

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**MATHEUS AUGUSTO KLOSOVSKI LIKES**

**INVESTIGAÇÃO DE DESVIOS GEOMÉTRICOS NA FURAÇÃO DE  
AÇO AVANÇADO DE ALTA RESISTÊNCIA STRENX® 700 COM  
FERRAMENTAS DE AÇO-RÁPIDO REVESTIDAS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**GUARAPUAVA**

**2019**

MATHEUS AUGUSTO KLOSOVSKI LIKES

**INVESTIGAÇÃO DE DESVIOS GEOMÉTRICOS NA FURAÇÃO DE  
AÇO AVANÇADO DE ALTA RESISTÊNCIA STRENX® 700 COM  
FERRAMENTAS DE AÇO RÁPIDO REVESTIDAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito para aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2.

Orientadora: Profa. Dra. Sílvia do Nascimento Rosa

GUARAPUAVA

2019



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Câmpus Guarapuava  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Coordenação de Engenharia Mecânica  
Engenharia Mecânica



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

**INVESTIGAÇÃO DE DESVIOS GEOMÉTRICOS NA FURAÇÃO DE AÇO AVANÇADO DE ALTA RESISTÊNCIA STRENX 700 COM FERRAMENTAS DE AÇO-RÁPIDO REVESTIDAS**

por

**MATHEUS AUGUSTO KLOSOVSKI LIKES**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 5 de julho de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho

\_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_  
(Sílvia do Nascimento Rosa)  
Prof.(a) Orientador(a)

\_\_\_\_\_  
(Aldo Przybysz)  
Membro titular

\_\_\_\_\_  
(Ricardo Vinicius Bubna Biscaia)  
Membro titular

## RESUMO

Esta pesquisa investigou o comportamento de duas brocas comerciais de aço rápido - Dormer A100 revenida a vapor com afiação padrão e Dormer A002 revestida com TiN e afiação em cruz - na furação de um aço avançado de alta resistência (AHSS), o aço Strenx<sup>®</sup> 700 da marca SSAB. Objetivou-se caracterizar o aço e eleger, através das análises de rugosidade, circularidade e diâmetro dos furos, a broca com melhor desempenho. No experimento foram feitas réplicas para cada broca, para então ser realizada a medição das tolerâncias e rugosidades dos furos. Pela caracterização do aço Strenx<sup>®</sup> 700, que foi feita através de espectrômetro de fluorescência de raio-X, microscopia ótica e eletrônica por varredura, durômetro e microdurômetro, concluiu-se que este é um AHSS martensítico. Os parâmetros de rugosidade foram inconclusivos para contribuir na decisão de qual broca teve melhor performance. Já os resultados da circularidade no início e no fim dos furos feitos pela broca A002 foram inferiores ao da broca A100. Considerando os parâmetros utilizados, a broca A100 apresentou melhor desempenho.

Palavras-chave: aço-rápido, revenimento a vapor, TiN, tolerâncias.

## **ABSTRACT**

This research investigated the behavior of two commercial steel drills - Dormer A100 standard edging steam-annealed and Dormer A002 cross-edged coated with TiN - in the drilling of an advanced high strength steel (AHSS), Strenx<sup>®</sup> 700 of SSAB. The purpose of this study was to select the best drill through the analyzes of roughness, circularity and diameter of the holes. In the experiment, three replicates were made for each coating, so that the tolerances and roughness of the holes were measured. Due to the characterization of Strenx<sup>®</sup> 700 Steel, which was made using an X-ray fluorescence spectrometer, optical and scanning electron microscopy, durometer and microdurometer, it was concluded that this is a martensitic AHSS. The roughness parameters were inconclusive to contribute to the decision of which drill had the best performance. The results of the circularity at the beginning and at the end of the holes made by the drill A002 were worse than the drill A100. Considering the parameters used, the drill A100 presented a better cost-benefit.

Keywords: HSS, steam-annealed, TiN, tolerances.

## **AGRADECIMENTOS**

À professora Sílvia do Nascimento Rosa, pela orientação, pelo suporte constante em todas as etapas deste trabalho, e pela oportunidade de aprendizado inestimável.

Aos técnicos dos laboratórios de Engenharia Mecânica da UTFPR campus Guarapuava: Lucas Franco Wrege pelo auxílio nas medições de dureza e em especial à Adriana do Nascimento e Silva, pelo auxílio nos experimentos e pela oportunidade de aprender com sua experiência.

Ao professor Everson do Prado Banczek da Unicentro campus CEDETEG, por disponibilizar a medição com o espectrômetro. Ao professor Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz da UTFPR campus Ponta Grossa, por disponibilizar o Laboratório de Materiais e auxiliar na utilização dos equipamentos. Ao professor Pericles Secco Cancian da UTFPR campus Ponta Grossa, por disponibilizar os equipamentos para verificação do desgaste das brocas.

À COEME e à DIRGRAD pela bolsa de auxílio a execução deste trabalho.

À toda minha família, presente em todos os momentos da minha vida e razão de todas as minhas conquistas. Em especial aos meus pais, Mirian Angélica Klosovski Likes e Davi Augusto Likes.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Nomenclatura de uma broca helicoidal.....	16
Figura 2 – Desempenho das brocas de aço-rápido .....	23
Figura 3 – Interpretação da tolerância de circularidade .....	26
Figura 4 – Comparação entre os comprimentos de onda .....	27
Figura 5 – Parâmetros Rp, Rv, Rt e Xs.....	28
Figura 6 – Interpretação do desvio aritmético - Ra .....	39
Figura 7 – Fluxograma da metodologia utilizada .....	30
Figura 8 – Dimensões do corpo de prova .....	32
Figura 9 – Brocas utilizadas .....	33
Figura 10 – Fixação do corpo de prova .....	34
Figura 11 – Máquina de medir por coordenadas .....	35
Figura 12 – Rugosímetro portátil .....	35
Figura 13 – Micrografia Aço Strenx 700.....	38
Figura 14 – MEV Strenx 700 .....	39
Figura 15 – Distribuição da composição de Fe, Mn e Si.....	40
Figura 16 – Distribuição da composição de Cr, Al e Cu.....	41
Figura 17 – Ampliação da região de corte .....	43
Figura 18 – Comparação dos parâmetros Ra iniciais .....	44
Figura 19 – Comparação dos parâmetros Rt iniciais .....	45
Figura 20 – Comparação dos parâmetros Ra finais.....	46
Figura 21 – Comparação dos parâmetros Rt finais.....	46
Figura 22 – Revenido – Diâmetros Iniciais .....	47
Figura 23 – Revenido – Circularidades Iniciais .....	48
Figura 24 – Revenido – Circularidades Finais .....	49
Figura 25 – TiN – Diâmetros Iniciais.....	50
Figura 26 – TiN – Circularidades Iniciais .....	51
Figura 27 – TiN – Circularidades Finais.....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos AHSS de acordo com a tensão de ruptura .....	24
Tabela 2 – Composição química do Aço Strenx 700.....	31
Tabela 3 – Propriedades mecânicas do Aço Strenx 700.....	31
Tabela 4 – Elementos de liga do Aço Strenx 700.....	38
Tabela 5 – Resultados de dureza macro e micro .....	38
Tabela 6 – Resumo dos resultados de medição de circularidade e diâmetro .....	53



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA .....	11
1.2 JUSTIFICATIVA .....	12
1.3 OBJETIVOS .....	13
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>14</b>
2.1 PROCESSOS DE USINAGEM .....	14
2.2 PROCESSO DE FURAÇÃO .....	15
2.3 BROCAS HELICOIDAIS .....	16
2.4 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS .....	17
2.5 REVESTIMENTOS .....	20
2.5.1 NITRETO DE TITÂNIO - TiN .....	21
2.5.2 REVENIMENTO A VAPOR .....	21
2.5.3 ESTUDO DE CASO - REVESTIMENTOS .....	22
2.6 AÇOS AHSS .....	23
2.7 TOLERÂNCIAS DO PROCESSO DE FURAÇÃO .....	25
2.7.1 ERRO DE CIRCULARIDADE .....	26
2.7.2 RUGOSIDADE .....	27
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>30</b>
3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	30
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS .....	30
3.2.1 AÇO STRENX 700 .....	30
3.2.2 CORPOS DE PROVA .....	32
3.2.3 BROCAS .....	33
3.3 USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA .....	33
3.4 ANÁLISE DA QUALIDADE DOS FUROS .....	34
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>37</b>
4.1 ANÁLISE DO MATERIAL .....	37
4.2 ANÁLISE DAS BROCAS .....	42
4.3 PARÂMETROS DE RUGOSIDADE .....	44
4.4 DIÂMETRO E CIRCULARIDADE .....	47
4.4.1 RESULTADOS DA BROCA REVENIDA A VAPOR .....	47
4.4.2 RESULTADOS DA BROCA REVESTIDA COM TiN .....	49
4.4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS .....	52
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>53</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>54</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TiN	Nitreto de titânio
TiC	Carboneto de titânio
Ni	Níquel
WC	Carboneto de tungstênio
Co	Cobalto
TiCN	Carbonitreto de titânio
TiAlN	Nitreto de titânio alumínio
MQF	Mínima quantidade de fluido
Sut	<i>Ultimate Tensile Strength</i> (resistência a ruptura)
L/D	Razão profundidade/diâmetro do furo

## 1 INTRODUÇÃO

Boa parte do aumento da produtividade em diferentes processos de usinagem ocorreu devido à introdução de novos materiais de ferramentas. Porém, o processo de furação, apesar de ser um dos mais utilizados na indústria manufatureira, não seguiu este avanço devido ao obstáculo das máquinas convencionais em acompanhar o aumento da velocidade de corte, necessário para utilização de brocas em metal duro por exemplo. Por este motivo, a maior parte das operações de furação ainda é realizada com aço rápido com ou sem revestimento (DINIZ et al., 2014).

Buscando ofertar mais uma contribuição ao processo de furação que utiliza aço-rápido como ferramenta de corte, este trabalho tem como objetivo investigar a qualidade dos furos em Aço Strenx<sup>®</sup> comparando duas brocas com afiações e revestimentos diferentes, Dormer A100 revenida a vapor e afiação padrão, e Dormer A002 revestida com TiN e afiação em cruz.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Na última década, a demanda por segurança, desempenho e economia levou ao desenvolvimento de ligas muito complexas, que atendem a atual necessidade de materiais com propriedades mecânicas rigorosas. Neste contexto, os aços avançados de alta resistência - do inglês AHSS (*Advanced High Strength Steels*) - oferecem uma ampla aplicação no ramo automobilístico, devido a sua alta resistência (tensão de ruptura pode chegar até 1500 MPa) e conformabilidade (possibilitando o dimensionamento de peças mais leves e chapas mais finas), propriedades que afetam diretamente dois parâmetros essenciais em um veículo: consumo e segurança (RADWANSKI et al., 2015; KUZIAK et al., 2008; AYDIN et al., 2012).

Strenx<sup>®</sup> é um aço AHSS da empresa sueca SSAB, que está sendo comercializado no Paraná. O material foi adquirido através de um fornecedor de Ponta Grossa, o qual trabalha com diversas espessuras de chapas. Dado o aumento do desempenho quando ele substitui aços estruturais comuns, pode ser aplicado em estruturas de carga de caminhões, caçambas e basculantes. Tal mudança acarreta uma diminuição de peso e numa conseqüente redução da emissão de gases poluentes (SSAB, 2018).

Com o uso mais frequente de materiais de alta resistência para a fabricação de componentes, as ferramentas utilizadas nos processos de fabricação para dar forma e acabamento a estes também devem utilizar materiais resistentes. Mas, muitas vezes é preferível aumentar a produtividade das ferramentas por meio de tratamentos superficiais a procurar por um novo material. Isso é uma realidade das ferramentas utilizadas para o processo de furação, como por exemplo, em brocas de aço rápido (DINIZ et al., 2014).

Frequentemente tem se observado o uso de dois revestimentos para brocas de aço-rápido, o TiN e o revenido a vapor. A broca revestida com TiN apresenta um custo 12,6% maior que o da broca revenida. Considerando que uma empresa estará interessada numa opção que ofereça qualidade aliada a custo, o objetivo desta pesquisa é analisar qual dessas opções de broca no mercado tem o melhor desempenho na furação do aço Strenx®.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A produção de furos é um dos processos de usinagem mais antigos e amplamente utilizados (SME, 1983). Por exemplo, chassis, guindastes, equipamentos agrícolas e demais estruturas mecânicas, terão uma quantidade razoável de furos. Nestes componentes, provavelmente, materiais resistentes e sustentáveis estarão cada vez mais sendo utilizados.

Se em uma das etapas da reprodução de uma peça em aço Strenx® for realizada o processo de furação, o material da ferramenta deve atender as recomendações de usinagem do fabricante. Para estas situações, considera-se a utilização de ferramentas de metal duro, cerâmicas e ultraduros. Porém, uma forte vantagem do aço-rápido é o custo. Segundo DINIZ et al. (2014), o custo do material é um dos fatores a ser analisado numa escolha criteriosa de ferramenta. O autor comenta que, muitas vezes um material que propicia uma maior produtividade, não apresenta uma relação entre custo e benefício razoável.

Assim, percebe-se que a broca helicoidal de aço-rápido pode ser uma possível escolha para furação no aço Strenx®. Deparando-se com as opções de revestimento em TiN e revenido a vapor, o consumidor pode se questionar qual dessas ferramentas atenderá melhor a sua necessidade de qualidade e produção.

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é investigar o desempenho das brocas de aço rápido na qualidade dos furos em Aço Strenx<sup>®</sup>, concluindo então qual das ferramentas - TiN com afiação em cruz ou revenido a vapor com afiação padrão – apresentará a melhor viabilidade entre custo e benefício.

