e materiais não ferrosos, mas com resultados fracos em operações de trabalho com aço. Isso se dá pelo forte atrito gerado entre a ferramenta de carboneto de tungstênio e o cavaco de aço. Ocorrem problemas de difusão e dissolução (STEMMER, 2001).

Metais duros com carbonetos combinados: Ferramentas com carbonetos combinados apresentam reduzido atrito da ferramenta com cavaco de aço. Atualmente são usados como componentes dos metais duros (STEMMER, 2001):

- WC- o carboneto de tungstênio é solúvel no cobalto, do que resulta a alta resistência das ligações internas e dos cantos dos metais duros de puro WC-Co. O WC tem alta resistência à abrasão, mas a utilização na usinagem de aço é limitada pela tendência de difusão do carbono e de dissolução no cobalto e no ferro.
- TiC- o carboneto de titânio tem pouca tendência à difusão e alta resistência ao desgaste, podendo formar um carboneto misto com WC. Metais com alto teor de TiC são frágeis. São utilizados na usinagem de aços, com altas velocidades de corte.
- TaC- em pequenas percentagens o carboneto de tântalo é utilizado para diminuir o tamanho de grãos, melhorando a tenacidade e a resistência dos cantos.

- NbC- o carboneto nióbio tem efeito semelhante ao TaC. Ambos os carbonetos ocorrem no metal duro com cristais mistos Ta – (Nb) – C.

2.4 Tipos de revestimento

A seguir estão descritos alguns dos principais tipos de revestimentos utilizados em ferramentas de aço rápido e metais duros, com uma ou mais camadas de revestimento.

2.4.1 Metais duros com revestimento

Estes se compõem de uma base de metal duro relativamente tenaz, sobre a qual se aplica uma ou mais camadas finas, duras, resistentes à abrasão e de fina granulometria, de um material composto de carbonetos (por exemplo, TiC, HfC, ZrC), de nitretos (por exemplo, TiN, HfN, ZrN) de carbonitretos (TiCN) ou de óxidos (por exemplo, Al₂O₃). Estes revestimentos permitem um aumento substancial da vida das ferramentas. Em condições adequadas este aumento corresponde a um múltiplo de tempo de vida das ferramentas de metal duro convencional (STEMMER, 2001).

O revestimento pode ser aplicado pelo processo de deposição de um vapor químico, CVD (Chemical Vapor Deposition), ou pelo processo físico de deposição de um vapor, PVD (physical vapor deposition) (STEMMER, 2001).

TiC: O carboneto de titânio tem um menor coeficiente de atrito que os demais metais duros convencionais e também baixos coeficiente de condutibilidade térmica, produzindo temperaturas mais baixas no gume e com isto, simultaneamente, diminuem a difusão entre os materiais da ferramenta e da peça. Diminui-se assim o desgaste por abrasão e por difusão. A espessura das camadas é de 4 a 8 μm (STEMMER, 2001).

TiN: O nitreto de titânio é mais estável quimicamente que o carboneto de titânio, tendo assim menor tendência a fenômenos de difusão com aços. Há menor desgaste por formação de crateras na face, porém o desgaste por abrasão no flanco é maior do que no caso de revestimentos com TiC. A aderência do TiN sobre o material de base não é muito boa. A espessura usual é de 5 a 7 μm , dando uma cor dourada à ferramenta (STEMMER, 2001).

Óxido de alumínio ($\alpha - Al_2O_3$): Caracteriza-se pela alta dureza a quente, resistência aos ataques químicos e à oxidação, mesmo em altas temperaturas; possui ótima resistência contra a formação de crateras, porém possui pequena resistência a choques térmicos, fragilidade e aderência limitada sobre bases de metal duro (STEMMER, 2001).

AlCrN-based – Ferramentas cobertas com esse material possuem uma maior resistência à abrasão, uma menor tendência à adesão, uma grande tenacidade e uma baixa rugosidade da sua superfície, permitindo aumentar o rendimento das operações de furação. Aplicações recomendadas (OERLIKON, 2014):

- Brocas de aço rápido e de metal duro com refrigeração interna ou externa;
- Sobre todas as classes habituais de aço e fundição;
- Execução de furos profundos com brocas.

WC/C - é utilizado essencialmente para reduzir o desgaste provocado pela aderência, podendo suportar igualmente cargas elevadas com lubrificação deficiente ou usinagem a seco. Com isso, evita-se grandemente a fadiga de superfície e a oxidação por atrito (corrosão de contato). Os materiais de base caros podem muitas vezes ser substituídos por aço a preços mais acessíveis.

Aplicações recomendadas (OERLIKON, 2014):

- Perfuração e repuxamento (lubrificação reduzida ou funcionamento a seco);
- Moldagem por injeção de plásticos (funcionamento a seco de componentes para ferramentas móveis);
- Engrenagens e rolamentos de esferas com níveis acentuados de pressão de superfície;
- Componentes de precisão em motores de explosão sujeitos a esforços elevados;
- Sistemas sem lubrificação (sistema Clean Room ou tecnologia de produtos sanitários);
- Ferramentas de corte (usinagem de alumínio);

TiAlN-based: pode ser utilizado na usinagem de ferro fundido ou aço, especialmente em brocas de alto desempenho. Pode a ferramenta ser reafiada sem perder a desempenho em relação a uma broca com revestimento novo (Oerlikon, 2014).

Aplicações recomendadas (OERLIKON, 2014):

- Pode ser utilizado para brocas de alto desempenho;
- Reafiação: mesmo nível de desempenho e flexibilidade que uma broca com revestimento novo.

t-AC: Possui boa resistência à corrosão, excelente resistência ao desgaste devido à alta dureza, boa qualidade de corte devido baixo coeficiente de atrito e boa aderência com o metal de base (OERLIKON, 2014).

Aplicações recomendadas de usinagem (OERLIKON, 2014):

- De alumínio e ligas de alumínio com até 12% de silício;
- Metais não ferrosos, como o cobre, o bronze, prata, ouro, platina;
- Compósitos como GRP e CFK;
- Materiais orgânicos tais como madeira e papel;
- Alumínio formando e cortando;
- Ferramentas de polímero para elastômero usinagem;
- Para todas as aplicações que envolvem desgaste combinado e adesão;

Carbonitreto de titânio: Revestimentos múltiplos de TiC – Ti (C, N) – TiN combinam as boas características de resistência ao desgaste por abrasão das superfícies de saída do TiC com a resistência de oxidação e formação de crateras do TiN. Pode ser utilizado na usinagem de aço, ferro fundido, ferro maleável e metais duros, com altas velocidades de corte. Não são adequados para a usinagem de materiais que possuem afinidade com o TiC ou o TiN, como ligas de alumínio, magnésio e titânio, materiais com altas ligas de níquel, alguns aços resistentes à corrosão e aos ácidos, e na usinagem de aços de nitretação (STEMMER, 2001).

Revestimentos de TiC- Al₂O₃: Utiliza-se uma camada de TiC entre o óxido de alumínio e material de base, melhorando a aderência do Al₂O₃. É aplicado na usinagem de aço fundido e de ferro fundido (STEMMER, 2001).

2.5 Revestimentos em PVD

O processo physical vapor deposition (PVD) tem por objetivo formar uma camada de revestimento no substrato por deposição física de átomos, íons ou moléculas do elemento a ser depositado. Existem três principais técnicas para a aplicação do PVD, sendo elas: Vaporização Térmica, Sputtering e Metalização Iônica. O processo de PVD ocorre em uma câmara ao vácuo e envolve a fonte de vapor e o substrato onde a deposição acontece. Diferentes técnicas existem devido à variação em atmosferas, meio da formação de vapor e tensão elétrica do substrato, as quais influenciam a estrutura, as propriedades e a taxa de deposição do revestimento (OERLIKON, 2014).

Os passos da deposição são:

1. Síntese do material depositado (transição de um estado condensado, sólido ou líquido, para a fase de vapor, ou, para a deposição de compostos, reação entre os componentes dos compostos, alguns dos quais podem ser introduzidos na câmara como um gás ou vapor);
2. Vapor transportado da origem para o substrato;
3. Condensação do vapor seguido pela nucleação e crescimento do filme.

O processo PVD produz um revestimento para ampla aplicação, incluindo eletrônica, ótica, decoração, e prevenção de corrosão e desgaste. Os revestimentos normalmente utilizados para prevenção de desgastes são compostos duros. Os revestimentos por PVD tem dureza maior que qualquer metal e são usados em sistemas que não podem tolerar perdas por desgaste nem em escala microscópica. A maioria dos processos são operados em uma base do lote, e o tamanho do componente é limitado pelo tamanho da câmara de vácuo. Previsto que o substrato pode ser manipulado para enfrentar a fonte de revestimento, o tamanho e a forma dos objetos são limitados pelo montante das despesas de capital e operacionais envolvidos e não pelas características fundamentais do processo. Além disso, a limpeza do substrato é fundamental e muito superior às necessidades de preparação de superfície para outros revestimentos (OERLIKON, 2014).

Existem algumas técnicas que contemplam os processos de PVD, as três principais são:

1. **Vaporização Térmica:** é a mais antiga e mais amplamente utilizada técnica de PVD. Vaporização Térmica ocorre em um vácuo de pressão 0,1 a 10mPa e o átomo de vaporização da fonte percorre o caminho na câmara em linha reta, o que limita o processo, e, portanto revestimentos de cantos e de ângulos reentrantes não são possíveis de realizar sem a manipulação do substrato. Revestimentos de Alumínio e Cromo para a indústria automotiva são as maiores aplicações deste processo (OERLIKON, 2014).
2. **Sputter Coating:** é um processo a vácuo que envolve o uso de íons de um plasma de gás gerado para desalojar átomos ou moléculas de um alvo feito do material que se tornará o revestimento. O plasma é estabelecido entre o alvo e o substrato pela aplicação de um potencial de corrente contínua ou alternada. Um gás inerte é introduzido na câmara para formar o plasma de descarga entre os eletrodos. Os materiais que podem sofrer este processo são metais puros, ligas, compostos inorgânicos e alguns polímeros. A maior restrição a ser considerada para o material do substrato é a temperatura de processo, a qual varia de 260 a 540°C. O Sputter Coating é frequentemente utilizado para compostos e materiais que são difíceis de revestir a partir da Vaporização Térmica (OERLIKON, 2014).
3. **Ion Plating:** A metalização iônica é um processo de revestimento a vácuo em que uma parte dos elementos do revestimento colide com o substrato em forma iônica. O processo é um híbrido do processo de Vaporização térmica e do sputtering, com a taxa de Vaporização mantida a uma taxa maior do que o sputtering. Alguns átomos evaporados passam pelo plasma na forma atômica, enquanto alguns

átomos colidem com os elétrons do substrato e os íons. Eles incidem sobre o substrato na forma iônica (OERLIKON, 2014).

2.6 Usinabilidade dos materiais

Na obtenção de peças através dos processos de usinagem verifica-se que cada material tem um comportamento diferente; enquanto uns podem ser trabalhados facilmente, outros apresentam uma série de problemas, tais como empastamento, desgaste rápido da ferramenta, mau acabamento, necessidade de grande potência para o corte, entre outros. Isso varia de acordo com a usinabilidade do material. Pode-se, então, definir usinabilidade como sendo o grau de dificuldade que um determinado material apresenta para ser usinado (STEMMER, 2001).

A usinabilidade não depende apenas das características do material, mas também de outros parâmetros da usinagem, como refrigeração, rigidez do sistema máquina-ferramenta, tipo de operação, entre outras. Assim, dependendo das condições de usinagem, um mesmo material poderá ter variações em sua usinabilidade. A usinabilidade é normalmente determinada por comparação e para determinada característica, como a vida da ferramenta. Neste caso pode-se determinar um índice de usinabilidade através da comparação com o desempenho previamente conhecido de um material padrão (STEMMER, 2001). 3

Os principais critérios para a determinação da usinabilidade de um material passíveis de serem expressos em valores numéricos são (STEMMER, 2001):

- Vida da ferramenta;
- Força e Potência de Corte;
- Qualidade Superficial;
- Formação de Cavacos.

Esses parâmetros servem, também, para definir o custo do trabalho de usinagem; assim, a vida da ferramenta entre duas afiações sucessivas tem grande influência no custo de operação. Além disso, a exigência de um acabamento de alta qualidade poderá influir, também, no custo da usinagem (STEMMER, 2001).

Baseadas principalmente nestes critérios é que são estabelecidos as tabelas e os gráficos que indicam o comportamento de cada material na usinagem. Embora seja impossível determinar-se com precisão um índice de usinabilidade para cada material, estas tabelas são de grande valor para estabelecer parâmetros iniciais de partida que, de acordo com as condições específicas de cada trabalho, poderão ser trazidos para valores mais adequados, através de ensaios e experimentações (STEMMER, 2001).

Alguns parâmetros do material que influenciam a usinabilidade são:

- Dureza e resistência mecânica: Valores baixos geralmente favorecem a usinabilidade;
- Ductilidade: Valores baixos geralmente favorecem a usinabilidade;
- Condutividade térmica: Valores elevados geralmente favorecem a usinabilidade;
- Taxa de encruamento: Valores baixos geralmente favorecem a usinabilidade;

2.7 Determinação da Vida de Ferramentas

A vida da ferramenta é o tempo que a mesma trabalha efetivamente, até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido.

Existem diversos fatores para a determinação de um limite para o fim da vida de uma ferramenta, para a continuidade deste trabalho será explorado o critério de desgaste frontal.

2.7.1 Desgaste Frontal

O desgaste frontal, ou desgaste de flanco, ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre a ferramenta e a peça. É o tipo mais comum de desgaste, e ocasiona a deterioração do acabamento superficial da peça, pois modifica completamente a aresta de corte, conforme pode ser visto na Figura 2.6.

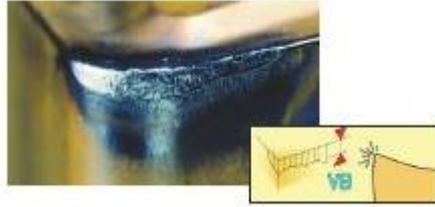


Figura 2.6– Desgaste de Flanco
Fonte: Sandvik Coromant

Na usinagem, para evitar a quebra da ferramenta é comum adotar valores para o desgaste de flanco entre 0,8 a 1,5mm, para ferramentas de metal duro (SANDVIK, 2015).

2.8 Análise Financeira

Foi realizada uma análise financeira considerando custo da ferramenta, custo do revestimento e custo de máquina parada em relação à vida de ferramenta. A aplicação do revestimento impacta em aumento do custo unitário da ferramenta, porém, o aumento da vida útil pode diminuir a quantidade de unidades de ferramenta/peça e quantidade de trocas/peça, que podem ser representados por custo de ferramenta por peça usinada (CPP) e custo de máquina parada para troca de ferramenta por peça usinada (CPP-troca).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir serão descritos os materiais e métodos utilizados na realização dos testes.

3.1 Critérios e seleção das brocas a serem testadas

Na empresa em que foram realizados os testes, são realizadas dezenas de operações de furação, tanto na usinagem do bloco como do cabeçote, onde são utilizadas dezenas de brocas de geometrias diferentes. Para selecionar as brocas a serem testadas, foram utilizados os seguintes critérios:

- Seria selecionado um tipo de broca utilizado para furação em alumínio e outro tipo de broca para furação em ferro fundido, para que pudesse ser avaliada a influência dos revestimentos na vida útil das brocas utilizadas na furação de diferentes materiais;
- Para a realização dos testes, foram selecionadas brocas que até então não utilizavam nenhum tipo de revestimento, para que pudessem ser aplicados os revestimentos nessas ferramentas a para que pudesse ser feita a comparação de vida das ferramentas com e sem revestimentos;
- Outro critério de seleção utilizado foi o nível de impacto que algum problema nas brocas pudesse trazer para a usinagem. Nesse sentido, foram selecionadas brocas que fazem operações de pré-furação. Foi selecionado esse tipo de operação pelo fato de os furos apresentarem maior tolerância dimensional (em torno de $\pm 0,5\text{mm}$ no diâmetro) e geométrica, além de possuírem maior facilidade de retrabalho, no caso de alguma peça sair não conforme.
- As brocas utilizadas nos testes deveriam sair da fábrica para aplicação do revestimento, impactando no fluxo interno de ferramentas. Para que essa alteração no fluxo não gerasse problemas, foi utilizado também como critério de seleção das brocas, utilizar aquelas que são utilizadas em grandes quantidades, ou seja, que são utilizadas na execução de vários furos.

Com base nesses critérios, foram selecionadas as seguintes brocas:

- Na usinagem do alumínio, foram selecionadas brocas do tipo “canhão”, Figura 3.1, com diâmetro de 11,3mm e canal interno de refrigeração, utilizadas na furação dos furos de junção do cabeçote com o bloco, Figura 3.2. Esses furos são usinados no equipamento da Grob (Figura 3.3) e posteriormente passa por uma operação de alargamento e outra de rosqueamento. Na estação são utilizadas 9 brocas, sendo que nos testes foram utilizadas 4 brocas como revestimento *Balinit C* e 5 brocas sem revestimento.

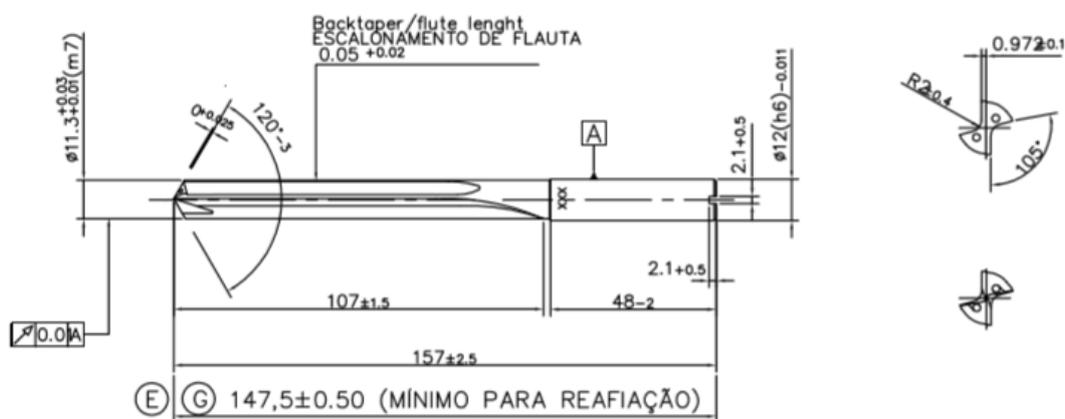


Figura 3.1 – Desenho da broca canhão de diâmetro 11,3 utilizada na furação do cabeçote.

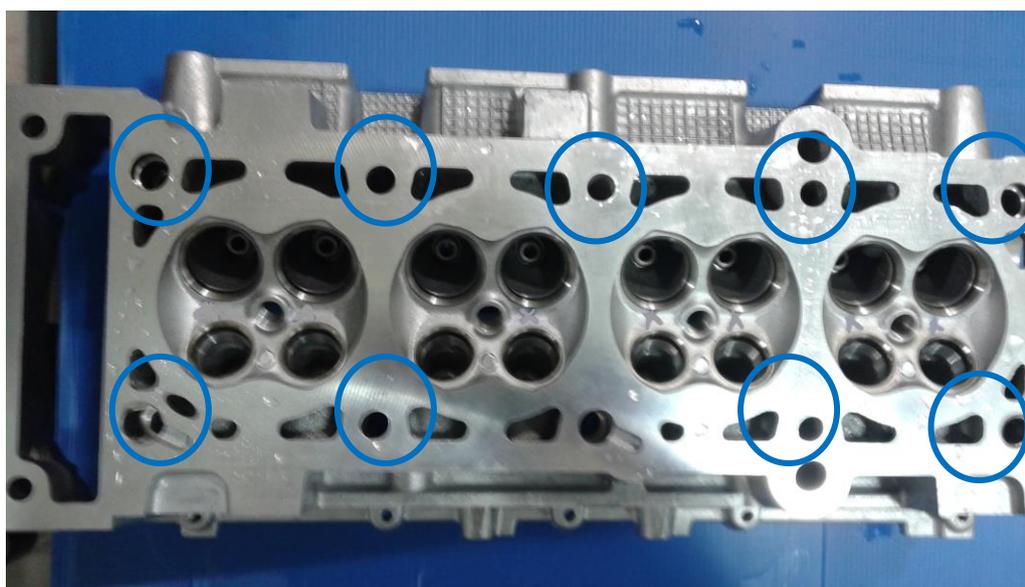


Figura 3.2 – Furos de junção do cabeçote com bloco.



Figura 3.3 – Cabeçote de furação utilizado na usinagem dos furos de junção do cabeçote com o bloco.

- Na usinagem do ferro fundido, foram selecionadas brocas helicoidais escalonadas, classe H, com diâmetro de 13,2 e 9,2mm, Figura 3.4. Essas brocas são utilizadas na usinagem dos furos de junção do bloco com o cárter, Figura 3.5, em um cabeçote de usinagem (Figura 3.6) no qual são utilizadas 13 brocas. Para a realização dos testes, foram utilizadas 5 brocas com revestimento *Pertura*, 5 brocas com o revestimento *Alcrona* e 3 brocas com revestimento *Firex*.

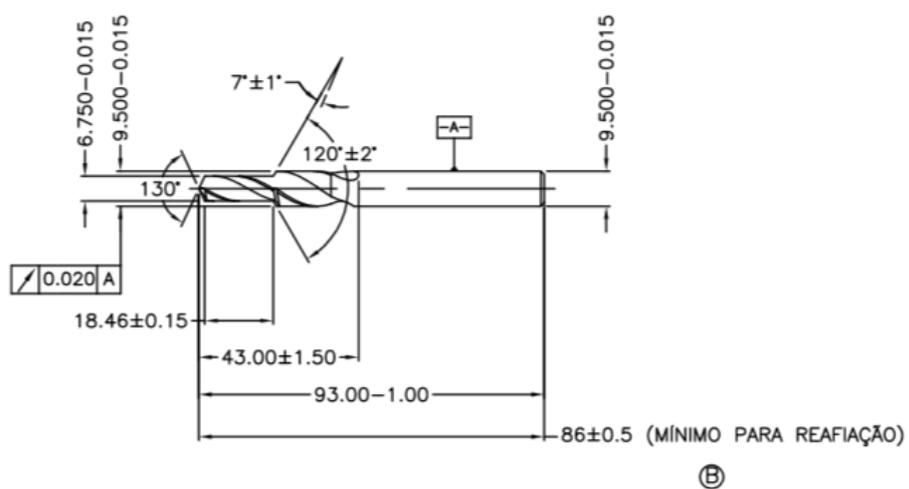


Figura 3.4 – Desenho da broca helicoidal escalonada de diâmetros de 13,2 mm e 9,2mm.