A comparação dos desempenhos das brocas será feita a partir da análise da qualidade dos furos, pela investigação dos desvios geométricos de forma (circularidade) e de rugosidade, e pela investigação dos desgastes das brocas. Para este resultado ser interpretado corretamente, serão conceituados: processos de usinagem e furação, brocas helicoidais e materiais para ferramentas, revestimentos, aços avançados de alta resistência (AHSS) e tolerâncias no processo de furação.

A caracterização do aço foi feita através de ensaios de dureza e microdureza, análise de liga com espectrômetro de fluorescência de raio-X, análise da micrografia e microscopia eletrônica por varredura.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 PROCESSOS DE USINAGEM

Denomina-se usinagem o processo de fabricação que, dando forma ou dimensão a uma peça, retira material na forma de cavaco. Por cavaco, entende-se uma porção de material com geometria irregular, retirado da peça por alguma forma de energia. Essa forma de energia empregada permite classificar o processo de usinagem em convencional e não convencional. Na usinagem convencional, retira-se material pelo cisalhamento de uma ferramenta de corte na peça, sendo torneamento, fresamento e furação as três operações de corte mais utilizadas. Já na usinagem não convencional, faz-se uso de outras formas de energia para remoção de cavaco, por exemplo, laser, plasma, reações químicas, geometria não definida etc. (MACHADO et al., 2009; SHAW, 2005; SANTOS e SALES, 2007).

De todos os processos utilizados para conferir forma aos metais, a usinagem é a que apresenta as mais variadas condições de operação. Por exemplo, uma peça da asa de uma aeronave com vários metros de comprimento pode ser obtida através da usinagem, assim como pequenas estruturas mecânicas com dimensão de apenas alguns milímetros. Analisando também a fabricação de um automóvel, a usinagem convencional apresenta-se essencial para a indústria, já que boa parte dos itens que compõe um veículo é usinada (TRENT; WRIGHT, 2013; SANTOS e SALES, 2007).

Segundo Machado et al. (2009), em 1985 cerca de 10% de toda produção de metais era transformada em cavacos, empregando dezenas de milhões de pessoas. O mercado ligado a usinagem é concorrido, exigindo que os profissionais estejam constantemente se aprimorando para estarem cientes da complexidade dos mecanismos existentes no corte dos materiais, para assim poderem melhorar o processo (SANTOS e SALES, 2007). Como qualquer atividade industrial, na usinagem existe a busca incessante por uma melhor razão entre custo e produção, fazendo com que a seleção inteligente de ferramentas e parâmetros de corte seja essencial para potencialização do processo (SHAW, 2005).

## 2.2 PROCESSO DE FURAÇÃO

A furação é um processo de usinagem que tem como objetivo a criação de um furo cilíndrico em uma peça (GROOVER, 2010). O processo utiliza ferramentas denominadas brocas, que podem ser de diversos tipos, tais como: brocas chatas, brocas helicoidais, brocas canhão, brocas ocas etc. (STEMMER, 1995). Cada tipo de broca possui suas peculiaridades, porém as brocas helicoidais são utilizadas em boa parte das operações de furação. Brocas especiais devem ser utilizadas em casos mais específicos quando, por exemplo, tem-se um furo profundo ( $L/D > 5$ ), sendo então empregadas brocas tipo canhão, brocas ocas de trepanação etc. (DINIZ et al., 2014).

As operações de furação são realizadas em condições relativamente severas se comparadas a outros processos de corte, pois a velocidade de corte não é uniforme, mas varia de zero no centro do furo até um máximo na periferia da ferramenta (STEMMER, 1995). Isso faz com que seja muito comum a formação de aresta postiça de corte (APC), nas regiões próximas ao centro do furo.

A APC é uma porção do cavaco que adere à aresta cortante da ferramenta, modificando seu comportamento em relação à força de corte, acabamento superficial e desgaste excessivo. A formação de APC se dá com baixas temperaturas de corte, conseqüentemente em baixas velocidades de corte (DINIZ et al., 2014).

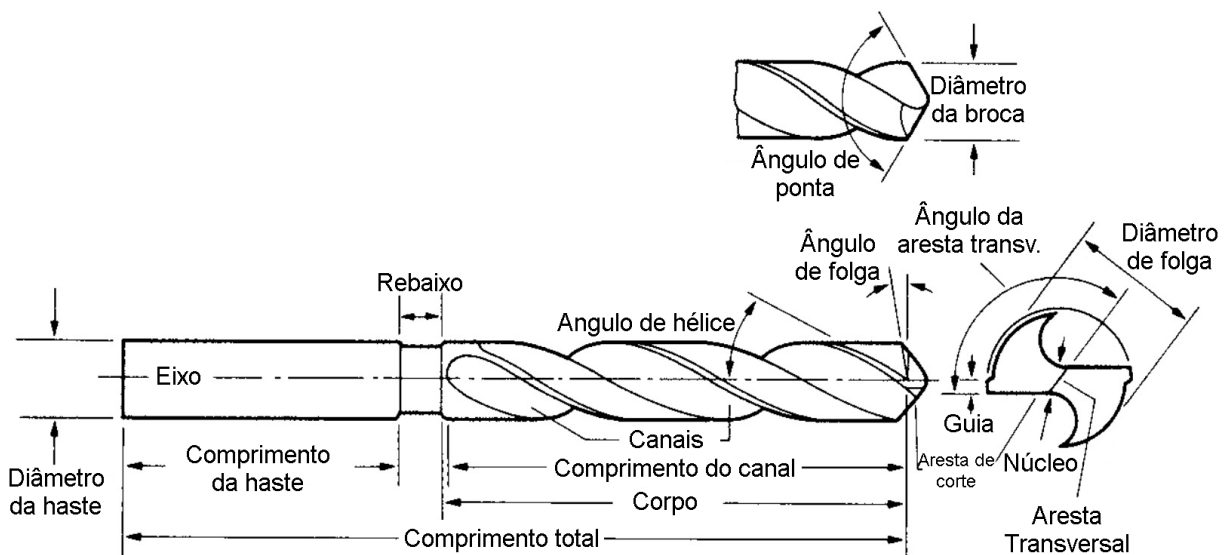
Outra dificuldade encontrada na furação é a remoção do cavaco. Devido a profundidade do furo, muitas vezes faz-se necessária a interrupção da operação para que o cavaco e o calor possam ser removidos. O aumento da velocidade de avanço facilita a quebra e remoção do cavaco dentro do furo, porém, a partir de um certo limite, este aumento pode resultar na quebra da ferramenta. A utilização de fluido de corte em brocas com canais internos que possibilitam a introdução de fluido pressurizado diretamente na região do furo ajuda na dissipação do calor e remoção do cavaco. No entanto, estas brocas possuem um custo elevado. A remoção do cavaco ainda pode ser intensificada pela utilização da furação intermitente, que retira e introduz a broca no furo ao longo do processo. Porém, tal método aumenta os tempos passivos de corte (DINIZ et al., 2014).

## 2.3 BROCAS HELICOIDAIS

Neste estudo serão utilizadas brocas helicoidais, uma ferramenta muito comum e de extrema importância na usinagem, porém complexa, com várias variáveis de projeto que alteram seu desempenho (SHAW, 2005, TRENT; WRIGHT, 2013). As principais variáveis de projeto que determinam o desempenho de uma broca são o ângulo de hélice, a espessura do núcleo e o ângulo de ponta, que podem ser observados na **Figura 1**. Os valores mais comuns encontrados para essas variáveis são ângulo de hélice entre  $28^\circ$  a  $32^\circ$ , ângulo de ponta de  $118^\circ$  e ângulo de folga entre  $8^\circ$  a  $12^\circ$  (SHAW, 2005).

Segundo Diniz et al. (2014), a broca com esses valores possui aplicação geral. Já para aços-liga mais duros, são frequentemente utilizados ângulo de ponta de  $135^\circ$  e ângulo de folga entre  $6^\circ$  a  $9^\circ$ . Shaw (2005) comenta também que, para materiais muito moles, como por exemplo, na furação de plásticos, é comum a utilização de brocas com ângulos de ponta em torno de  $100^\circ$ .

**Figura 1 - Nomenclatura de uma broca helicoidal**



Fonte: traduzido e adaptado de Shaw (2005, P. 411).

Na Figura 1 também são indicadas partes importantes da broca como haste, guias, diâmetros, núcleo, canais, arestas, entre outras. A haste serve para fixar a broca na máquina feita com o auxílio de mandris (para brocas de diâmetros até 15 mm) ou em cones morse (para diâmetros maiores) (DINIZ et al., 2014).



As guias são as superfícies externas da broca, que estão em contato com as paredes do furo durante o processo. Elas possuem diâmetro maior que as paredes da broca e orientam a sua direção durante a usinagem, evitando também que toda a superfície da ferramenta atrite com o furo. O diâmetro da broca é medido entre as duas guias (DINIZ et al., 2014).

O núcleo é a parte interior com diâmetro igual a uma fração do diâmetro da broca, e serve para conferir rigidez à ferramenta. As superfícies pelas quais se dá a saída do cavaco são denominados canais (DINIZ et al., 2014).

Quanto às arestas de corte, uma broca helicoidal típica apresenta duas arestas que se encontram numa terceira aresta chamada aresta transversal de corte (DINIZ et al., 2014).

Para que o processo de furação ocorra, as arestas e os canais da broca participam ativamente dos principais mecanismos da operação. O processo é iniciado por um pequeno furo feito pela aresta transversal, e a partir disso, as arestas de corte começam a formar o cavaco pela ação do cisalhamento. Em seguida, o cavaco é escoado para fora do furo pelos canais helicoidais, e por fim, a broca continua o furo sendo conduzida pelas guias (SHAW, 2005).

O procedimento de furação demonstra-se simples, porém para que ele ocorra a broca helicoidal deve aliar variáveis construtivas conflitantes, como a presença de um núcleo pequeno para reduzir a pressão de corte, porém um núcleo grande confere mais resistência a torção; canais largos para escoar o cavaco mais facilmente, mas canais pequenos conferem maior rigidez torcional; um aumento no ângulo de hélice para remoção mais rápida de cavaco, no entanto uma diminuição do ângulo de hélice também é interessante para conferir uma aresta de corte mais rígida (SHAW, 2005).

## **2.4 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS**

Uma ferramenta de corte ideal requer propriedades de alta dureza a quente, boa tenacidade, condutividade térmica e estabilidade química. A dureza a quente é essencial para o desempenho de uma ferramenta, já que ela é submetida a elevadas tensões e temperaturas. Presença de boa tenacidade garante à ferramenta resistência ao choque, necessária na realização de corte interrompido, como por exemplo, no fresamento, onde cada aresta de corte não está continuamente em contato com a peça, mas se choca com ela constantemente. Uma boa condutividade térmica

proporciona uma melhor distribuição de temperatura, o que torna o efeito térmico menos danoso. A existência de um baixo coeficiente de expansão volumétrica é fundamental para perpetuar as dimensões da ferramenta durante o corte, contribuindo para as tolerâncias da peça usinada. Finalmente, a inércia química garante que não ocorram reações químicas entre a ferramenta e a peça, o que danificaria suas propriedades (SANTOS e SALES, 2007).

Se for analisada a ordem crescente de dureza a quente dos principais materiais de ferramentas, essa seria aço carbono, aço-rápido, ligas fundidas, carboneto de tungstênio, cermets, carboneto de titânio, cerâmicas e materiais ultraduros. Como a velocidade é o parâmetro de corte que mais influencia na vida da ferramenta, é possível concluir que, quanto maior a dureza a quente, maior a capacidade da ferramenta de operar numa velocidade de corte mais alta, já que a temperatura de corte também é proporcional a velocidade de corte (DINIZ et al., 2014; MACHADO et al., 2009).

O aço carbono foi o primeiro material de ferramenta a ser utilizado amplamente na usinagem. Ele foi desenvolvido no século 18 e apresenta acentuada queda de dureza em elevadas temperaturas. Com a descoberta do aço rápido (aços que possuem alto teor de molibdênio (série M) e tungstênio (série T) em sua composição), foi possível o aumento da velocidade de corte, fato que na década de 1900 deu origem ao seu nome. Outros elementos de liga que também se fazem presentes em sua composição são cromo, vanádio, cobalto e nióbio. O tungstênio e o molibdênio formam os carbonetos responsáveis por conferir resistência ao desgaste e dureza à ferramenta. O tungstênio sempre está presente no aço-rápido, e o molibdênio surge como seu substituto. Por ter um peso atômico menor, o molibdênio pode gerar uma quantidade maior de carbonetos se comparado a uma mesma proporção de tungstênio. O vanádio proporciona o carboneto mais duro presente no aço-rápido, e as ferramentas com alto teor de vanádio e carbono geralmente são as que apresentam maior resistência ao desgaste. No Brasil, vanádio tem sido substituído pelo nióbio, que apresenta características parecidas, porém é mais barato. O cromo juntamente com o carbono é o principal responsável pela boa capacidade de endurecimento do aço-rápido. Por fim, o cobalto aparece com o intuito de elevar a dureza a quente, que é uma característica essencial de uma ferramenta de corte, sendo então um elemento de liga recomendado em ferramentas de desbaste pesado ou presença de cavacos

curtos, onde a utilização de fluidos de corte é mais restrita devido à penetração do cavaco com fluido nas partes da máquina (DINIZ et al., 2014).

As ligas fundidas a base de cobalto surgiram na mesma época dos aços rápidos (contendo também tungstênio, cromo e carbonetos), porém eram mais duras e capazes de manter a dureza a temperaturas mais elevadas. No entanto elas caíram em desuso devido à falta de matéria prima e ao desenvolvimento de tratamentos superficiais em outros materiais mais eficientes (SANTOS e SALES, 2007).