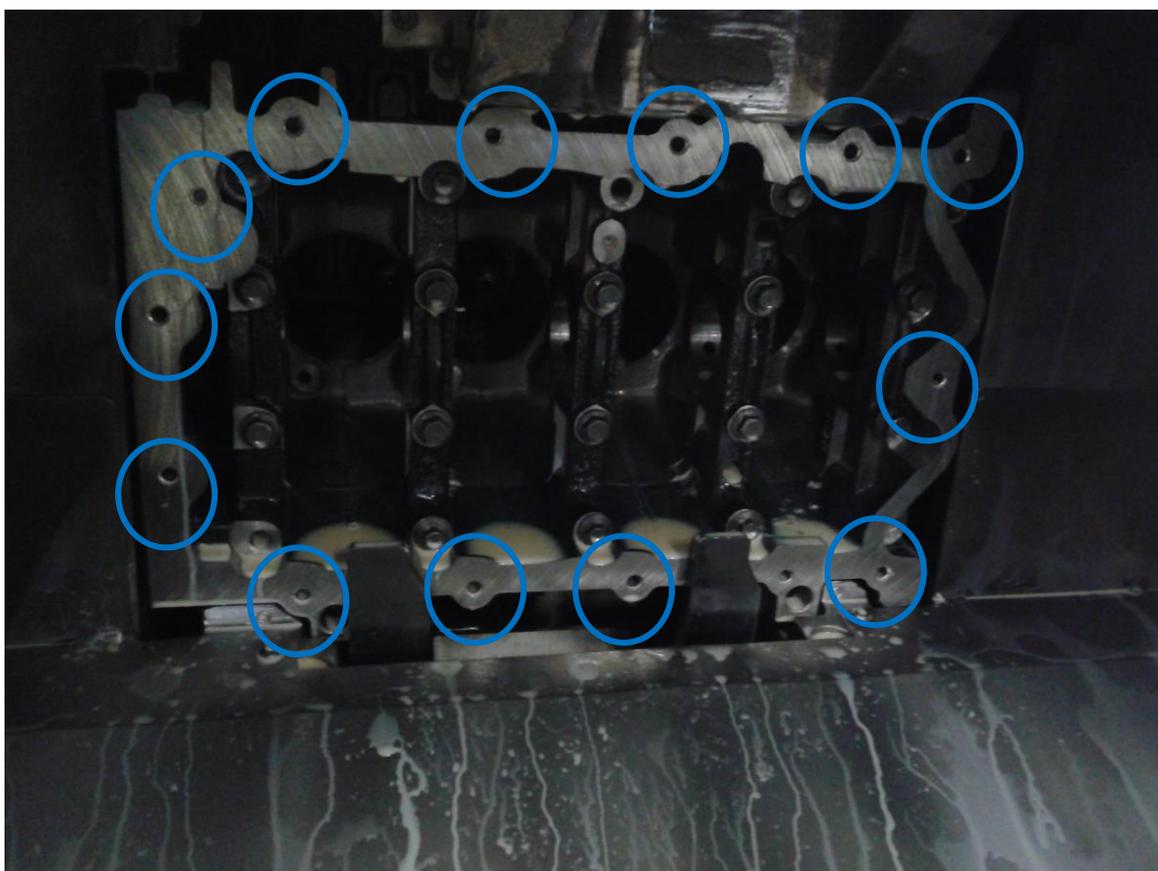


Figura 3.5- Furos de junção do bloco com o cárter.



Figura 3.6 - Cabeçote de furação utilizado na usinagem dos furos de junção do bloco com o cárter.

3.2 Materiais usinados

Na empresa em que foram realizados os testes, é utilizada apenas uma liga de alumínio para a fundição do cabeçote, fundição feita em uma empresa terceirizada, e apenas uma liga de ferro fundido para a fundição do bloco, componentes utilizados no teste das brocas.

A liga de alumínio utilizada no cabeçote, é a liga AA C355, e o ferro fundido cinzento utilizado no bloco é a SAE G3000.

A liga AA C355, possui em sua composição aproximadamente 7,0% de silício e 0,3% de manganês (composições representadas em massa). É tratada termicamente (T6) e possui limite de resistência à tração de 228 MPA e limite de escoamento de 164 MPA e ductilidade de 3,5% (%A em 50 mm) (WEINGAERTNER & SCHROETER, 1991).

O Fofa SAE G3000 possui em sua composição: C (3,3 a 3,5%), Mn (0,4 a 0,7%), Si (2,0 a 2,4%), P (0,12% máx.) e S (0,12% máx.) cujas composições são representadas em massa. O tratamento térmico utilizado é o alívio de tensões e suas propriedades mecânicas são: limite de resistência à tração de 196 MPA, limite de escoamento de 78 MPA e dureza de 170 à 200 HB (WEINGAERTNER & SCHROETER, 1991).

3.3 Revestimentos utilizados

Os revestimentos utilizados foram fornecidos gratuitamente pela Balzers S/A, unidade de São José dos Pinhais-PR. Foram selecionados revestimentos que tem aplicação comercial nos processos de usinagem em questão e que a empresa poderia fornecer dentro dos prazos estipulados.

Para as brocas utilizadas na usinagem do alumínio, foi utilizado um revestimento: *Balinit C* (revestimento: WC/C).

Nas brocas utilizadas na usinagem de ferro fundido, a princípio, para a realização dos testes, foram feitos dois revestimentos: *Alcrona* (AlCrN-based) (Figura 3.7) e *Pertura* (TiAlN-based) (

Figura 3.8).



Figura 3.7 – Brocas helicoidais com revestimento Alcrona.



Figura 3.8 – Brocas helicoidais com revestimento Pertura.

Na Tabela 2, estão listadas as composições e propriedades dos principais revestimentos oferecidos pela empresa Oerlikon Balzers S/A para a realização deste trabalho.

Tabela 2 – Revestimentos oferecidos pela empresa Oerlikon Balzers S/A para a realização dos testes. (OERLIKON, 2014)

	Material dos revestimentos	Micro-dureza* (HV 0.05)	Coefficiente de atrito* no aço (seco)	Temperatura máxima de serviço (°C)	Cor do revestimento
▶ BALINIT® C	WC/C (a-C:H:W)	1.500 / 1.000	0,1 - 0,2	300	antracite
▶ BALINIT® ALCRONA PRO	AlCrN-based	3.200	0,35	1.100	cinzento brilhante
▶ BALINIT® PERTURA	TiAlN-based	3.200	0,25	1.000	cinza-berinjela

Quando foram selecionadas essas brocas, as mesmas cumpriam uma vida de 5000 peças sem revestimento, porém, durante a preparação dessas ferramentas e planejamento dos testes, ocorreram problemas na máquina relacionada à rigidez da mesma, e a vida das ferramentas sem revestimento foi diminuída para 3000 peças. Devido a isso, o fornecer de ferramentas (Guhring) iniciou também testes com o revestimento *Firex*, o qual foi incluído no trabalho. As propriedades desse revestimento estão especificadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades do revestimento *Firex*

<i>Coating Properties</i>	
Coating Material	TiN-TiAlN
Hardness (HV 0.05)	3,000-3,300
Coating Temperature (°F)	930
Friction Coefficient on Steel (dry)	0.5
Thickness (µm)	1.5 - 5
Oxidation Resistance (°F)	1,470
Color	red-violet

3.4 Parâmetros de corte e condições de usinagem

Os testes visam fazer um comparativo de desempenho dos revestimentos em condições normais de usinagem, ou seja, com todas as variações inerentes aos processos (variação de temperatura, variação de sobremetal entre as peças usinadas, variação da dureza nos pontos usinados, vibração da máquina, etc.).

Os parâmetros de corte são apresentados na Tabela 4. Os parâmetros utilizados foram os mesmos que eram utilizados na produção normal. Não foram alterados por questões operacionais, pois poderiam afetar a produção, no que diz respeito à qualidade e à parada de linha.

Tabela 4 – Parâmetros de corte utilizados nos testes.

Parâmetro	Usinagem do Alumínio	Usinagem do Ferro Fundido
Rotação (RPM)	2540	3883
Velocidade de corte (m/min)	90,17	82,3
Avanço (mm/min)	254	279,6
Refrigeração	Com refrigeração, broca com canal de coolant.	Com refrigeração, bicos direcionais de coolant.

3.5 Descrição da Metodologia

Para o desenvolvimento do estudo, primeiramente serão coletadas informações da vida útil das brocas sem revestimento em condições normais de trabalho. Essas informações serão à base de comparação para a análise de viabilidade técnico-econômica da utilização dos revestimentos.

O critério de comparação da vida útil da ferramenta utilizado foi o número de peças usinadas, pois outros critérios de comparação, como a quantidade de material retirado, seriam de difícil análise e não correspondiam à realidade da linha de usinagem.

Todos demais parâmetros de usinagem foram mantidos idênticos aos utilizados atualmente para as brocas sem revestimento. As variabilidades no processo (por exemplo, sobremetal do fundido a ser usinado) foram as mesmas para as ferramentas em todos os casos.

As brocas foram fornecidas pela empresa que as utiliza e levadas até a empresa que aplica o revestimento. Depois de revestidas, as brocas foram levadas novamente para a empresa que as utiliza, e colocadas no processo, sem alteração das condições normais de usinagem. O desgaste e a vida útil das brocas em cada condição foram analisados, baseando-se nos mesmos critérios que foram utilizados para as brocas sem revestimento.

3.6 Critério de determinação da vida útil das brocas

O critério de para se definir a vida da ferramenta é a medição das características do furo, tais como: diâmetro (em 3 secções) e posição (em 3 secções, acusando furo fora de posição ou inclinado). Cada uma dessas características possui um valor nominal e uma faixa de tolerância superior e uma inferior. Durante o teste, quando quaisquer umas dessas características atingem 80% do valor da tolerância, tanto positivo quanto negativo, de qualquer uma das características, a vida da ferramenta no momento da medição é definida como a vida padrão da ferramenta.

Esse critério de 80% é utilizado para proteger a linha no que diz respeito a problemas de qualidade. Se uma ferramenta for utilizada até arrambar o furo, ou seja, atingir o limite superior da tolerância e esse for considerado o valor de vida

padrão da ferramenta, em outro evento, se ocorrer qualquer variação no processo, ao final de vida a ferramenta poderá produzir furos com o diâmetro arrombado, ocasionando na perda de peças por não qualidade,

A medição das características dos furos é realizada a cada 125 peças. Essa medição é realizada na Central de Medições Metrológicas (CMM). O Equipamento utilizado é uma mesa de medição 3D do modelo Calypso.

Esse não é o método mais preciso para determinação da vida ferramenta, porém medir os furos a cada peça usinada seria inviável na linha de usinagem, atrapalhando a eficiência da linha. O método utilizado nesse trabalho corresponde ao que é utilizado no cotidiano das empresas em geral.

4 RESULTADOS

A seguir estão descritos os resultados obtidos com cada um dos revestimentos

4.1 Resultado obtido com o revestimento Balinit C nas brocas canhão

De acordo com o critério de 80% de precisão para as características controladas, como mencionado na seção anterior, as brocas atingiram 25400 peças de vida, um incremento de 95,3% na vida da ferramenta.

Analisando-se o desgaste das brocas (Figuras 4.1 a 4.6), verificou-se que o desgaste das com revestimento, a uma vida de 25400 peças usinadas, é muito similar à de uma broca sem revestimento a uma vida de 13000 peças.



Figura 4.1 Imagem do desgaste da guia lateral da broca sem revestimento à uma vida de 13000 peças usinadas.

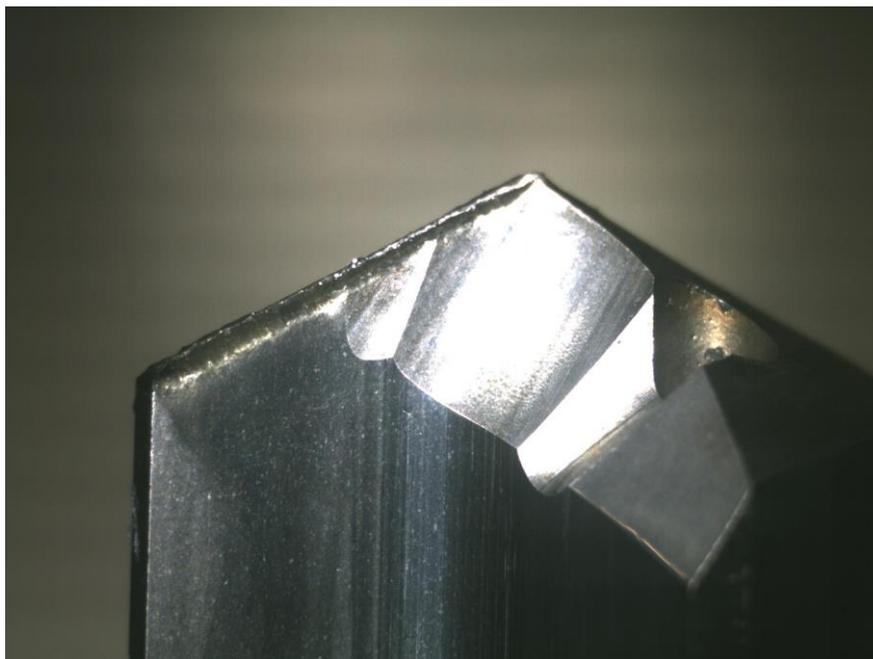


Figura 4.2 Imagem do desgaste da aresta de corte da broca sem revestimento à uma vida de 13000 peças usinadas.



Figura 4.3 Imagem superior do desgaste das arestas de corte da broca sem revestimento à uma vida de 13000 peças usinadas.

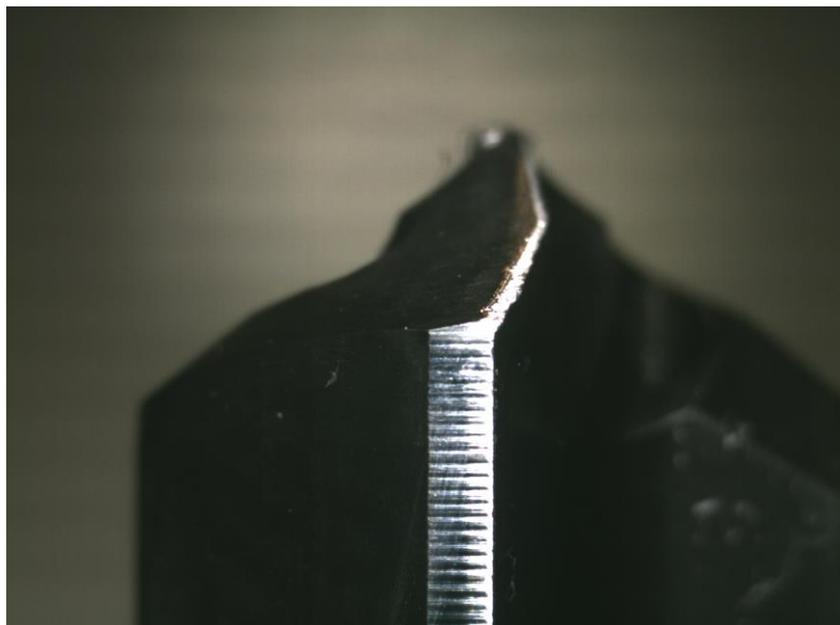


Figura 4.4 Imagem do desgaste da guia lateral da broca com revestimento *Balinit C* à uma vida de 25400 peças usinadas.

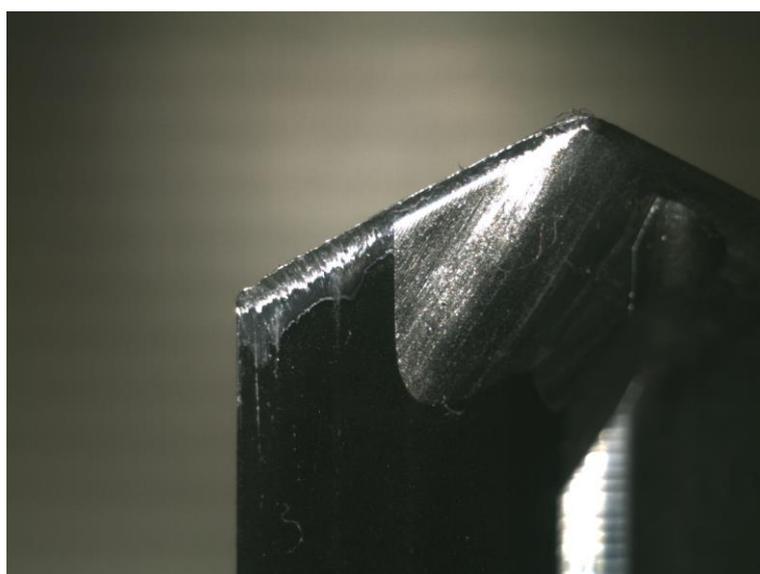


Figura 4.5 Imagem do desgaste da aresta de corte da broca com revestimento *Balinit C* à uma vida de 25400 peças usinadas.

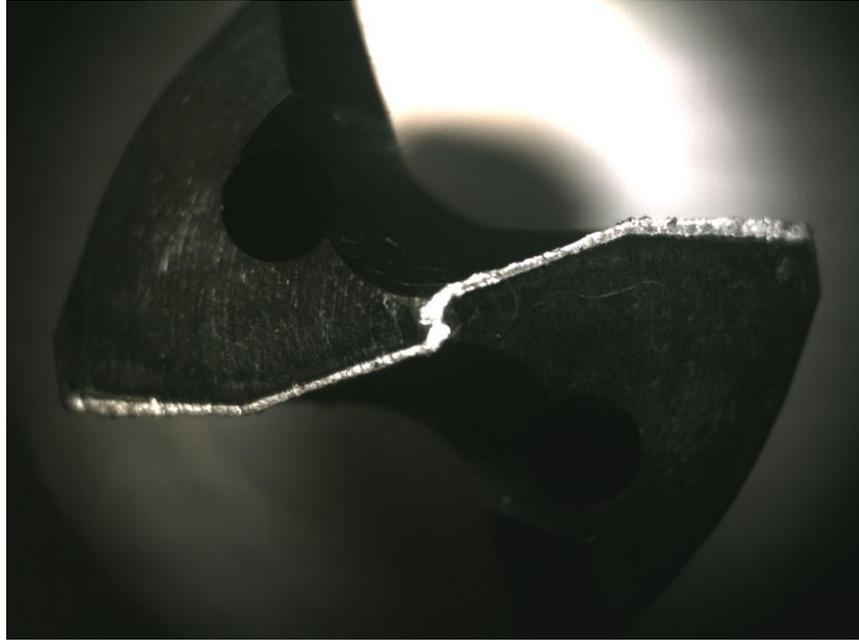


Figura 4.6 Imagem superior do desgaste das arestas de corte da broca com revestimento *Balinit C* à uma vida de 25400 peças usinadas.

Como análise complementar, foram medidas as rugosidades da superfície interna de dois furos usinados com brocas sem revestimento (Furos #102 e #104) e de dois furos com brocas com revestimento (Furos #103 e #105) para a primeira usinada, e posteriormente, outra medição de dois furos usinados com brocas sem revestimento (Furos #104 e #106) e de dois furos com brocas com revestimento (Furos #103 e #105) para a última peça usinada nos testes (a uma vida de 25400 peças para a broca com revestimento e 12400 peças para a broca sem revestimento).

Como se pode ver nos Anexos de I à IV, os perfis de rugosidade e valores calculados de Ra, Rz e Rt (parâmetros de rugosidade), a rugosidade não segue um padrão relacionado à presença de revestimento ou não. Porém para as duas condições de ferramenta, há um aumento na rugosidade para ferramentas usadas, porém esse aumento é mais acentuado nas brocas sem revestimento, dando um indicativo que o desgaste nas ferramentas sem revestimento é mais acelerado.

4.2 Resultado obtido com os revestimentos Alcrona e Pertura nas brocas helicoidais

A vida de ferramenta preconizada para as brocas helicoidais sem revestimento era 3000 peças. No período em que foram realizados os testes com os revestimentos Alcrona e Pertura, o fornecedor das ferramentas (Guhring) também estava testando o revestimento cujo nome comercial é *Firex*. Tal revestimento vinha sendo utilizado e desenvolvendo vidas de 5000 peças usinadas.

As brocas com o revestimento Alcrona tiveram de ser retiradas da máquina com uma vida de 3200 peças usinadas, devido ao fato de, na 13ª rota, ter sido detectado que o diâmetro dos furos usinados por essas brocas estarem muito próximo dos 80% do limite inferior da tolerância, na região em que furo apresenta diâmetro de 6,800mm. A especificação do furo é $6,8 \pm 0,125$, e na medição da rota foi detectado que os furos apresentavam diâmetro próximo de 6,7 mm.

Analisando-se o desgaste dessas brocas, foi verificado um desgaste bem avançado; o pior caso pode ser visto na Figura 4.7 e na Figura 4.8. Tal desgaste pode estar relacionado à formação de gume postiço e posterior deslocamento do revestimento. Esse é um indicativo de que havia um coeficiente de atrito relativamente alto entre os materiais da peça usinada e do revestimento, sendo, portanto, não muito aconselhável utilizar esse revestimento na usinagem do Fofó SAE G3000.

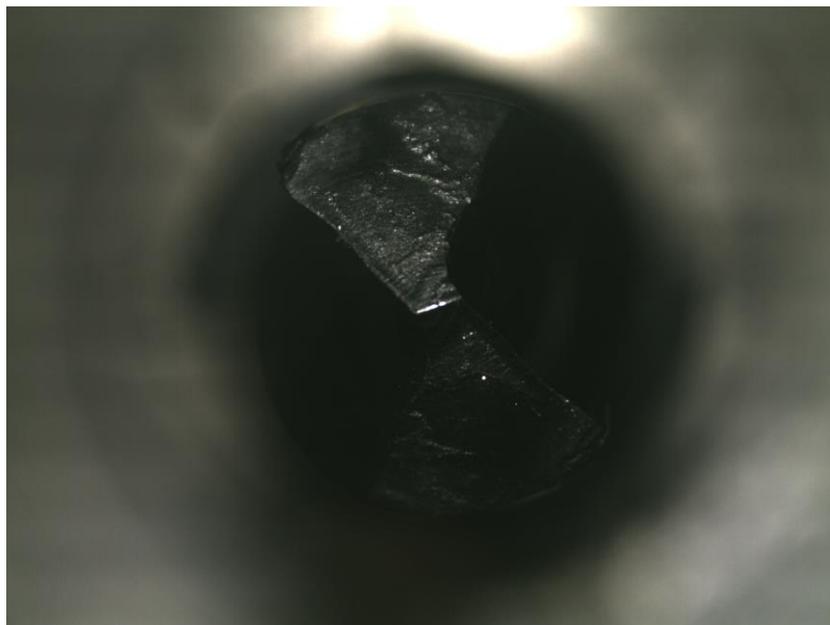


Figura 4.7 – Imagem superior do desgaste das arestas de corte da broca helicoidal com revestimento *Alcron* a uma vida de 3200 peças usinadas.



Figura 4.8 – Imagem lateral do desgaste da aresta de corte da broca helicoidal com revestimento *Alcron* a uma vida de 3200 peças usinadas.

Os furos usinados com as brocas helicoidais com revestimento *Pertura* apresentaram diâmetro próximo dos 6,69mm com 4950 peças usinadas, estando, portanto, com diâmetro fora dos 80% da faixa de tolerância. Analisando-se o desgaste dessas brocas, verificou-se que desgaste semelhante às brocas com

revestimento *Firex* após finalizarem a vida de 5000 peças usinadas. A comparação do desgaste pode ser feita analisando-se as fotos das imagens a seguir.



Figura 4.9 - Imagem superior do desgaste das arestas de corte da broca helicoidal com revestimento *Pertura* a uma vida de 4950 peças usinadas.