Na década de 1920, Schröter na Alemanha, produziu o carboneto de tungstênio em pó e a mistura deste carboneto com o cobalto também em pó, trouxe ao mercado as ferramentas de metal duro. Superando o aço-rápido em dureza e resistência ao desgaste, foi apelidado pelos alemães de Widia - *Wie diamant*, como o diamante. Mais tarde foi introduzido no metal duro o carboneto de titânio, que apresentando dureza maior que o carboneto de tungstênio, reduziu a craterização na usinagem de aços, desgaste comum que ocorria na superfície de saída de ferramentas compostas apenas por WC + Co, devido ao atrito entre a ferramenta e o cavaco (SANTOS e SALES, 2007).

Na década de 1950 começaram os avanços em ferramentas não metálicas, que deram origem aos materiais cerâmicos, cermets e ultraduros. As cerâmicas são compostas por elementos metálicos e não metálicos, geralmente na forma de óxidos, carbonetos e nitretos. Esse material apresenta em sua maioria estrutura cristalina formada por ligações iônicas ou covalentes. Sendo materiais refratários, suas ferramentas possuem alta capacidade de manter a resistência mecânica em altas temperaturas. Outra classe de material é o cermets, que possuem uma fase metálica e outra cerâmica, compostos por TiC, TiN e Ni como aglomerante, e são utilizados em operações de acabamento principalmente de ferros fundidos. Pelo fato de terem propriedades entre metais e cerâmicas, os cermets possuem dureza a quente e resistência ao desgaste inferior às cerâmicas. Por fim, materiais com dureza maior que 3000 HV são denominados ultraduros. Alguns exemplos são os diamantes naturais, diamantes sintéticos e o nitreto cúbico de boro (cBN). Os diamantes são de especial interesse no estudo da usinagem, pois apresentam qualidades excepcionais para ferramentas de corte, como extrema dureza, excelente condutividade térmica e baixo coeficiente de atrito (SHAW, 2005; SANTOS e SALES, 2007).

Como descrito anteriormente, o aço-rápido não está entre os materiais para ferramentas mais duros existentes, porém principalmente nos processos de furação

ele ainda é muito utilizado e facilmente encontrado no mercado. Tem capacidade de atuar em temperaturas de corte de até 600°C e sua estrutura metalográfica no estado temperado é martensítica com carbonetos incrustados. Esta estrutura confere à ferramenta dureza a quente, que aumenta conforme mais elementos de liga são dissolvidos durante o tratamento térmico da sua fabricação. Já a resistência a abrasão aumenta conforme mais carbonetos são formados e incrustados em sua microestrutura. (DINIZ et al., 2014).

## 2.5 REVESTIMENTOS

Devido à dimensão e às condições de operação de algumas ferramentas como brocas e alargadores, a aplicação de materiais mais avançados como cerâmicos torna-se inviável devido a sua conformabilidade. Por isso, na furação é comum buscar melhorar as ferramentas através de camadas superficiais mais duras. A presença de um revestimento faz com que o corte ocorra com esforços menores, devido ao menor coeficiente de atrito proveniente do revestimento. Isso faz com que sejam reduzidos os desgastes e por consequência aumenta-se a vida útil da ferramenta.

É evidente que ferramentas revestidas são mais caras, entretanto, se a ferramenta é capaz de permanecer em operação por um período maior, reduz-se a quantidade de paradas da máquina para troca de ferramenta. Então, pela redução dos tempos passivos de corte, ocorre o ganho de produção, que compensa o custo mais elevado de uma ferramenta revestida (DINIZ et al., 2014).

Quando se trata dos métodos para aplicar revestimentos em ferramentas, existem dois mecanismos principais, a deposição química de vapor (CVD) e a deposição física de vapor (PVD).

O primeiro processo que tornou as ferramentas revestidas comercialmente viáveis foi o CVD. Neste processo a ferramenta está numa câmara selada, envolta numa atmosfera de hidrogênio, em temperaturas entre 850 e 1050°C. Então, introduz-se o metal, por exemplo o titânio, juntamente com o elemento não metálico, como o carbono ou o nitrogênio, ambos em fase gasosa, formando uma fina camada de carbonetos ou nitretos metálicos que aderem fortemente na ferramenta. Um dos problemas do CVD é que a ferramenta deve passar por algum tratamento para endurecimento após o revestimento, pois a fase dura martensítica que compõe o aço-rápido é prejudicada pela alta temperatura.

Para contornar esse problema, geralmente é empregado o PVD para aplicação de cobertura em aço-rápido, que surgiu aproximadamente 10 anos após o CVD. Este mecanismo também acontece numa câmara selada com gás a baixa pressão, mas com temperaturas menores, entre 400 e 600°C. Isso é possível, pois a superfície da ferramenta passa por um jato de íons de um gás inerte, fazendo com que ela se torne eletronegativa. Então, os átomos do revestimento a ser aplicado são ionizados e atraídos pelo potencial negativo da ferramenta, formando a camada. O PVD é o processo de revestimento mais utilizado na cobertura de aço-rápido (SHAW, 2005; TRENT e WRIGHT, 2013).

### **2.5.1 NITRETO DE TITÂNIO - TiN**

Como citado, os revestimentos usuais de ferramentas são compostos de nitretos ou carbonetos metálicos. Dois revestimentos muito conhecidos são o carboneto de titânio (TiC) e o nitreto de titânio (TiN). Trent e Wright (2013) comentam que o TiN não é tão duro quanto o TiC, porém nas operações de corte o TiN apresenta uma resistência ao desgaste maior. A cor dourada brilhante do TiN permite também que a ferramenta seja facilmente identificada, já que o revestimento de TiC não é distinguível de ferramentas não revestidas.

De acordo com Shaw (2005), o TiN é responsável pela redução do atrito entre a ferramenta e a peça, possibilitando que a operação ocorra em menores temperaturas. Isso faz com que seja possível a utilização de uma velocidade de corte maior. Rodrigues (1999) comenta também que apesar da aderência do TiN não ser tão intensa ao substrato da ferramenta, ele oferece uma maior estabilidade química, prevenindo a difusão durante o corte. O filme de TiN é formado nas brocas de aço-rápido através do PVD, processo que não prejudica as propriedades de dureza da ferramenta de aço-rápido.

### **2.5.2 REVENIMENTO A VAPOR**

A ferroxidação ou oxidação a vapor é um tratamento superficial comumente empregado para melhorar o desempenho de brocas e outras ferramentas de aço-rápido. Ferrari et al. (1981) observa que a vida útil de várias ferramentas de corte com este revestimento pode ser até dobrada. Este tratamento baseia-se na exposição da

ferramenta em vapor d'água superaquecido, com o objetivo da formação de uma camada bastante aderente de óxidos na sua superfície, que resulta num aumento da resistência ao desgaste pelo decréscimo do coeficiente de atrito (BEISS, 1991; FRANKLIN; DAVIES, 1977; BINDER, 1996; RAZAVIZADEH; DAVIES, 1979).

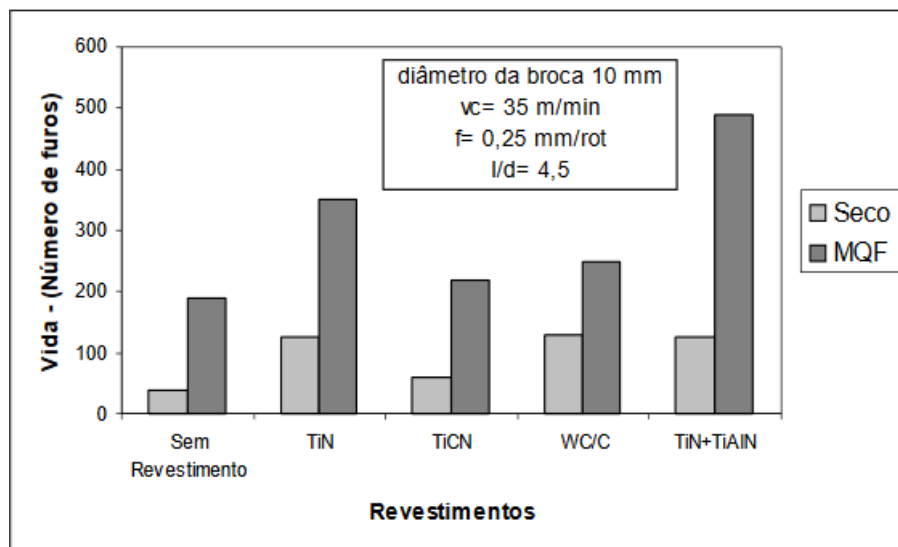
A combinação do tratamento superficial da ferroxidação com o tratamento térmico de revenimento (procedimento que visa o alívio e correção de tensões) resulta no chamado revenimento a vapor (DA SILVA, 2003). Segundo o fabricante Dormer, a broca revenida a vapor caracteriza-se também por prevenir a formação de aresta postiça de corte (DORMER TOOLS, 2018).

### 2.5.3 ESTUDO DE CASO - REVESTIMENTOS

Quanto aos resultados que já foram obtidos sobre os revestimentos que serão utilizados neste estudo, destaca-se a comparação feita por Rodrigues et al. (2012), em que foram confrontados os desempenhos de brocas em aço-rápido com revestimentos de cromo duro (Cr), tratamento superficial dourado (bronze) e revenimento a vapor. O estudo foi feito em uma empresa de manutenção de equipamentos pesados, caminhões e ônibus. Rodrigues et al. (2012) constataram que a broca revenida a vapor teve o melhor desempenho na condição analisada, no caso, a furação de um chassi. A broca revenida a vapor não apresentou lascamento da aresta de corte, como foi observado na broca de cromo duro, e não apresentou adesão ao material usinado, como foi observado na broca com revestimento de bronze.

Não foram encontrados estudos onde se comparam diretamente brocas TiN com revenido, porém, Santos (2002) verificou o desempenho de brocas de aço-rápido revestidas com TiN, TiCN, TiAlN/WCC e TiN/TiAlN na usinagem de ferro fundido cinzento. Os resultados da vida das ferramentas podem ser vistos na **Figura 2**.

**Figura 2 - Desempenho das brocas de aço-rápido**



Fonte: Santos (2002).

Percebe-se que o revestimento TiN tanto a seco quanto com fluido de corte, supera todas as outras ferramentas com exceção da multicamada TiN + TiAlN.

Ambas ferramentas, revenida a vapor e TiN demonstraram bons desempenhos nos estudos de caso. Foram superiores a revestimentos avançados como TiCN e cromo duro, tornando assim ainda mais interessante confrontar pela primeira vez estes revestimentos.

## 2.6. AÇOS AHSS

Nos últimos anos, observou-se um grande avanço na indústria de aços estruturais, devido à necessidade por segurança, desempenho e autonomia dos veículos. Este fato culminou num rápido desenvolvimento dos chamados aços avançados de alta resistência, AHSS - Advanced High Strength Steels. Estes aços possuem uma melhor conformabilidade, ou seja, a capacidade de passar por deformações plásticas sem sofrer danos estruturais e apresentam alta resistência ao impacto se comparados a aços comuns. Os aços AHSS apresentam tensão de escoamento ( $S_y$ ) superior a 300 MPa e tensão de ruptura ( $S_{ut}$ ) superior a 600 MPa. Ao contrário dos primeiros aços AHSS, nos quais a ductilidade era prejudicada com o aumento de resistência, os aços AHSS modernos são capazes de aliar alta resistência com uma boa ductilidade e conformabilidade (KUZIYAK; WAENGLER, 2008).

De acordo com KUZIAK e WAENGLER (2008), quatro classificações são atribuídas aos aços AHSS: dupla fase (DP); plasticidade induzida por transformações (TRIP); fase complexa (CP); e martensíticos (MART). A tensão de ruptura é o principal fator que determina essas classificações. As quatro classificações são mostradas na **tabela 1**.

**Tabela 1- Classificação dos AHSS de acordo com a tensão de ruptura**

	<b>DP</b>	<b>TRIP</b>	<b>CP</b>	<b>MART</b>
<b>S<sub>ut</sub> (MPa)</b>	500 - 1200	800	> 800	1500

**Fonte: autoria própria baseado em Kuziak e Waengler, (2008).**

Os aços com alto potencial de absorção de energia (categorias DP e TRIP) e com  $S_{ut}$  inferior a 1000 MPa, são destinados a suportar carregamentos dinâmicos durante a colisão de um automóvel, já que a parte frontal do veículo deve absorver o impacto a fim de manter a integridade do resto do veículo. Já aços AHSS extremamente resistentes (categoria MART) com  $S_{ut}$  superior a 1200 MPa, são capazes de criar uma barreira de colisão bastante rígida na estrutura central de um veículo por exemplo, protegendo então o passageiro (KUZIAK e WAENGLER, 2008).

A microestrutura dos AHSS de fase dupla (DP) é composta por uma matriz ferrítica mole e 10% a 40% de partículas duras de martensita ou martensita-austenita. Este tipo de microestrutura permite o alcance de  $S_{ut}$  entre 500 MPa e 1200 MPa. Quando a fração de martensita excede 20%, os aços AHSS-DP são por vezes chamados de parcialmente martensíticos. Para algumas aplicações, uma fase bainítica também pode ser desejável na microestrutura do aço AHSS-DP. Os elementos de liga que se destacam neste aço são o manganês, silício, cromo, molibdênio, vanádio e nióbio (KUZIAK e WAENGLER, 2008).

Aços AHSS de plasticidade induzida por transformação (TRIP) são adequados para redução de peso na construção de veículos ao mesmo tempo em que aumentam a sua segurança. Apesar deste aço ter composição multifásica com alto teor de ferrita e bainita (podendo também conter baixos teores de martensita), a austenita retida na microestrutura do AHSS-TRIP é a fase mais importante da sua composição. Esta fase aumenta a dureza do aço durante a sua deformação pela transformação da austenita em martensita, o que contribui para a sua ductilidade. Os aços AHSS-TRIP



caracterizam-se por apresentarem baixo teor de ligas, em torno de 3,5%, dos quais se destacam o manganês e o silício. Apresentam  $S_{ut}$  em torno de 800 MPa (KUZIAK e WAENGLER, 2008).