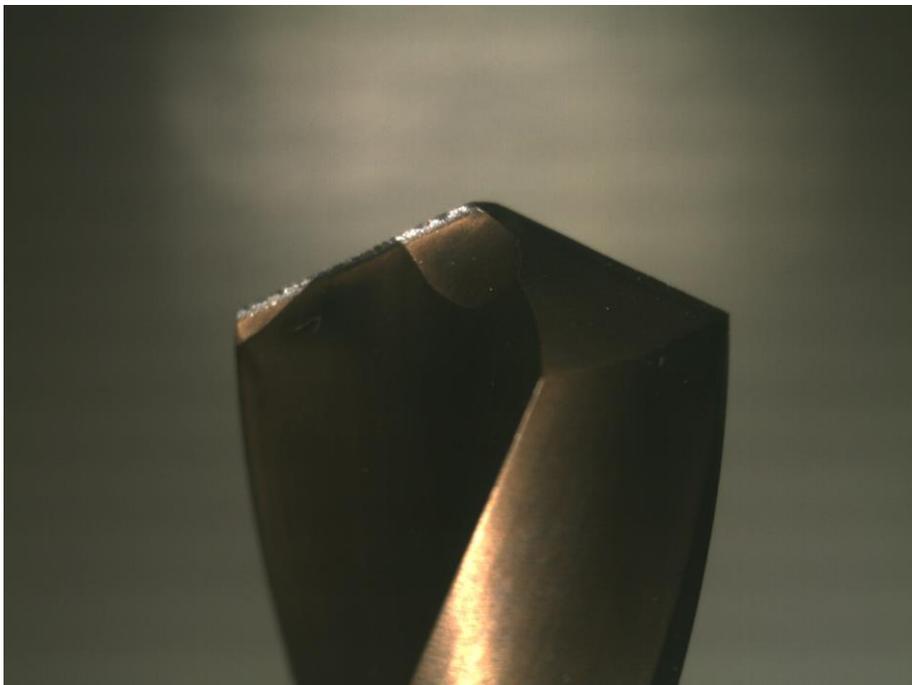


Figura 4.10 - Imagem lateral do desgaste da aresta de corte da broca helicoidal com revestimento *Pertura* a uma vida de 4950 peças usinadas.

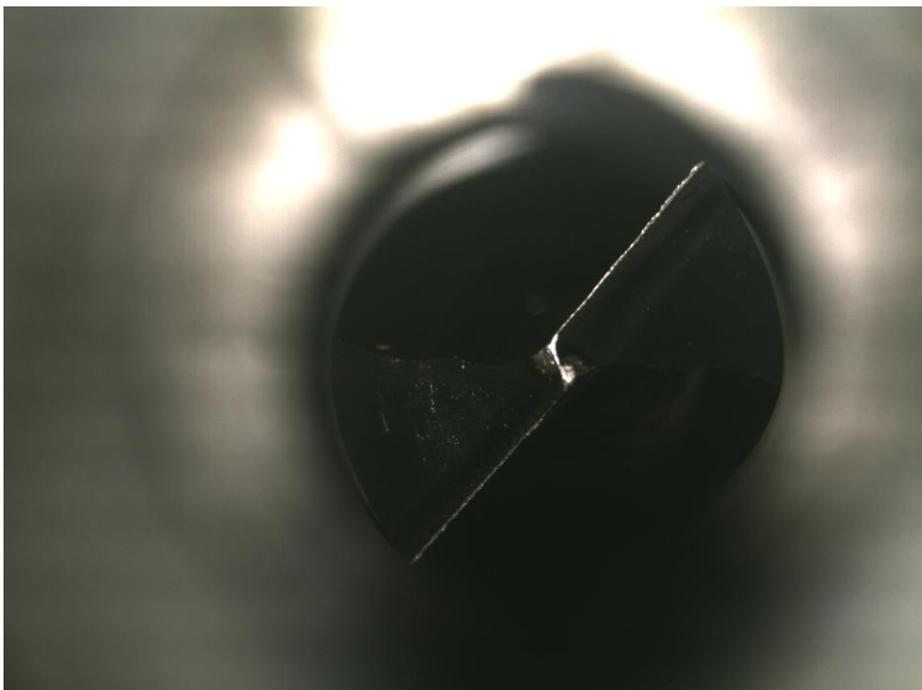


Figura 4.11 - Imagem superior do desgaste das arestas de corte da broca helicoidal com revestimento *Firex* a uma vida de 5000 peças usinadas.



Figura 4.12 - Imagem lateral do desgaste das arestas de corte da broca helicoidal com revestimento *Firex* a uma vida de 5000 peças usinadas.

4.3 Análise da viabilidade econômica dos revestimentos

Para levantar qual a condição de ferramenta economicamente mais viável, foi levado em conta, além do custo das ferramentas e revestimentos, o custo de máquina parada durante a troca.

Para o cálculo do custo por peça (CPP) devido ao consumo de ferramentas, foram somados o valor da ferramenta nova e o custo do revestimento (quando aplicado) multiplicado pela quantidade de vezes que a broca é utilizada (quantidade de reafiações). Esse valor é então dividido pela quantidade total de peças usinadas (vida por reafiação multiplicada pela quantidade de reafiações) e multiplicado pela quantidade de ferramentas na estação. O valor encontrado corresponde ao CPP devido ao consumo de ferramenta, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Desdobramento dos custos por peça devido ao consumo de ferramenta por ferramenta/revestimento

Ferramenta	Revestimento	Desempenho	Custo ferramenta nova	Custo revestimento (Aproximado)	Quantidade média de reafiações	Custo Ferramenta e revestimentos	Total de peças usinadas	Quantidade ferramentas na estação	CPP (Custo por peça) Ferramenta
Broca helicoidal escalonada 6,75/9,5mm	-	3000	R\$ 235,00	R\$ -	5	R\$ 235,00	15000	13	R\$ 0,2037
	Alcrona	3200	R\$ 235,00	R\$ 40,00	5	R\$ 435,00	16000	13	R\$ 0,3534
	Pertura	4950	R\$ 235,00	R\$ 40,00	5	R\$ 435,00	24750	13	R\$ 0,2285
	Iron	5000	R\$ 235,00	R\$ 35,00	5	R\$ 410,00	25000	13	R\$ 0,2132
Broca canhão 11,3mm	-	13000	R\$ 450,00	R\$ -	5	R\$ 450,00	65000	9	R\$ 0,0623
	Balinit C	25400	R\$ 450,00	R\$ 50,00	5	R\$ 700,00	127000	9	R\$ 0,0496

Pelo gráfico da Figura 4.13, pode-se fazer um comparativo do Custo por Peça (CPP) para cada tipo de ferramenta/revestimento.

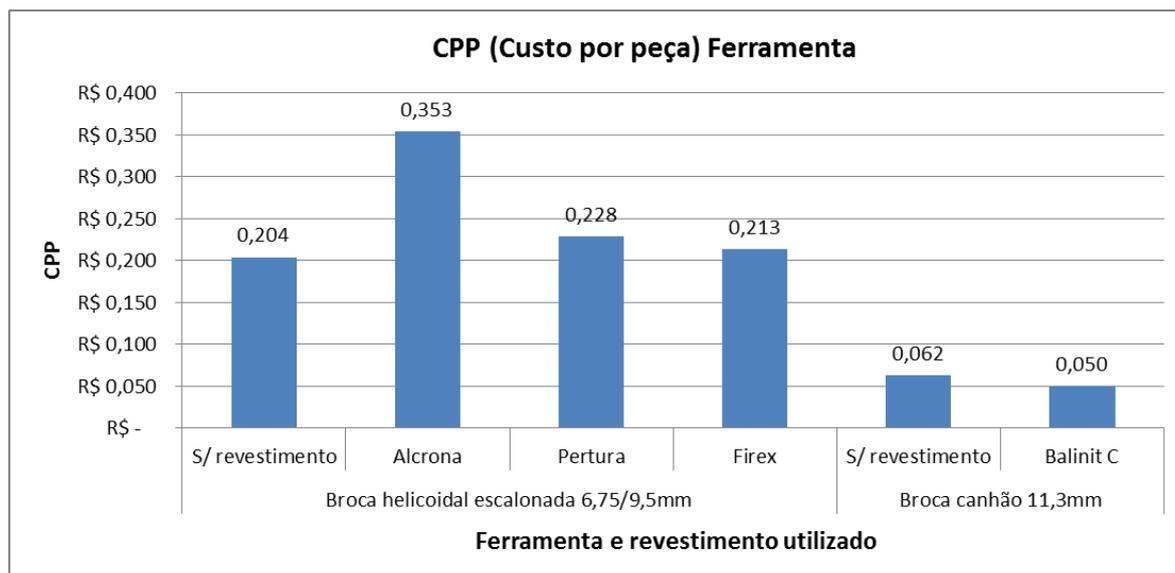


Figura 4.13- Gráfico comparativo do Custo por Peça devido ao consumo de ferramenta para cada tipo de ferramenta/revestimento.

No cálculo do CPP-troca, devido à parada de máquina por troca de ferramenta, foi considerado o tempo médio por troca de ferramenta e o custo de máquina parada por hora. Essa última informação é levantada periodicamente na empresa quando são realizadas as análises de desdobramento de custos. Nessa análise são considerados os impactos que a parada dessa máquina impacta na eficiência de toda a linha, e leva em conta basicamente custos de mão de obra e energia elétrica. O custo de máquina parada na Linha de Usinagem do Bloco é de R\$616,46/hora, dos quais R\$455,00/hora corresponde à perdas em mão de obra e R\$161,46/hora correspondem à perdas em energia elétrica. O custo de máquina parada na Linha de Usinagem do Cabeçote é de R\$442,70/hora, dos quais R\$315,00/hora corresponde à perdas em mão de obra e R\$127,70/hora correspondem à perdas em energia elétrica.

O Custo de máquina parada a cada troca, dividido pela quantidade de peças usinadas nesse intervalo retorna o CPP por troca de ferramenta, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Desdobramento dos custos por peça devido à parada de máquina por ferramenta/revestimento

Ferramenta	Revestimento	Desempenho	Tempo médio de troca (min)	Custo de máquina parada (R\$/hora)	Custo por troca (R\$)	CPP (Custo por peça) Troca
Broca helicoidal escalonada 6,75/9,5mm	S/ revestimento	3000	45	R\$ 616,46	R\$ 462,35	R\$ 0,154
	Alcrona	3200	45	R\$ 616,46	R\$ 462,35	R\$ 0,144
	Pertura	4950	45	R\$ 616,46	R\$ 462,35	R\$ 0,093
	Firex	5000	45	R\$ 616,46	R\$ 462,35	R\$ 0,092
Broca canhão 11,3mm	S/ revestimento	13000	35	R\$ 442,70	R\$ 258,24	R\$ 0,020
	Balinit C	25400	35	R\$ 442,70	R\$ 258,24	R\$ 0,010

Pelo gráfico da Figura 4.14, pode-se fazer um comparativo do Custo por Peça devido à troca de ferramenta (CPP-troca) para cada tipo de ferramenta/revestimento.

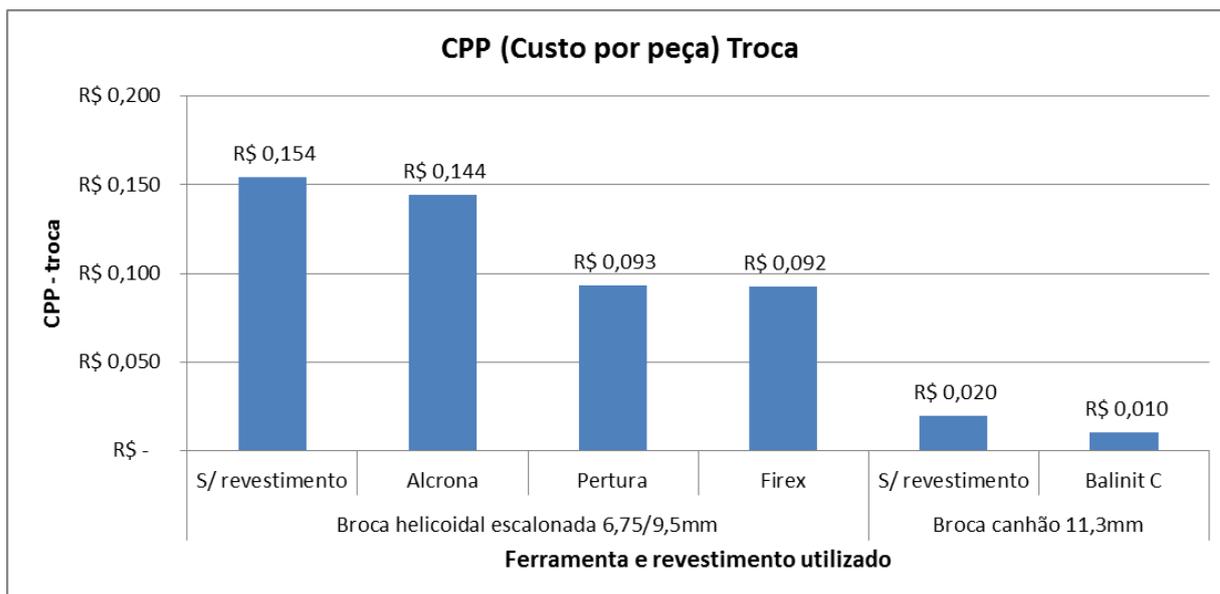


Figura 4.14 - Gráfico comparativo do Custo por Peça devido à troca de ferramenta para cada tipo de ferramenta/revestimento.