Aços AHSS de fase complexa (CP) possuem  $S_{ut}$  maior que 800 Mpa, e sua composição química e microestrutura são similares ao AHSS-TRIP, porém, com adição de outros elementos de liga, tais como nióbio, titânio e vanádio, que fazem com que o efeito do aumento da dureza seja precoce. Os AHSS-CP não possuem a austenita retida como fase principal em sua composição como os AHSS-TRIP, mas sim fases mais duras como martensita e bainita (KUZIAK e WAENGLER, 2008).

Por fim, aços AHSS martensíticos (MART) são os que proporcionam a maior dureza ao produto, com  $S_{ut}$  chegando a 1500 MPa. Sua microestrutura é constituída principalmente por martensita, formada pela transformação da austenita durante a têmpera pós estiramento ou recozimento. Estes aços são comumente submetidos a revenimento após a têmpera, com a finalidade de melhorar a ductilidade e conformabilidade mesmo em tensões de ruptura elevadíssimas. O próprio carbono é o principal elemento nesta liga, já que o mesmo aumenta a resistência e a dureza do metal. Manganês, cromo, silício, molibdênio, boro, níquel e vanádio também são empregados para aumentar a capacidade de endurecimento dos AHSS-MART (KUZIAK e WAENGLER, 2008).

## **2.7 TOLERÂNCIAS DO PROCESSO DE FURAÇÃO**

A imprecisão é um grande problema no processo de furação. Quando se trata de tolerâncias dimensionais, os furos conseguem chegar numa tolerância de ordem IT11, que é bastante grosseira se comparada às superfícies feitas por outros processos de fabricação. A tolerância geométrica também é prejudicada nesta operação, já que existe a possibilidade de flambagem da ferramenta quando a razão entre o comprimento da broca e o diâmetro do furo é muito grande. Por isso, não são recomendadas operações onde a razão L/D é maior que 3, sob risco de ocorrência de excentricidade (DINIZ et al., 2014).

Uma alternativa para melhorar a qualidade de furos de comprimentos maiores é a passagem da broca helicoidal seguida de alguma operação de acabamento, como alargamento, brochamento, mandrilamento etc. Nesta situação, é possível obter

tolerâncias mais apertadas, na faixa de IT7 ou até IT6, quando considerados os furos torneados em máquinas modernas (DINIZ et al., 2014).

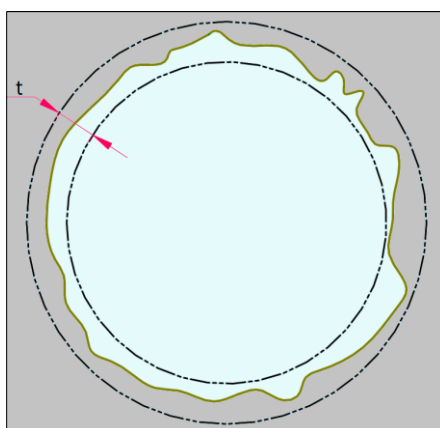
A principal causa da imprecisão na furação é a falta de rigidez das máquinas. Porém, levando-se em conta os avanços em novas ferramentas e o desenvolvimento de equipamentos que permitem uma alta rotação aliada a uma alta rigidez, é possível a obtenção de furos com qualidade IT9, muitas vezes sem utilização de um pré-furo (DINIZ et al., 2014).

### 2.7.1 ERRO DE CIRCULARIDADE

No estudo dos erros geométricos deve-se conhecer o espaço de tolerância que a geometria da peça foi projetada. Define-se então zona de tolerância, uma área ou volume imaginário, criada pelos valores das tolerâncias inseridas no desenho.

Quando se observa a circularidade de um eixo ou de um furo, a zona de tolerância é limitada por duas superfícies, ou seja, dois cilindros concêntricos que estão distanciados entre si por uma tolerância 't'. A interpretação da circularidade pode ser observada na **Figura 3**, mostrando uma das seções de um furo com suas irregularidades contidas no limite de tolerância t.

**Figura 3 - Interpretação da tolerância de circularidade**



Fonte: adaptado de Silva et al (2006, P. 263).

Para qualquer plano perpendicular ao eixo, a seção circular da peça deve estar contida no espaço entre os dois círculos concêntricos, que é a zona de tolerância (SILVA et al., 2006).

## 2.7.2 Rugosidade

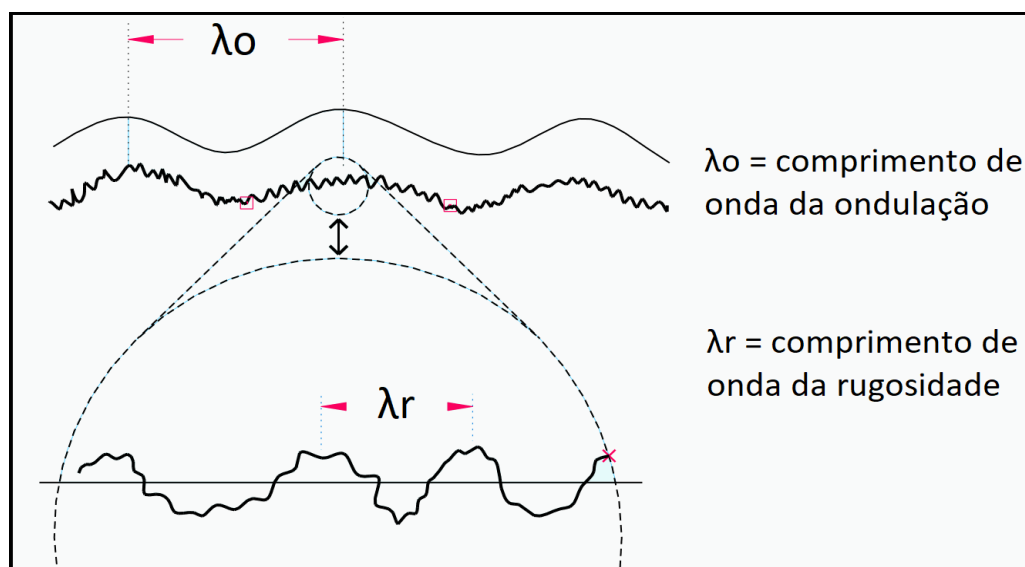
Qualquer superfície real apresenta uma textura, que é composta por desvios repetitivos ou aleatórios que diferem da superfície nominal (teórica) e definem a sua qualidade. A topografia de uma superfície é composta pela rugosidade, pela ondulação, pela disposição das ranhuras e pelas eventuais falhas no material.

A rugosidade é formada por flutuações na superfície, as quais apresentam um comprimento curto de onda. Mesmo podendo chegar numa nano escala, a rugosidade de uma superfície ainda é grande se comparada com a escala molecular.

A ondulação é composta por flutuações de comprimento de onda maior que a rugosidade, sendo conhecida também por macro rugosidade. Ela é formada principalmente por fatores de fabricação, como falta de rigidez das máquinas, vibração excessiva da ferramenta e tratamentos térmicos.

A disposição das ranhuras é a direção principal do padrão de textura predominante na superfície, inerente do processo de fabricação. Por fim, as falhas são desvios grandes, inesperados e indesejáveis na superfície analisada, podendo ter diversas causas, como choques da ferramenta em partículas duras, ou impactos indesejados durante a operação. (BHUSHAN, 2001). Na **Figura 4** é mostrada a ampliação de um perfil de ondulação, observando-se então a rugosidade, com comprimento de onda muito menor:

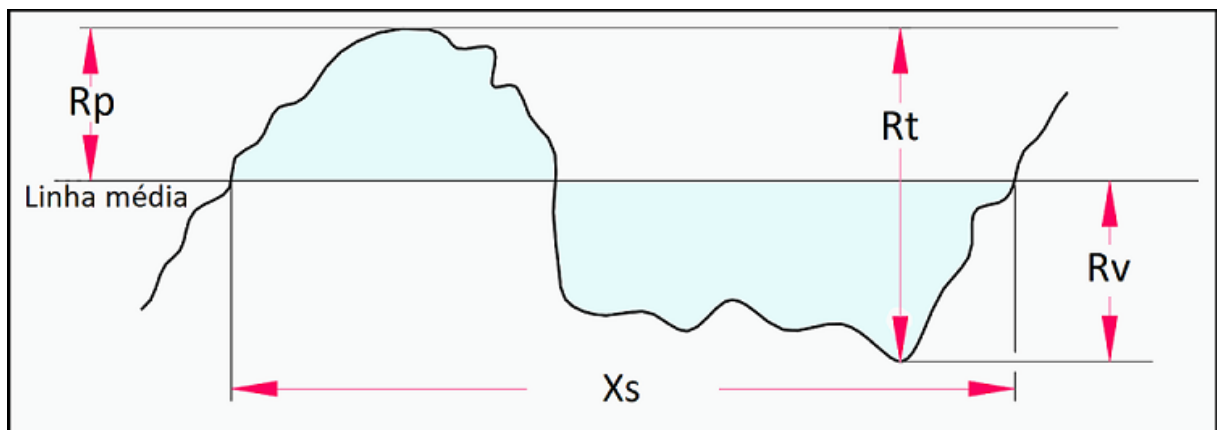
**Figura 4 - Comparação entre os comprimentos de onda**



Fonte: adaptado de Bhushan (2001, cap. 2 seção 2).

A rugosidade é caracterizada por apresentar picos e vales, de amplitudes e espaçamentos variados, os quais formam o perfil. Quando se busca o controle da qualidade de um produto, é interessante poder observar a variação da rugosidade das peças obtidas em diferentes tempos da produção. Por isso, existem parâmetros de rugosidade, que visam representar em apenas um único número a rugosidade de uma superfície. Estes parâmetros podem ser de amplitude, ou seja, consideram a altura ou profundidade de picos ou vales; de comprimento de onda, que consideram o espaçamento dos elementos de perfil; ou uma combinação de ambos. Os parâmetros  $R_p$  (altura máxima de pico),  $R_v$  (altura máxima de vale) e  $R_t$  (distância máxima entre pico e vale) podem ser vistos na **Figura 5**:

**Figura 5 - Parâmetros  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_t$  e  $X_s$**



Fonte: NBR ISO 4287 (2002, P. 5).

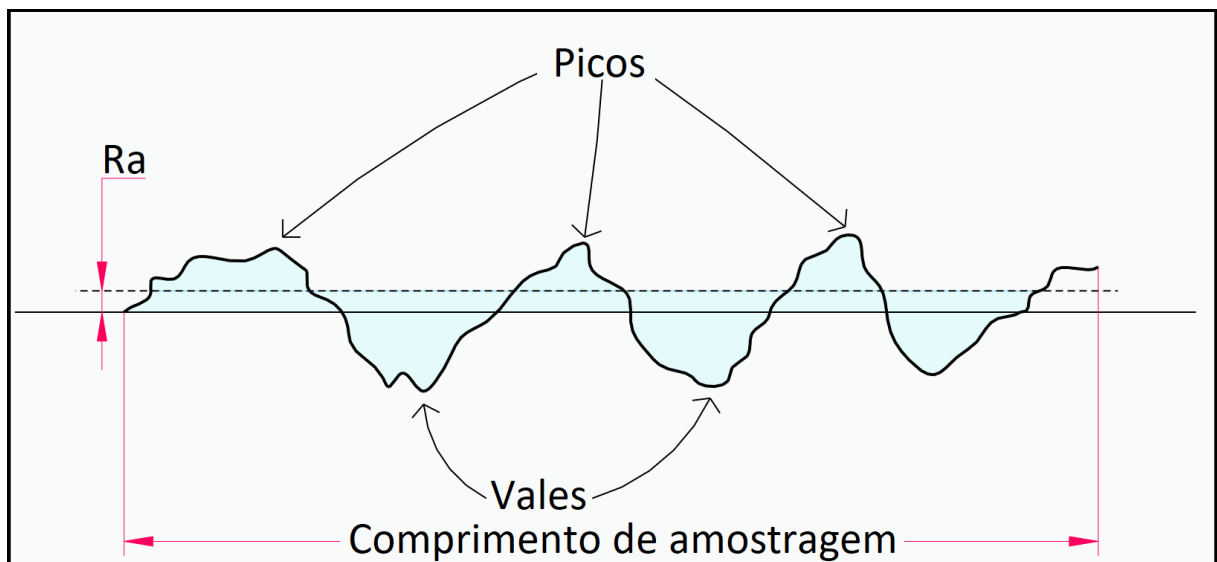
A aspereza da superfície é determinada pela altura dos picos, sendo  $R_p$  a distância entre a linha média e o pico mais alto do perfil, e  $R_v$  a distância entre a linha média e o vale mais profundo do perfil. A soma de  $R_p$  com  $R_v$  resulta na distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo do perfil, dimensão denominada por  $R_t$ . A distância do início de um pico até o fim de um vale é denominada de  $X_s$ , e este conjunto adjacente de pico e vale forma um elemento do perfil.

A linha média que corta o perfil é obtida de modo que a soma das áreas acima desta linha, delimitadas pelos picos, sejam iguais a soma das áreas abaixo dela, delimitadas pelos vales. Os parâmetros  $R_p$  e  $R_t$  são bastante importantes na análise da qualidade de um perfil, pois os picos geralmente são mais prejudiciais no acabamento de uma superfície, e muitas vezes é preferível a presença de vales, já que eles facilitam a penetração de lubrificantes (BHUSHAN, 2001).

Um parâmetro muito utilizado tido como padrão para medir rugosidade em muitos países é o desvio aritmético médio Ra. O Ra é um parâmetro de amplitude para avaliação da rugosidade, ou seja, nele é considerado apenas as alturas dos picos e vales, desconsiderando os comprimentos dos elementos de perfil (BHUSHAN, 2001).

O parâmetro médio de rugosidade, cuja representação pode ser vista na **Figura 6**, considera vários pontos do perfil para resultar em um valor médio. A definição matemática do Ra é dada pela média aritmética das alturas do perfil no comprimento de amostragem.

**Figura 6 - Interpretação do desvio aritmético médio - Ra**



Fonte: adaptado de Bhushan (2001, cap. 2 seção 2).

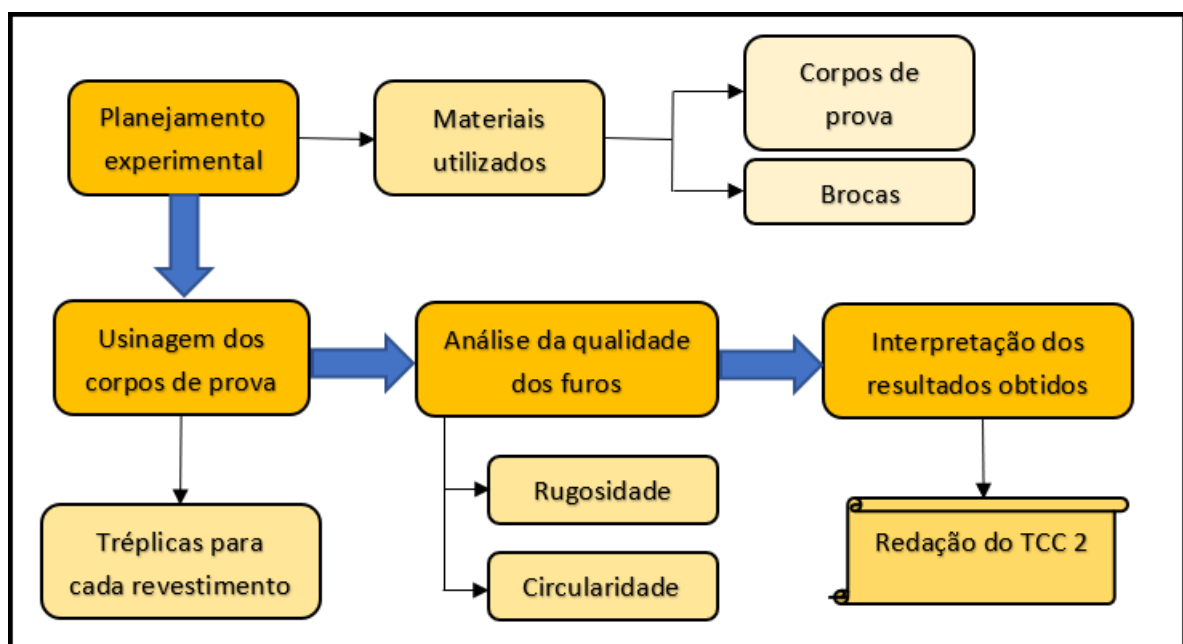
Como no cálculo do Ra são considerados apenas valores absolutos de altura e profundidade, esta linha estará sempre acima da linha média.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para obter-se uma melhor visualização de quais são as etapas necessárias para se alcançar os objetivos propostos neste trabalho, foi elaborado um fluxograma, que pode ser visto na **Figura 7**.

Figura 7 - Fluxograma da metodologia utilizada



Fonte: autoria própria.

Os principais fatores planejados foram: a quantidade de furos feitos por cada broca; a quantidade e a geometria dos corpos de prova; quais parâmetros de qualidade seriam coletados de cada furo, e de quais regiões do furo.

#### 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

##### 3.2.1 AÇO STRENX 700

O material a ser usinado é um aço avançado de alta resistência da marca sueca SSAB™, o Aço Strenx® 700, cuja análise de cadinho da composição fornecida pelo

fabricante está apresentada na **Tabela 2**. As porcentagens correspondem a teores máximos, e os elementos marcados com asterisco são intencionais na composição.

**Tabela 2 - Composição química do Aço Strenx® 700**

<b>C* (max %)</b>	<b>Si* (max %)</b>	<b>Mn* (max %)</b>	<b>P (max %)</b>	<b>S (max %)</b>
0,20	0,60	1,60	0,020	0,010
<b>Cr* (max %)</b>	<b>Cu* (max %)</b>	<b>Ni* (max %)</b>	<b>Mo* (max %)</b>	<b>B* (max %)</b>
0,80	0,30	2,0	0,70	0,005

Fonte: ficha de dados Aço Strenx® 700, SSAB (2018).

Este é um aço estrutural que dependendo da sua espessura, possui um limite de escoamento mínimo entre 650 e 700 MPa. Suas aplicações típicas são estruturais com altas exigências à sustentação de carga. Na **Tabela 4** são apresentadas as propriedades mecânicas em função da espessura da chapa. A dureza segundo o fabricante é de 260 HBW (SSAB, 2018).

**Tabela 3 - Propriedades mecânicas do Aço Strenx® 700**

<b>Espessura (mm)</b>	<b>Tensão de escoamento (min MPa)</b>	<b>Tensão de ruptura (MPa)</b>
4,0 - 53,0	700	780 - 930
53,1 - 100,0	650	780 - 930
100,1 - 160,0	650	710 - 900

Fonte: ficha de dados Aço Strenx® 700, SSAB (2018).

Para posterior caracterização do material a ser usinado, este foi lixado (com lixas até 1200 µm), polido (com pasta diamantada 6 µm) e atacado primeiramente com picral 5% e em seguida com nital 3%. O acompanhamento do ataque foi realizado em um microscópio ótico Olympus. A dureza do aço foi medida em um durômetro Digimess. Ambos equipamentos são pertencentes ao Laboratório de Ensaios Mecânicos da UTFPR Câmpus Guarapuava.

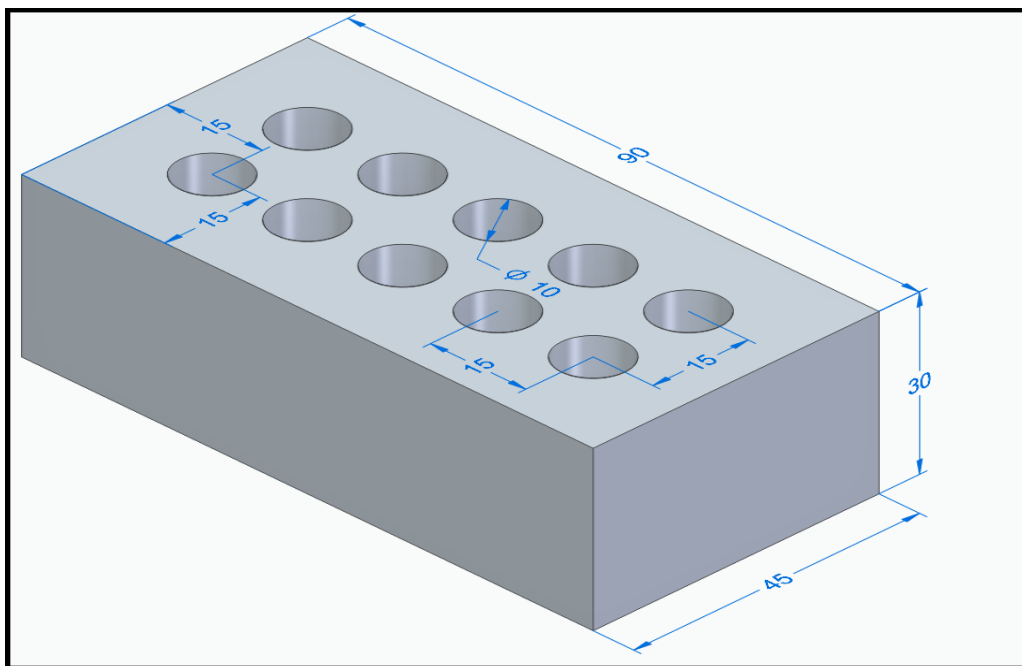
Para determinação da composição de ligas e metais foi utilizado um espectrômetro de fluorescência de raio-X Oxford Instruments, modelo X-MET XMDS 2726, pertencente ao Laboratório de Química da Unicentro Câmpus CEDETEG.

As últimas análises foram realizadas no Laboratório de Metalografia da UTFPR Câmpus Ponta Grossa. Estas foram a análise da micrografia utilizando um microscópio ótico ZEISS AxioCam MRc 5, a microscopia eletrônica por varredura utilizando um MEV Tescan, e a medição da microdureza em um microdurômetro Shimadzu.

### 3.2.2 CORPOS DE PROVA

Foram feitos três ensaios para cada ferramenta, resultando então em seis corpos de prova (dois conjuntos iguais de peça-ferramenta). Uma representação feita em CAD do corpo de prova é apresentada na **Figura 8**:

Figura 8 - Dimensões do corpo de prova



Fonte: autoria própria com auxílio do software Siemens Solid Edge 2019.

No experimento foram usinados dez furos passantes em cada corpo de prova, o qual tem dimensões de 90x45x30 mm. A distância entre centros dos furos é de 15 mm, assim como a distância do centro dos furos até a parede mais próxima.



### 3.2.3 BROCAS

As brocas a serem utilizadas são da marca Dormer, sendo as duas revestidas (TiN modelo A002 e revenida a vapor modelo A100). Os dois modelos de brocas apresentam um ângulo de ponta de  $118^\circ$ , diâmetro de 10,00 mm, comprimento total de 133 mm e comprimento de corte de 87 mm.

A única diferença na geometria das brocas é que, a broca TiN possui geometria com efeito autocentrante (afiação em cruz) e a broca revenida possui afiação padrão.

A broca TiN possui o comprimento de corte num tom dourado brilhante, já a revenida mostra-se inteira negra, num tom mais fosco, como pode ser visto na **Figura 9**.

**Figura 9 – Brocas utilizadas**



**Fonte: Dormer Tools.**

As brocas também apresentam uma relação de quatro vezes seu diâmetro para profundidade do furo, sendo então 40 mm a profundidade máxima recomendada pelo catálogo do fabricante. Porém, segundo Diniz et al. (2014), a profundidade do furo deve ser de até três vezes o diâmetro da broca, sob risco de excentricidade. Assim, a espessura escolhida foi de 30 mm para simular uma situação severa, porém dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante e pela literatura.

### 3.3 USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A usinagem dos corpos de prova foi feita em um centro de usinagem CNC ROMI D 600, com rotação máxima de 8000 rpm. A fixação dos corpos de prova foi feita através de uma morsa fixada na mesa, mostrada na **Figura 10**, e por meio dos degraus nas laterais, foi possível a usinagem de um furo passante. A fixação da broca

foi feita através de um mandril hidráulico com o auxílio de uma pinça de fixação. Além destes, foram utilizados os materiais apresentados no item 3.1.

Sendo seis corpos de prova usinados, foi feita uma tréplica para cada revestimento de broca. O avanço e a rotação utilizados para todos os ensaios foram de 0.12 mm/rev e 570 rpm respectivamente. Estes parâmetros foram recomendações de furação com aço-rápido, retiradas do manual de usinagem do Aço Strenx, fornecido pela própria SSAB (SSAB, 2018).

**Figura 10 - Fixação do corpo de prova**



Fonte: autoria própria.

A programação realizada para a usinagem do experimento está no **Apêndice 1**, e foi feita com auxílio do software Fusion 360 da Autodesk.

### **3.4 ANÁLISE DA QUALIDADE DOS FUROS**

Após usinagem dos corpos de prova, foram feitas as medições da qualidade dos furos, por meio da verificação dos erros geométricos de circularidade e de rugosidade.

A circularidade foi medida por uma máquina de medir por coordenadas Mitutoyo (**Figura 11**) modelo Crysta Apex S. Os dados coletados foram observados e

interpretados através de um microcomputador. O erro de circularidade foi medido numa profundidade de 1 mm, do início e do final de cada furo. A máquina foi programada no modo CNC, para medir automaticamente a circularidade dos 10 furos utilizando 10 pontos de contato em cada furo.

**Figura 11 - Máquina de medir por coordenadas**



Fonte: autoria própria.

A rugosidade dos furos foi medida por um rugosímetro portátil, modelo SJ-410 da marca Mitutoyo, que pode ser visto na **Figura 12**. Os parâmetros de rugosidade a serem coletados do início e do final de cada furo são Ra e Rt. O comprimento de amostragem foi de 8 mm com velocidade de 0,5 mm/s.

**Figura 12 - Rugosímetro portátil**



Fonte: autoria própria.

Os dados mostrados no visor do rugosímetro foram transcritos para um computador à medida que foram coletados, no qual já foram organizados em tabelas para facilitar a interpretação posterior.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ANÁLISE DO MATERIAL

Os resultados da **Tabela 4** mostram as ligas detectadas na análise de espectrômetro do aço estudado. O nióbio é o único metal detectado nesta análise que não consta na composição fornecida pelo fabricante.

**Tabela 4 - Elementos de liga do Aço Strenx® 700.**

	ESPECTRÔMETRO (%)	FABRICANTE (% máx.)
<b>Mn</b>	1,10	1,60
<b>Cr</b>	0,25	0,80
<b>Cu</b>	0,15	0,30
<b>Ni</b>	0,01	2,0
<b>Mo</b>	0,12	0,70
<b>Nb</b>	0,01	-

Fonte: autoria própria.