A soma dos custos por peça devido a consumo de ferramenta e devido à máquina parada por troca corresponde ao custo total por peça, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Custo por peça total por ferramenta/revestimento

Ferramenta	Revestimento	Desempenho	CPP (Custo por peça) Ferramenta	CPP (Custo por peça) Troca	CPP Total
Broca helicoidal escalonada 6,75/9,5mm	S/ revestimento	3000	R\$ 0,204	R\$ 0,154	R\$ 0,357
	Alcrona	3200	R\$ 0,353	R\$ 0,144	R\$ 0,497
	Pertura	4950	R\$ 0,228	R\$ 0,093	R\$ 0,321
	Firex	5000	R\$ 0,213	R\$ 0,092	R\$ 0,305
Broca canhão 11,3mm	S/ revestimento	13000	R\$ 0,062	R\$ 0,020	R\$ 0,086
	Balinit C	25400	R\$ 0,050	R\$ 0,010	R\$ 0,062

Pelo gráfico da Figura 4.15, pode-se fazer um comparativo do Custo por Peça devido à troca de ferramenta (CPP-troca) para cada tipo de ferramenta/revestimento.

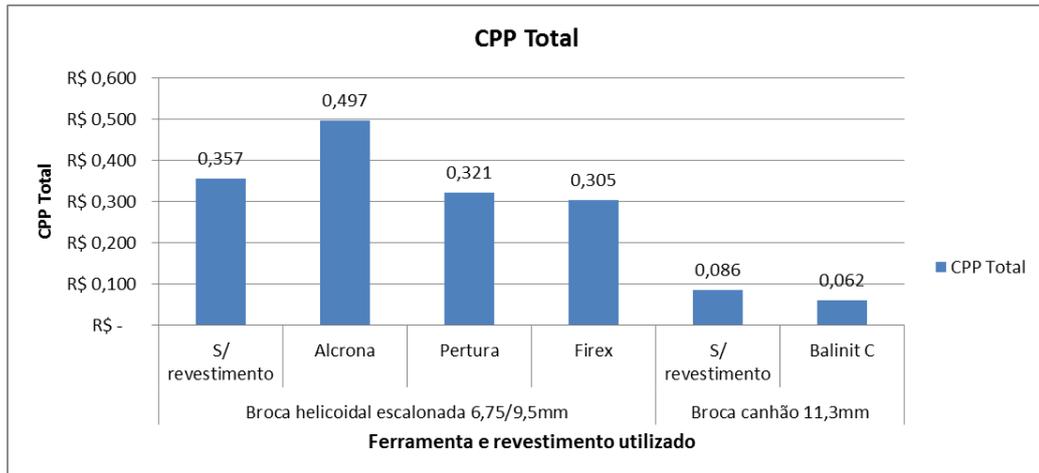


Figura 4.15 - Gráfico comparativo do Custo por Peça Total devido à troca de ferramenta para cada tipo de ferramenta/revestimento

Como se pode ver na Tabela 7, o menor custo por peça para a usinagem do Fofo com as brocas helicoidais, é atingido com a broca com o revestimento *Firex*, feito pela própria fornecedora das ferramentas, com o qual atinge um CPP de R\$0,30, frente a um CPP de R\$0,35 para a ferramenta sem revestimento. Considerando-se uma produção anual de 200000 peças (produção estimada) é possível ter uma redução de custo de R\$10000,00 com esse revestimento.

Dos revestimentos testados para a elaboração desse estudo, o revestimento *Pertura* obteve um resultado similar ao do *Firex*, com um CPP de R\$0,32, enquanto o revestimento *Alcrona* teve um resultado insatisfatório, com um CPP de R\$0,49, maior inclusive que o CPP da broca sem revestimento (o pequeno aumento da vida não compensou o custo da aplicação do revestimento).

O revestimento *Balinit C*, utilizado na broca canhão para usinagem do alumínio, teve um bom resultado, reduzindo o CPP de R\$0,086 para R\$0,061. Para uma produção anual de 200000 (produção estimada), geraria uma redução de custo de R\$5000,00.

De acordo com a Tabela 7, para os dois casos (broca canhão e helicoidal) a redução da quantidade de trocas de ferramenta tem um impacto maior no custo total do processo que o custo por consumo de ferramentas, devido ao impacto que essas trocas têm na eficiência da linha de usinagem.

Mesmo havendo uma elevação percentual maior na vida das brocas canhão (95%) do que na vida das brocas helicoidais com revestimentos Pertura (65%), conforme resultados (Tabela 8), essas últimas geram uma redução de CPP maior que as brocas canhão pelo fato de as trocas das brocas helicoidais serem mais frequentes, havendo maior impacto sobre o custo de máquina parada.

Tabela 8 – Resumo dos resultados

Ferramenta	Revestimento	Desempenho	Aumento da vida	Custo Por Peça Total (R\$)	Redução do custo por peça (R\$)	Redução do custo por peça (%)
Broca helicoidal escalonada 6,75/9,5mm	S/ revestimento	3000	-	R\$ 0,3567	-	-
	Alcrona	3200	7%	R\$ 0,4969	-R\$ 0,14	-39%
	Pertura	4950	0,65	R\$ 0,3212	R\$ 0,04	10%
	Firex	5000	67%	R\$ 0,3050	R\$ 0,19	14%
Broca canhão 11,3mm	S/ revestimento	13000	-	R\$ 0,0861	-	-
	Balinit C	25400	95%	R\$ 0,0618	R\$ 0,02	28%

Pelo gráfico da Figura 4.16, pode-se fazer um comparativo da redução do custo por peça revestimento.

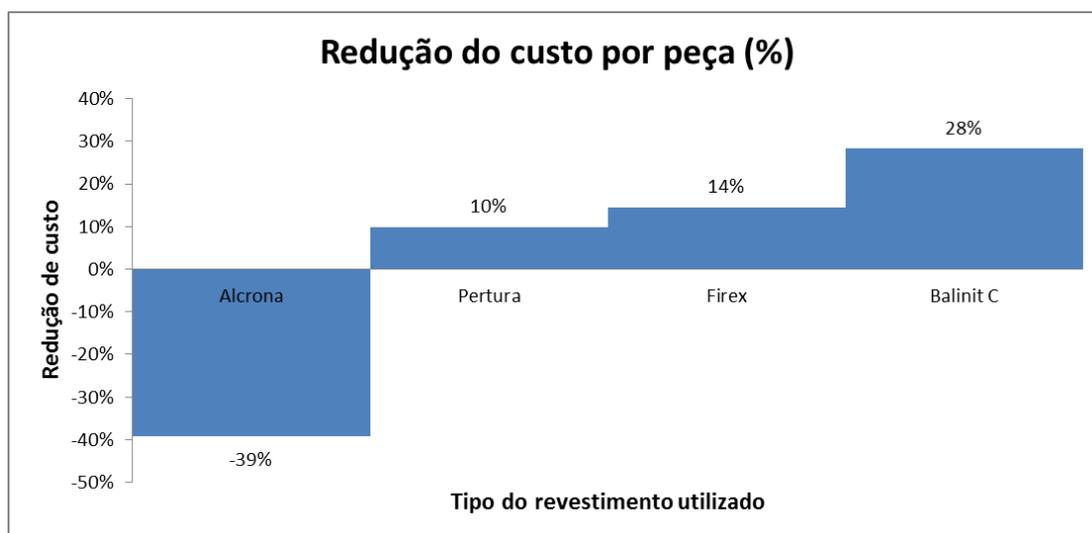


Figura 4.16 – Gráfico comparativo da redução do custo por peça para cada tipo de revestimento utilizado.

5 DIFICULDADES ENCONTRADAS

Antes e durante a realização dos testes, foram encontrados diversos fatores que vieram a tardar a realização dos testes. As dificuldades encontradas foram:

- Em função da baixa demanda de automóveis por parte do mercado, e consequentemente de motores, o volume diário produzido decaiu muito impactando diretamente na celeridade dos testes, tendo em vista que o critério de vida das ferramentas está relacionado com a quantidade de peças produzidas;
- No caso das brocas canhão, o problema da demanda foi ainda mais impactante, haja vista que para uma intervenção prolongada na linha, que foi realizada de junho a novembro de 2014, foi gerado um estoque de cabeçotes que demorou mais tempo para ser consumido que o esperado;
- As trocas de ferramenta não poderiam ser realizadas a qualquer instante, tendo em vista que as paradas de máquina não programadas impactam diretamente na eficiência diária da linha;
- As trocas de ferramenta também não poderiam ocorrer durante o terceiro turno, pois em caso de problemas, o suporte técnico da engenharia é limitado.
- Problemas de qualidade detectados nos produtos impactaram na produção realizada nessas linhas.
- Os furos do bloco, de junção com o cárter, apresentaram em dado momento erro de posição, quando medidos na Central de Medições Metrológicas. Durante o período em que não se tinha clara a causa raiz de tal problema, os testes foram bloqueados, para que os resultados de desempenho das ferramentas não fossem anulados. Depois de algumas análises, descobriu-se que estava ocorrendo erro de medição, tendo em vista que tal medição era realizada depois de usinadas as roscas desses furos, e que o furo se rosca estava com valores de posição dentro do especificado, portando estava ocorrendo interferência do formato da rosca na medição em algum ponto.

Após a correção do problema de medição, pode-se dar continuidade aos testes.

- Por questões contratuais com a fornecedora das ferramentas, tais ganhos em vida de ferramenta não eram de grande prioridade para a empresa, não havendo muito foco na realização dos testes e, portanto, tendo que haver certo trabalho de persuasão das partes envolvidas.

Apesar de parecerem ser testes relativamente simples, na rotina normal de produção esses testes tornam-se muito complicados, pelos motivos acima descritos e por outros que por ventura possam aparecer.

A partir desse ponto de vista, pode-se entender por que muitas vezes em empresas de grande porte não se utilizam as tecnologias mais avançadas disponíveis no mercado, sendo que estas podem trazer benefícios relacionados à redução de custos, melhoria dos padrões de qualidade, segurança e menor agressão ao meio-ambiente.

CONCLUSÕES

Todos os revestimentos utilizados nas brocas de metal duro acarretaram no aumento da vida útil das brocas, nas condições normais de trabalho, como era esperado.

Na usinagem da Liga de Alumínio AA C355, com brocas canhão, foi possível obter um aumento da vida da ferramenta considerável, em torno de 95% (de 13000 para 25400 peças), enquanto que na usinagem do Ferro Fundido SAE G3000, utilizando-se brocas escalonadas, o aumento na vida foi de 6% para o revestimento *Alcrona* e de 65% para o revestimento *Pertura* (de 3000 para 3200 e 4950 peças, respectivamente). Com os resultados obtidos, pode-se concluir que a usinagem no Alumínio, se for realizada com os parâmetros adequados, é bem menos severa que a usinagem do Ferro Fundido, e os revestimentos utilizados nas ferramentas respondem bem no que diz respeito ao desgaste.

Para a usinagem do alumínio deve-se atentar para que o material do revestimento utilizado não possua afinidade química com o material usinado, pois o alumínio tende a aderir à broca e formar aresta postiça, acelerando o deslocamento do revestimento e o desgaste prematuro da ferramenta.

Nas ferramentas utilizadas na usinagem do Ferro Fundido, é interessante que seja utilizado revestimento com baixo coeficiente de atrito com o material a ser usinado, retardando assim o desgaste. O revestimento *Alcrona* possui alto coeficiente de atrito com o Ferro Fundido SAE G3000, o que ocasionou o desgaste acelerado daquele revestimento.