Para o resultado da medição de dureza foram feitas cinco medições na amostra, cujos resultados estão dispostos na **Tabela 5**:

**Tabela 5 – Resultados de dureza macro e micro**

	Média	Conversão (HBW)
<b>Macro (HRB)</b>	102,8	264
<b>Micro (HV)</b>	276,6	271
<b>Fabricante (HBW)</b>	260,0	260

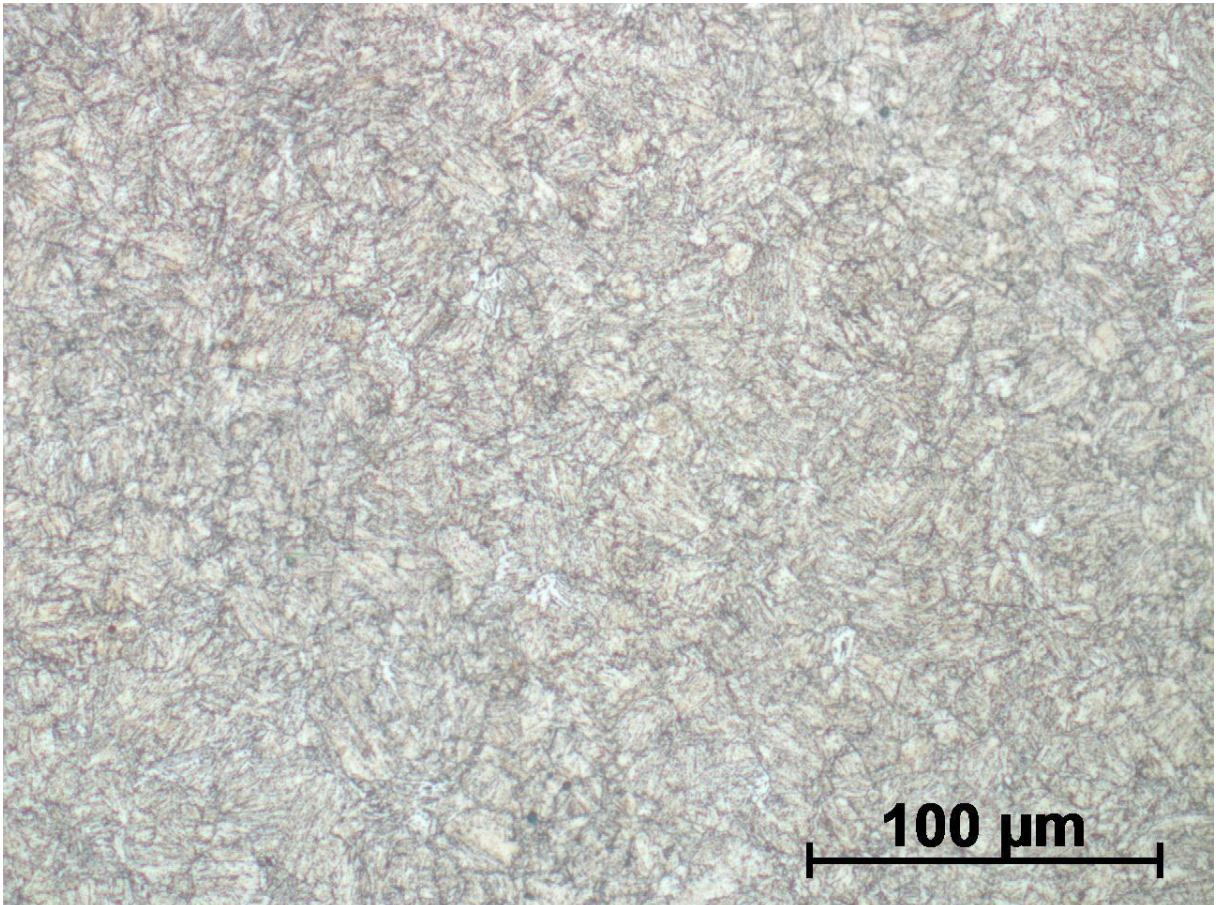
Fonte: autoria própria.



Utilizou-se uma tabela de comparação para conversão das durezas, e a dureza informada pelo fabricante foi de 260 HBW.

A **Figura 13** apresenta a micrografia do Aço Strenx<sup>®</sup> 700, na qual percebe-se uma estrutura martensítica:

**Figura 13 - Micrografia aço Strenx<sup>®</sup> 700**



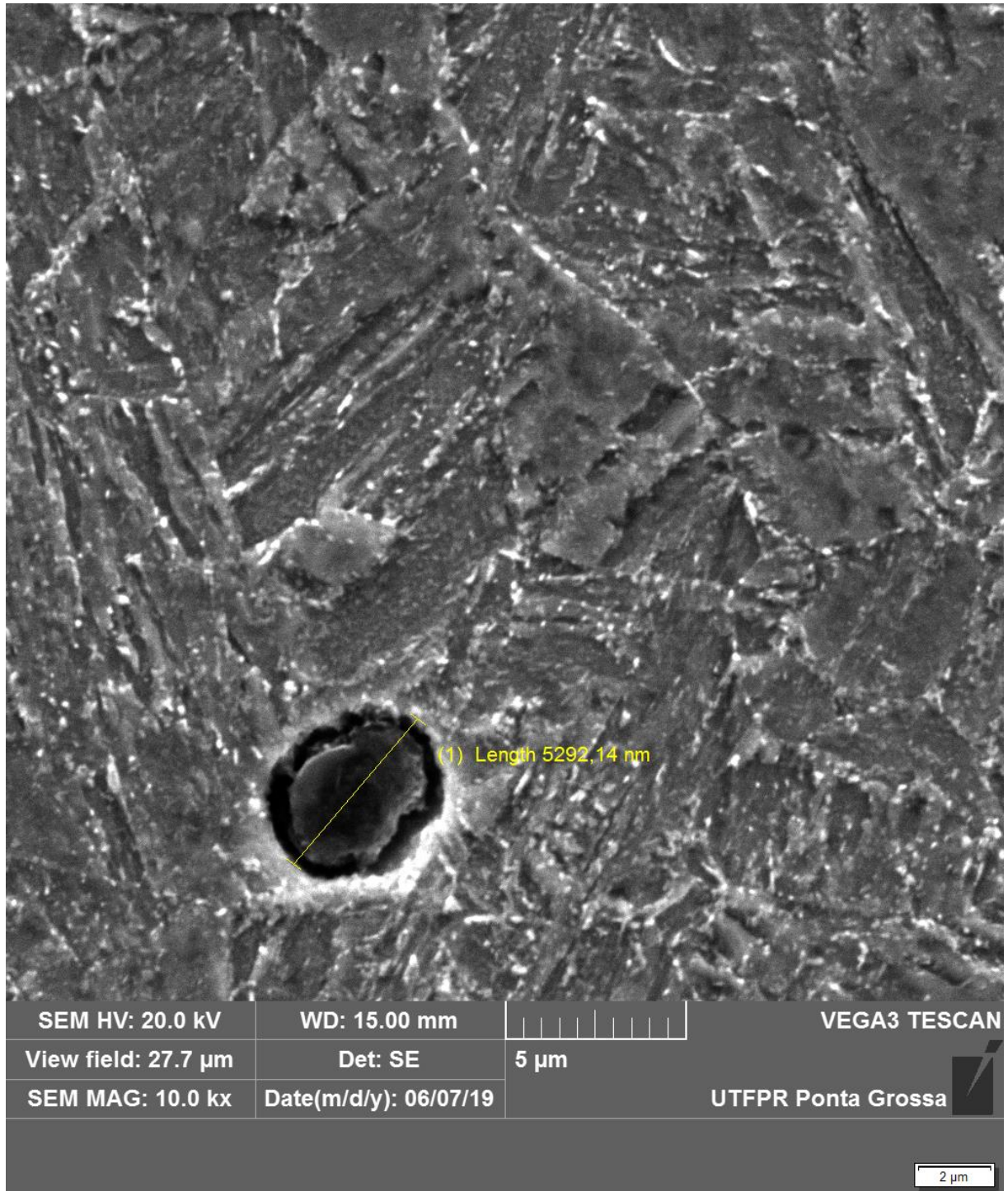
**Fonte: autoria própria.**

Pela presença da estrutura martensítica e elementos de liga como cromo, molibdênio, níquel e manganês pode-se concluir que o Strenx<sup>®</sup> 700 se encaixa na categoria MART dentro das classificações de AHSS. Sua tensão de ruptura entre 780 e 930 Mpa (AHSS MART chegam até 1500 MPa) pode ser explicada pelo teor de carbono, proporcional a capacidade de endurecimento do aço.

A amostra foi também analisada no microscópio eletrônico de varredura (MEV), com o intuito de analisar a composição e verificar a presença de inclusões ou carbonetos. Na análise foi detectada uma inclusão de aproximadamente 5 µm de

diâmetro, de tonalidade escura, diferindo da matriz martensítica. A imagem da inclusão ampliada em 5000 vezes pode ser vista na **Figura 14**.

**Figura 14 – MEV Strenx® 700**

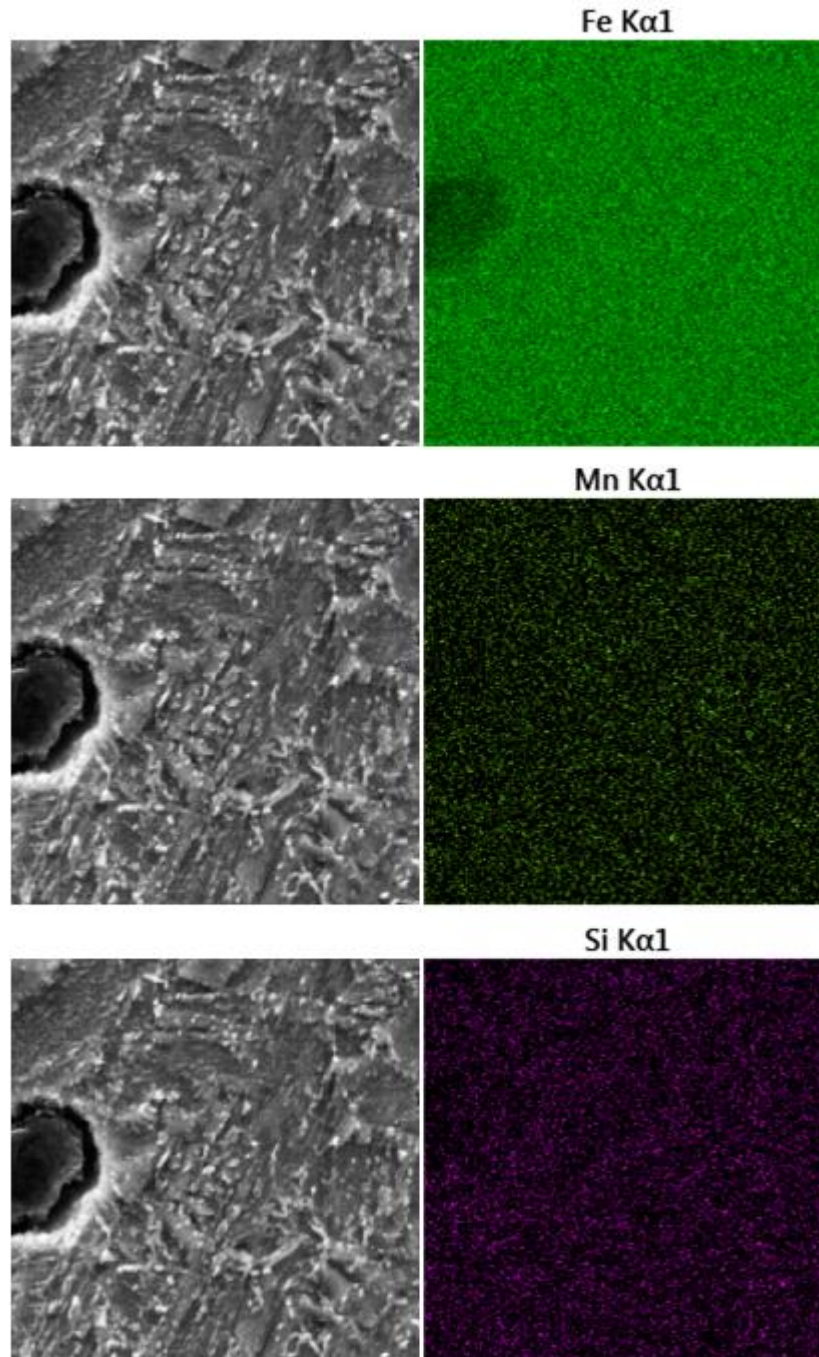


Fonte: autoria própria.



Os elementos químicos detectados na região da inclusão foram ferro, manganês, silício, cromo, alumínio e cobre, sendo os três primeiros indicados na **Figura 15**.

**Figura 15 – Distribuição da composição de Fe, Mn e Si**



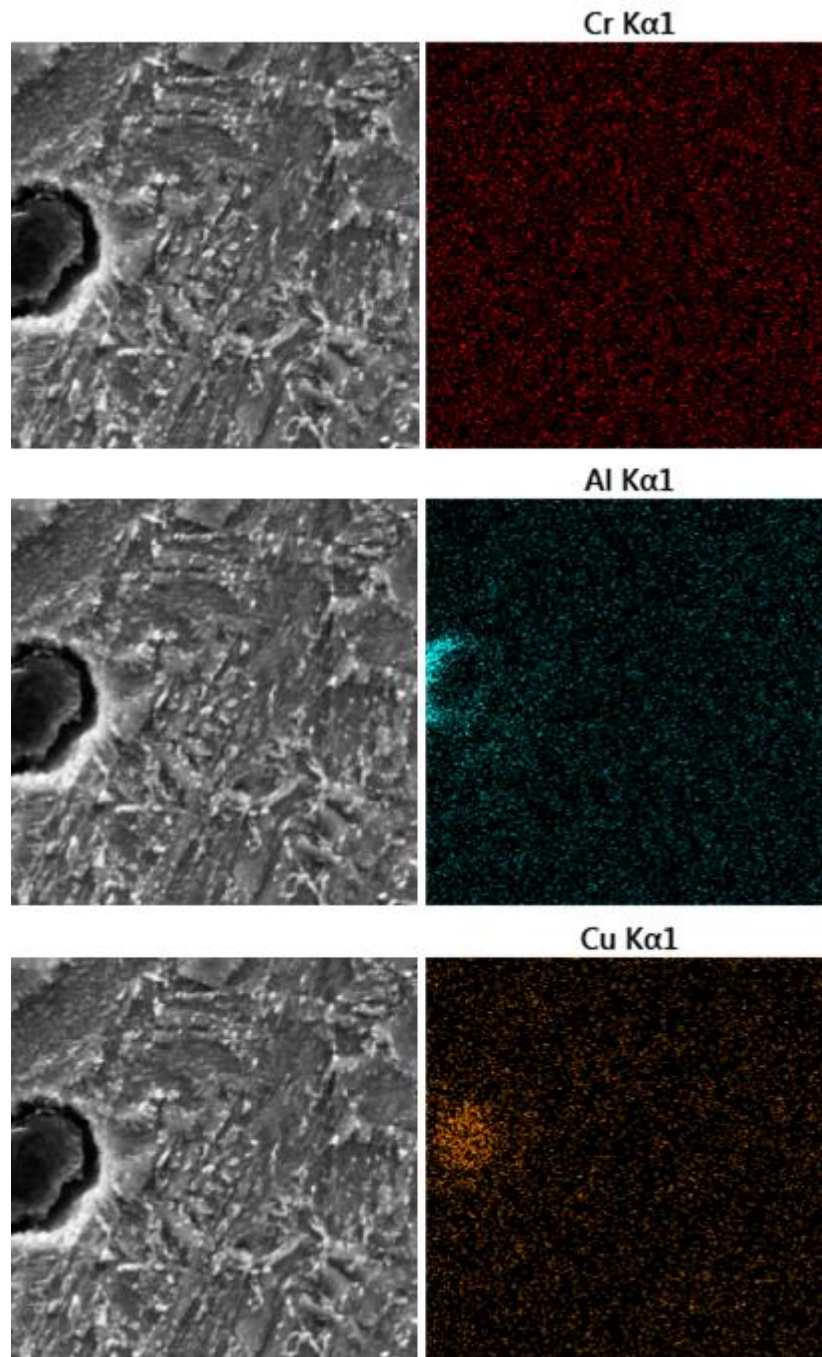
**Fonte: autoria própria.**

Percebe-se um teor menor de ferro na região da inclusão, enquanto a distribuição de manganês se mostra mais homogênea. A distribuição do silício,



também apresenta uma distribuição dispersa. A **Figura 16** apresenta os outros três elementos analisados pela varredura:

**Figura 16 – Distribuição da composição de Cr, Al e Cu**



Fonte: autoria própria.

Percebe-se nesta imagem que a disposição do cromo está homogênea, porém, ocorreu a detecção de alumínio, que não está na composição fornecida pelo fabricante, e não foi detectado pelo espectrômetro. Uma hipótese para a ocorrência

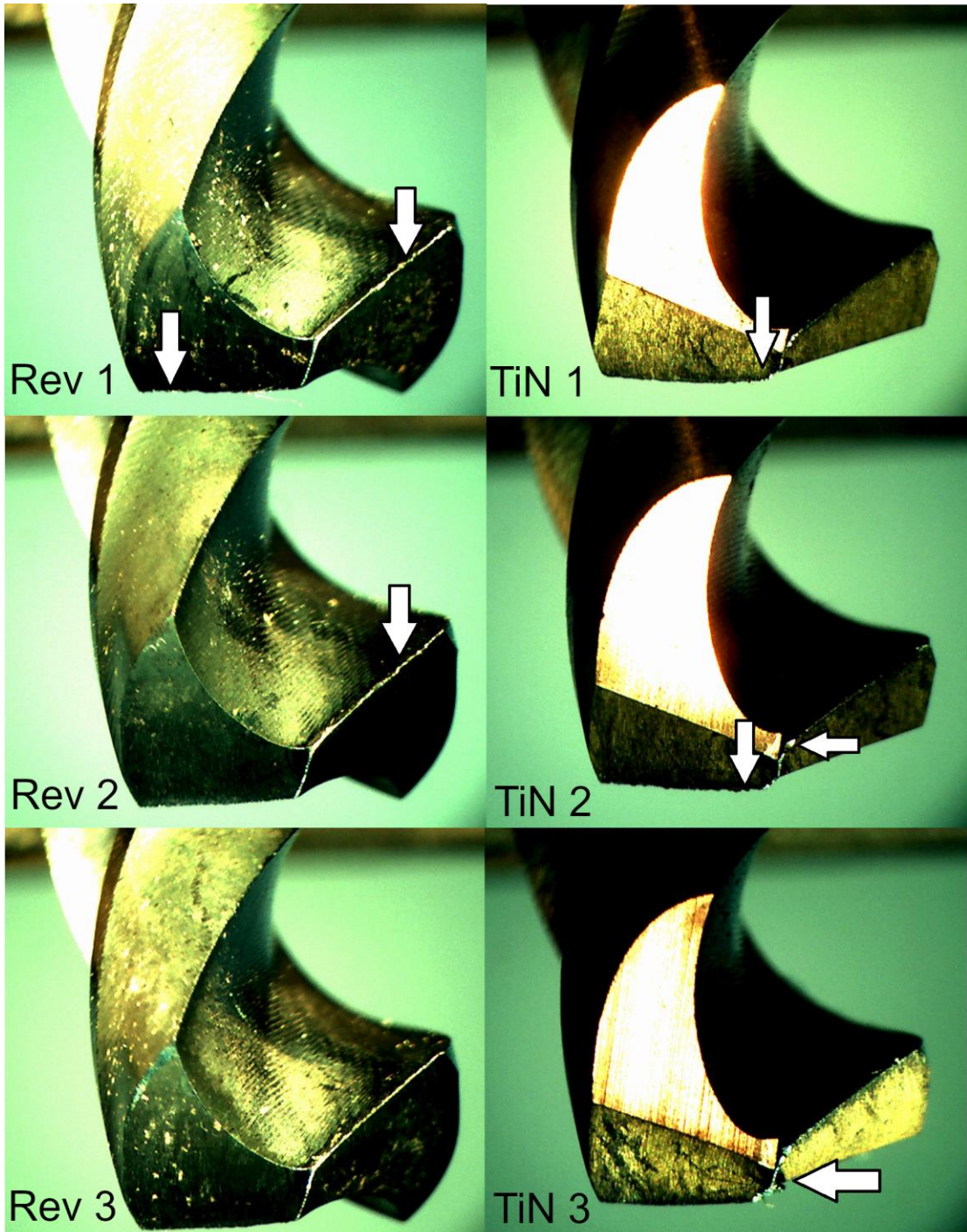
deste fato é a contaminação com alumina (óxido de alumínio abrasivo) durante o polimento, fazendo com que o alumínio permaneça na superfície da amostra.

O teor de cobre é intenso no núcleo da partícula esférica, indicando que a incrustação é um precipitado de cobre. O cobre não forma carbonetos duros como o silício e o cromo e a princípio, esta partícula não causaria danos na ferramenta. Para discorrer mais sobre essa incrustação seriam necessárias mais análises em MEV das amostras e medições de nanodureza.

## 4.2 ANÁLISE DAS BROCAS

O monitoramento de desgaste da ferramenta de corte não está previsto nos objetivos do trabalho, mas, para complementar a comparação das brocas, as arestas foram analisadas em uma lupa estereoscópica Motic. O equipamento pertence ao Laboratório de Usinagem da UTFPR campus Ponta Grossa. As imagens das arestas das duas brocas estudadas são mostradas na **Figura 17**.

Figura 17 – Ampliação da região de corte



Fonte: autoria própria.

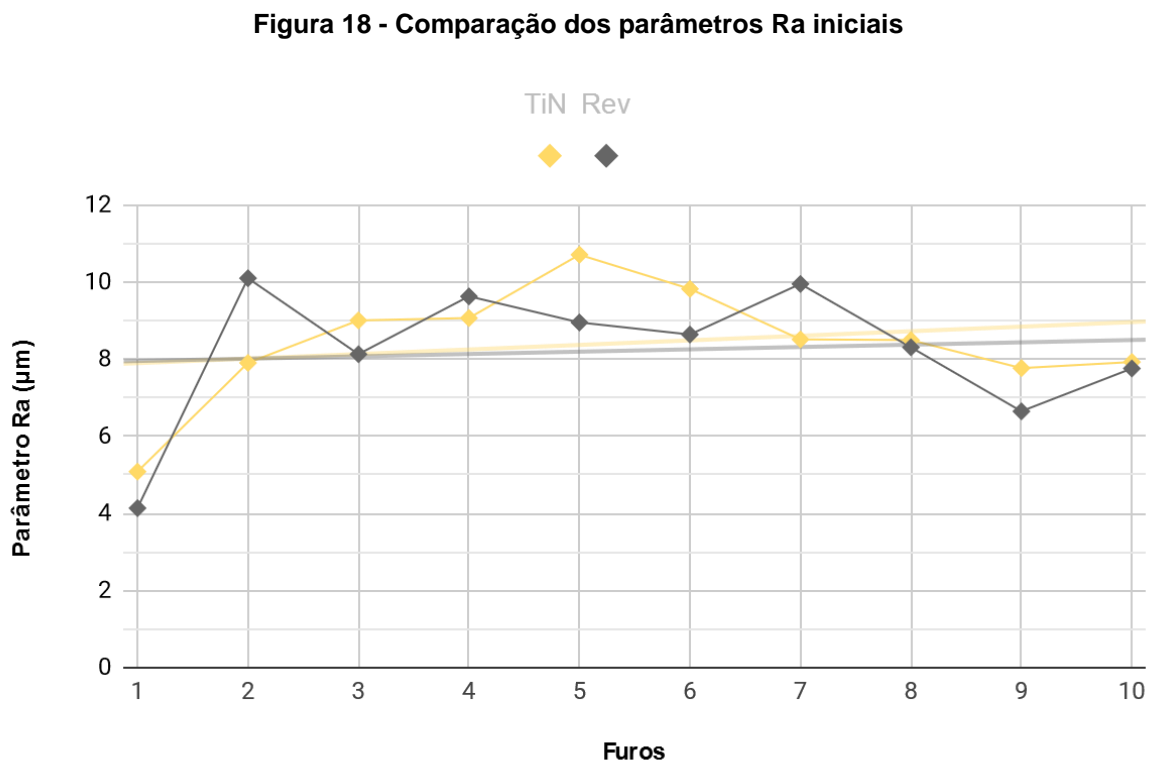
As setas apontam alguns dos locais nos quais pode-se notar os desgastes ocorridos. Percebe-se lascamentos em todo o comprimento das arestas de corte das

brocas revenidas, enquanto nas brocas TiN o desgaste ocorre na aresta principal e na aresta transversal.

Como na região da aresta transversal a velocidade de corte tende a zero, é propício o desenvolvimento de aresta postiça de corte. Então, pode-se dizer que durante a usinagem com a broca de revestimento TiN o cavaco aderiu no material da broca, encruou, e quando se soltou arrancou partículas da broca.

### 4.3 PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

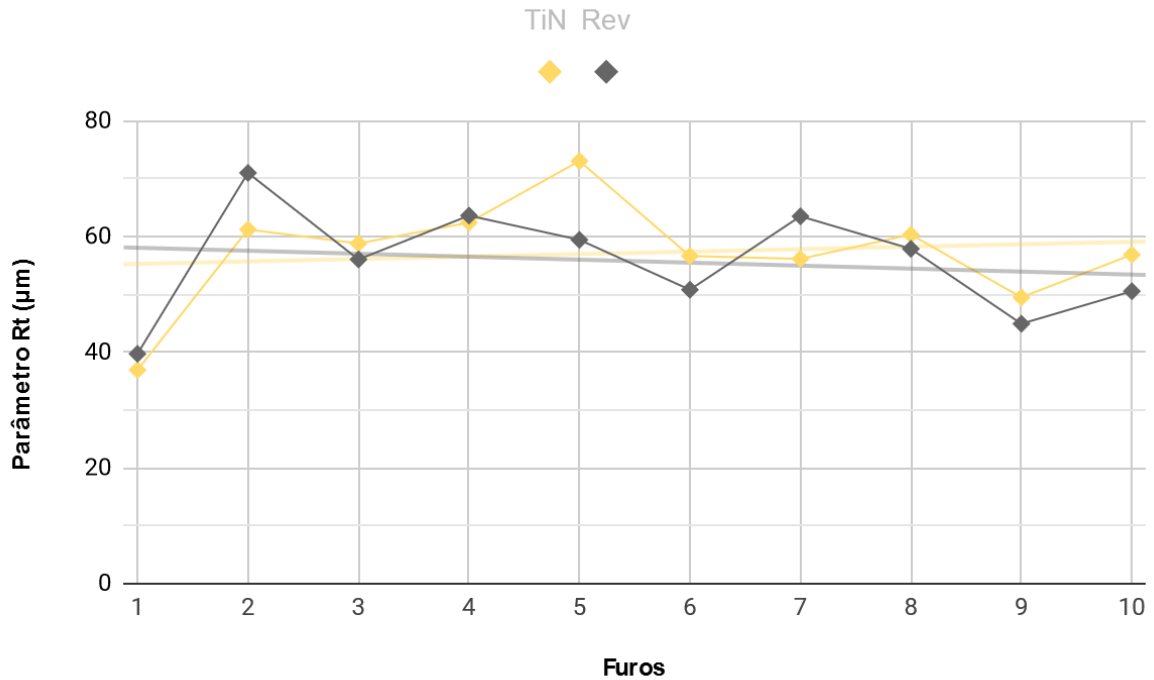
Os parâmetros de rugosidade foram obtidos pela medição no início e no final de cada furo, e o resultado calculado foi a média dos três corpos de prova. A **Figura 18** apresenta a média dos valores do parâmetro Ra para os dois revestimentos testados, na posição inicial dos furos:



Fonte: autoria própria.