Na usinagem do alumínio, não foi possível fazer uma relação da rugosidade do furo usinado com a presença ou não de revestimento na broca. Porém, para brocas usadas a rugosidade superficial do furo usinado era maior do que pra brocas novas, sendo que esse aumento foi mais acentuado para as brocas sem revestimento, dando um indicativo de que o revestimento desacelera o desgaste da ferramenta e esse desgaste influencia na rugosidade da superfície usinada.

Após a elaboração dos testes, pôde-se ter informação suficiente para se definir qual o revestimento mais adequado aos processos analisados, do ponto de vista

econômico. Novas tecnologias, como nesse caso, trazem à indústria ganhos consideráveis, no que diz respeito à diminuição do custo de produção, mas também podem trazer ganhos de qualidade ao produto, segurança e conforto aos colaboradores e menor impacto ao meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

Por meio deste tópico queremos deixar nosso agradecimento a todos os envolvidos neste trabalho. Ao nosso professor orientador Rodrigo Lupinacci Villanova, que nos orientou constantemente nesta empreitada. A banca avaliadora, formada pelos professores Eduardo Matos Gemer e Ricardo Fernando do Reis, que nos agraciaram com suas observações e conselhos para com este projeto. Agradecemos também a Fiat Powertrain Curitiba, que cederam suas máquinas para os testes, assim como a todos os operadores envolvidos para a coleta de dados. Agradecemos a empresa Guhring que cedeu as brocas utilizadas neste projeto, além de terem fornecido um revestimento para essas brocas e dados que utilizamos para validar a pesquisa. E um agradecimento muito especial para a empresa Oerlikon Balzers que nos cederam diferentes revestimentos utilizados neste projeto, em especial aos funcionários Adilson Maia e Alberto, que nos acompanharam e auxiliaram durante os testes.

REFERÊNCIAS

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 3.ed. São Paulo: Artliber, 2001. 244 p.

EXAME. **Revista Exame**. Editora Abril Ltda. Disponível em < <http://exame.abril.com.br/>>. Acesso em: 20 de junho de 2014.

FERNÁNDEZ A, BARREIRO J, FERNÁNDEZ L, LÓPEZ L, FERNÁNDEZ V, Pereira OM. **Behaviour of PVD coatings in the turning of austenitic stainless steels**. The manufacturing engineering society international conference, 2013.

FERRARESI, DINO; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS (Coord.) **Usinagem dos metais**. 4. Ed. São Paulo: ABM, 1972. 1 v. (várias paginações)

OERLIKON. **Oerlikon Balzers**. Disponível em < <http://www.oerlikon.com/balzers/> >. Acesso em: 20 de junho de 2014.

GUHRING. **Guhring**. Disponível em < <http://www.guhring.com.br/> >. Acesso em: 18 de janeiro de 2015.

OLIVEIRA V, BERKENBROCK E, ARIAS M, SOUZA A, BELTRÃO P. Influência do revestimento na vida útil de brocas de metal duro na usinagem do aço AISI P20. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Agosto 2010.

METALMECANICA. **Rota Metalmecânica**. Disponível em < <http://rotametalmecanica.wordpress.com/>>. Acesso em: 20 de junho de 2014.

SANDVIK. **Sandvik Coromant**. Disponível em <<http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/pages/default.aspx?country=br/>>. Acesso em: 07 de janeiro de 2015.

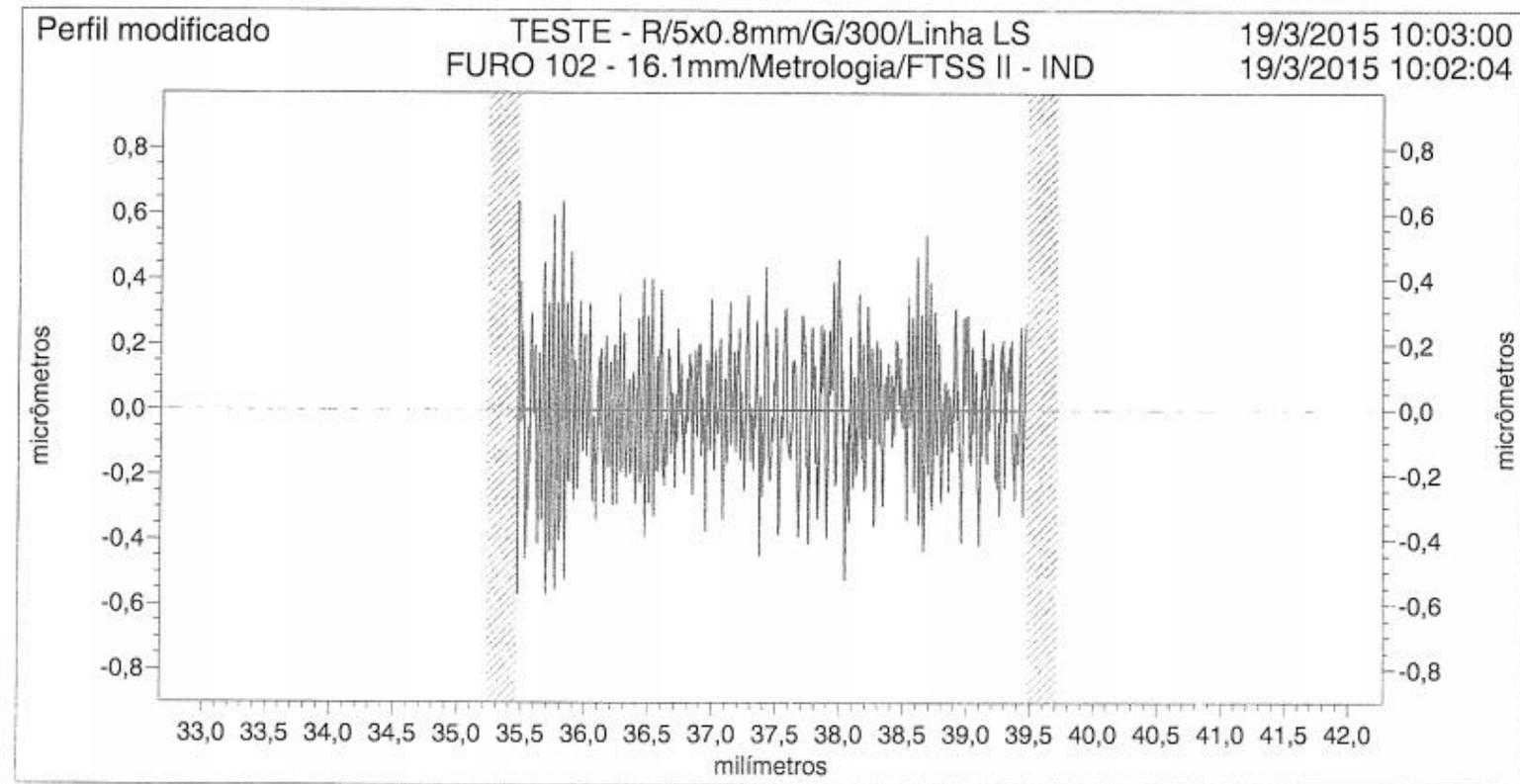
STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de corte I**. 5. Ed. Florianópolis: UFSC, 2001. 249 p. (Didática)

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos e abrasivos**. 2. Ed. rev. e ampl. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995. 314 p. (Didática).

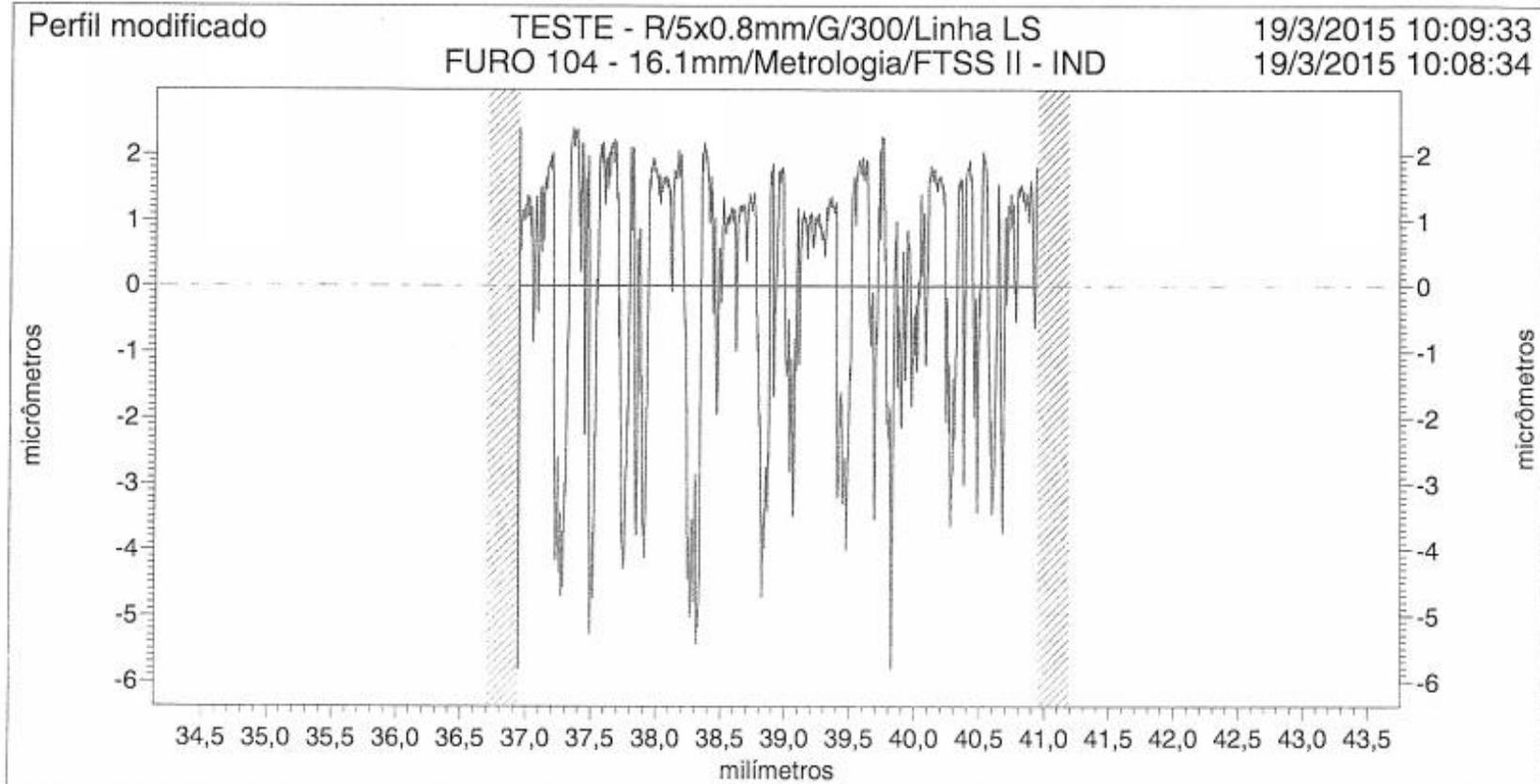
VIANA R, MACHADO A. **Furação de uma liga Al-Si com brocas de aço rápido revestidas**. 15º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia 2005.

WEINGAERTNER, Walter Lindolfo; SCHROETER, Rolf Sertrand. **Tecnologia de usinagem do alumínio e suas ligas**. 2 ed. São Paulo: Alcan Alumínio do Brasil, 1991.

**ANEXO I MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DOS FUROS DO CABEÇOTE USINADOS COM BROCA CANHÃO
SEM REVESTIMENTO – 1ª PEÇA**

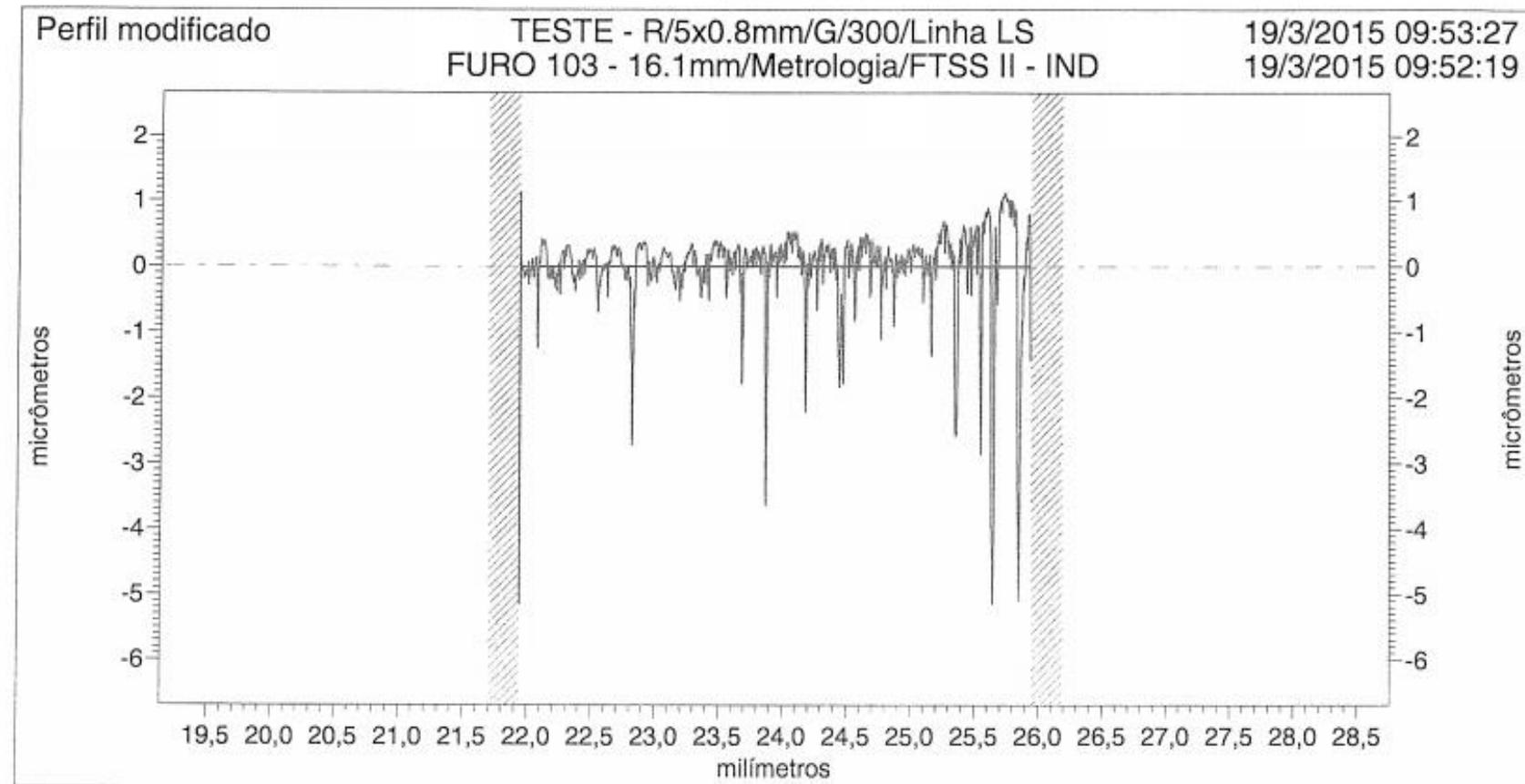


Ra	0,1490	μm			
	Rt	1,2038	μm		
	Rz	0,9661	μm		

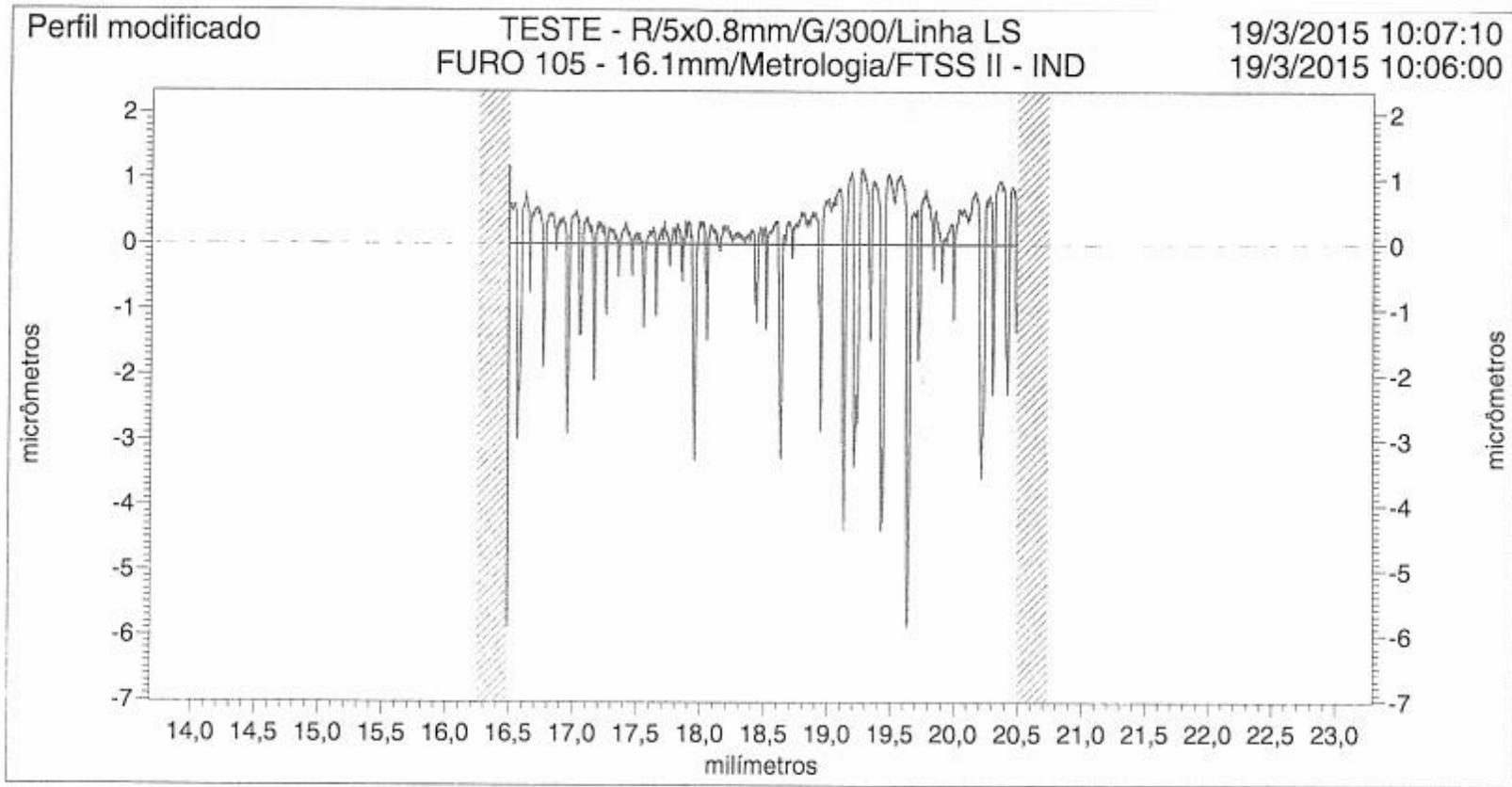


Ra	1,5808	μm		
	Rt	8,2130	μm	
	Rz	7,1504	μm	

**ANEXO II MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DOS FUROS DO CABEÇOTE USINADOS COM BROCA
CANHÃO COM REVESTIMENTO – 1ª PEÇA**

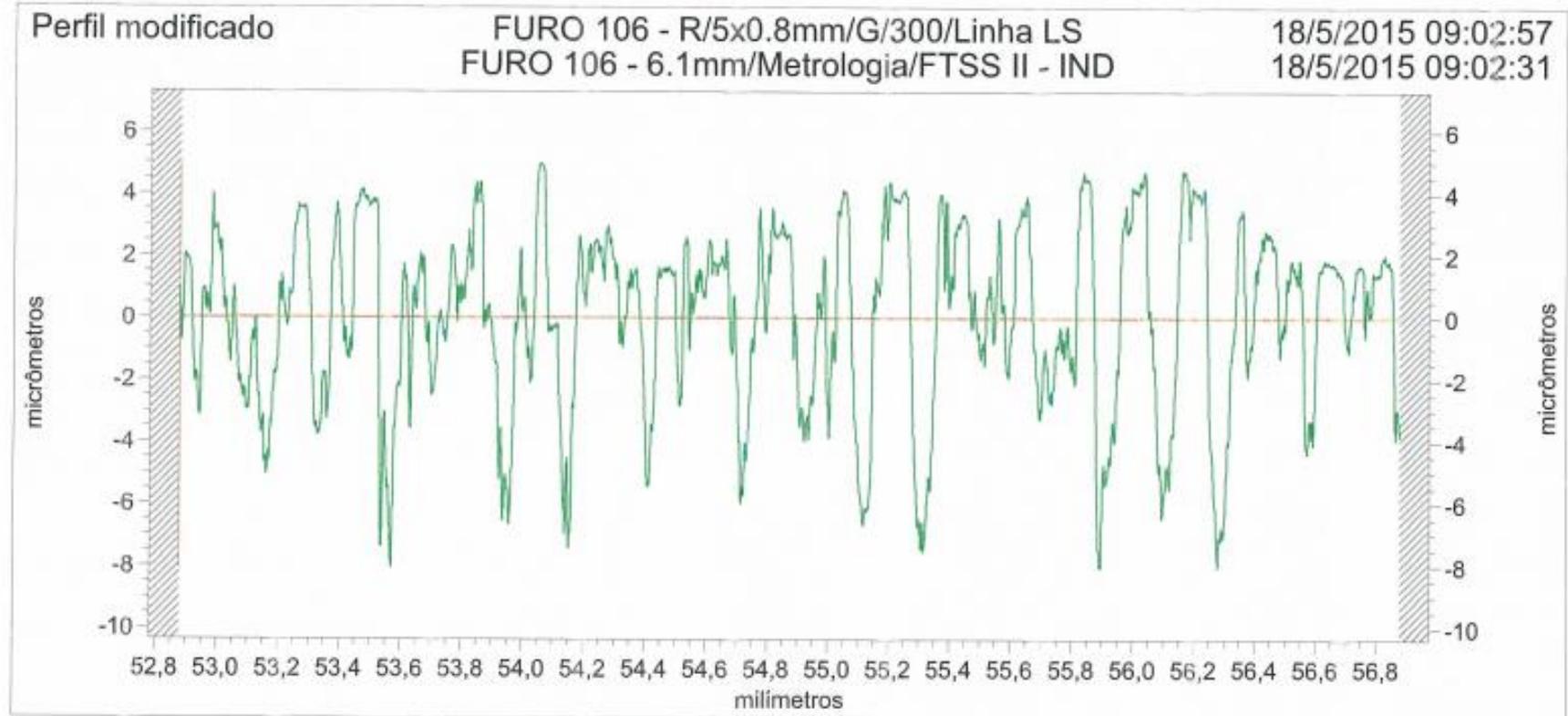


Ra	0,3673	μm			
	Rt	6,2712	μm		
	Rz	3,5104	μm		



Ra	0,6295	µm		
	Rt	7,0496	µm	
	Rz	4,5582	µm	

**ANEXO III MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DOS FUROS DO CABEÇOTE USINADOS COM BROCA
CANHÃO SEM REVESTIMENTO – ÚLTIMA PEÇA (PEÇA Nº12400)**



Ra	2,3662	μm				
		Rt	13,0321	μm		
		Rz	12,2424	μm		

**ANEXO IV MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DOS FUROS DO CABEÇOTE USINADOS COM BROCA
CANHÃO COM REVESTIMENTO – ÚLTIMA PEÇA (PEÇA Nº 25400)**