Os valores da rugosidade total são indicados na **Figura 19**, também para o início dos furos:

Figura 19 - Comparação dos parâmetros Rt iniciais

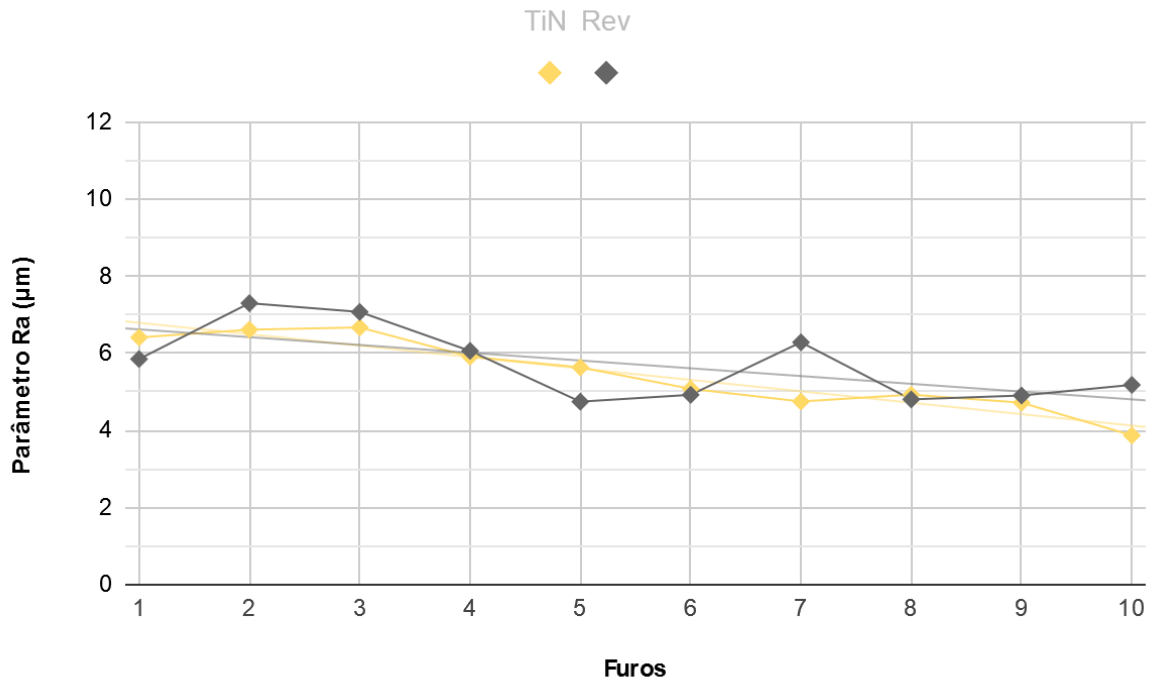


Fonte: autoria própria.

Percebe-se que em ambos os gráficos existe um salto no valor dos parâmetros do primeiro furo para o segundo furo. Ainda que a broca TiN apresente este comportamento de uma maneira menos abrupta, isso mostra que, a condição da ferramenta para ambos os revestimentos no segundo furo já estava bastante diferente.

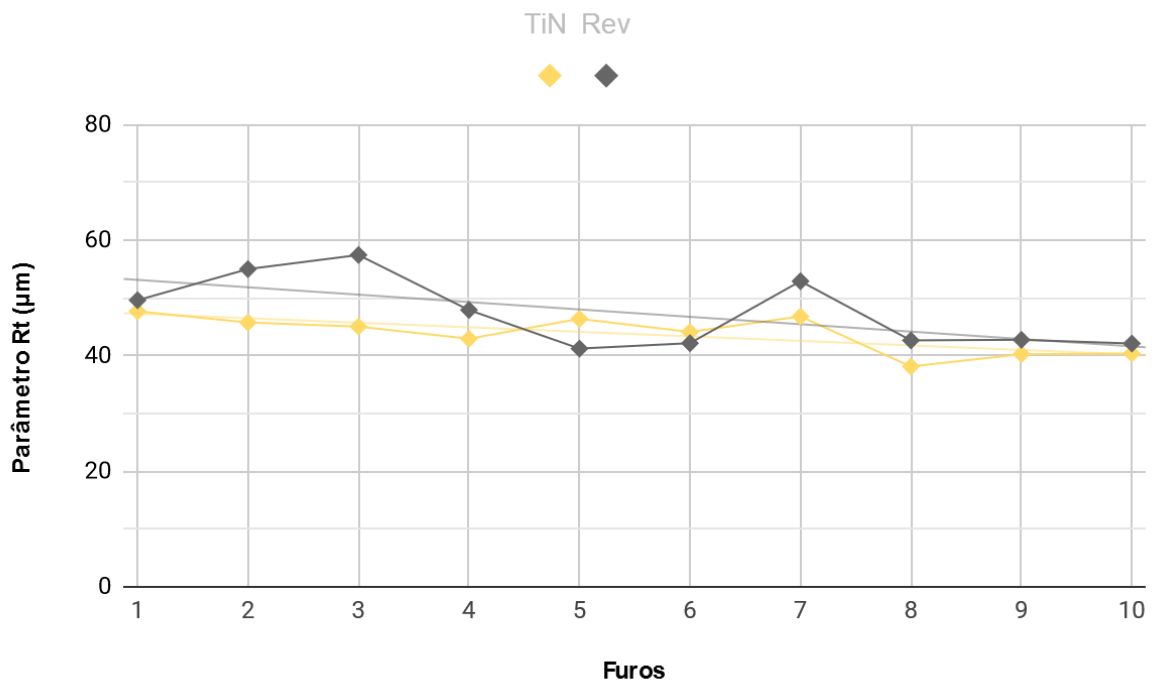
A **Figura 20** apresenta a comparação do parâmetro Ra e a **Figura 21** a comparação do parâmetro Rt, ambas para o fim dos furos:

**Figura 20 - Comparação dos parâmetros Ra finais**



Fonte: autoria própria.

**Figura 21 - Comparação dos parâmetros Rt finais**



Fonte: autoria própria.

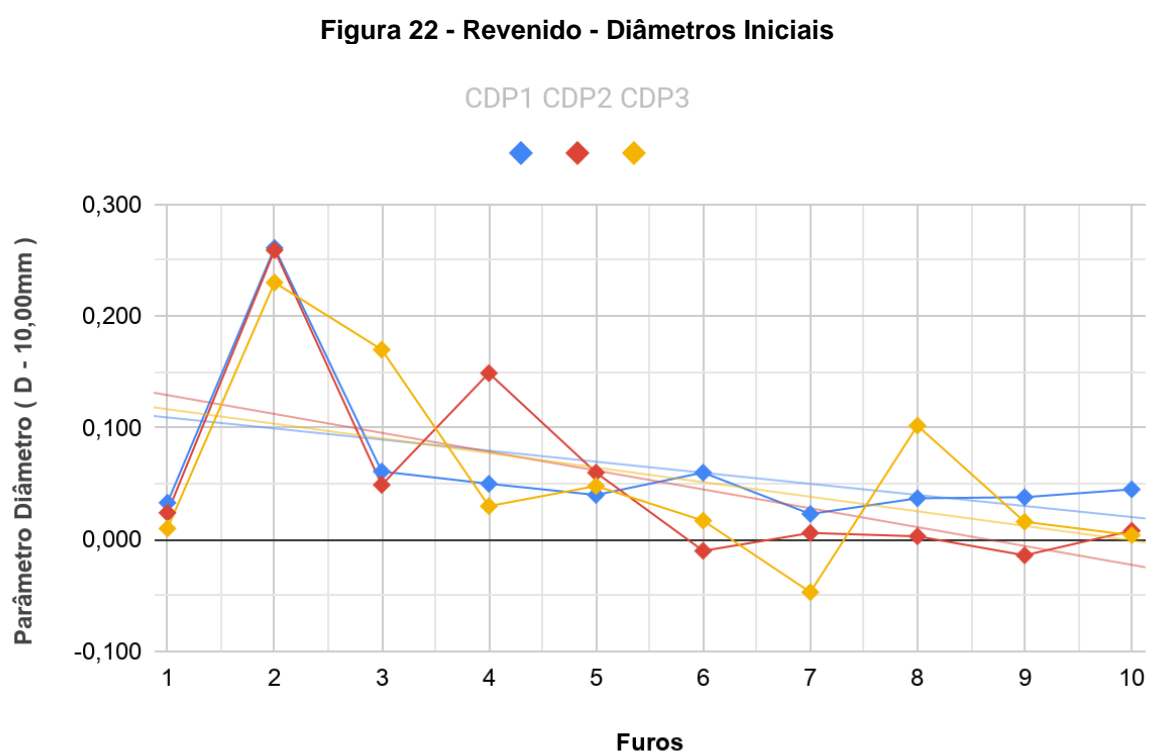


Analisando os parâmetros de rugosidade, não é possível obter conclusões sobre qual broca teve o melhor desempenho. Apesar da broca revestida com TiN apresentar mais pontos no gráfico abaixo da broca revenida (principalmente na análise do final do furo) esta diferença não é expressiva, e as tendências demonstram-se bastante semelhantes.

## 4.4 DIÂMETRO E CIRCULARIDADE

### 4.4.1 RESULTADOS DA BROCA REVENIDA A VAPOR

Na **Figura 22** são apresentados os resultados de medição de diâmetro no início dos furos dos três corpos de prova, realizados pelas brocas revenidas a vapor.



Fonte: autoria própria.

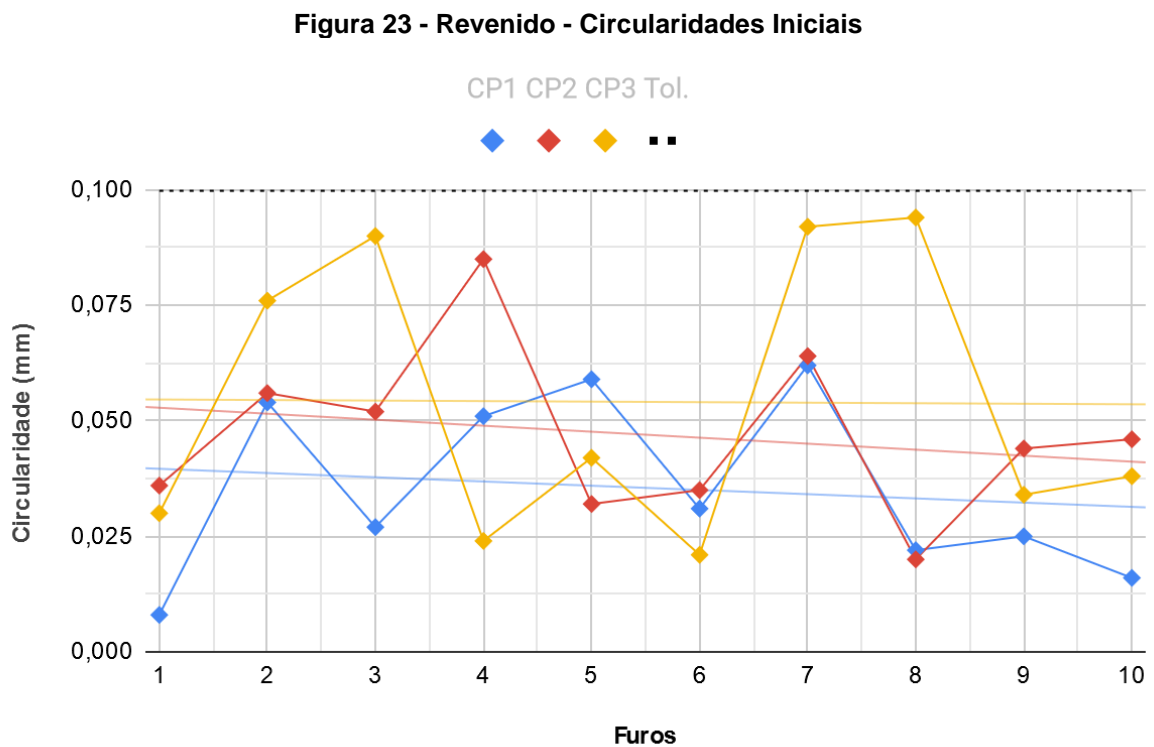
Neste gráfico é possível perceber uma repetibilidade da broca ao longo dos furos. Nos dois primeiros furos dos três ensaios os diâmetros foram muito próximos, repetindo um diâmetro em torno de 10 mm no primeiro furo e um pico de aproximadamente 10,250 mm no segundo furo. A partir do terceiro furo, os valores do

diâmetro não repetem da mesma forma, de modo que as curvas azul e vermelha se mostram próximas, porém, a curva laranja possui pontos mais distantes.

Um furo de 10 mm tem uma tolerância de 0,090 mm para uma classe de qualidade IT11, precisão comumente encontrada na furação (DINIZ et al., 2014). Se considerarmos os furos como furo base (tolerância inferior = 0), percebe-se um limite superior máximo de 0,261 mm, enquadrando então o furo na classe IT14, um resultado bastante grosseiro.

Isto pode ser explicado pela ausência de fluido de corte e de um furo de centro para realização dos furos, procedimento que é comumente empregado na operação da furação, mas que aqui foi omitido com o intuito de testar as brocas em condições severas.

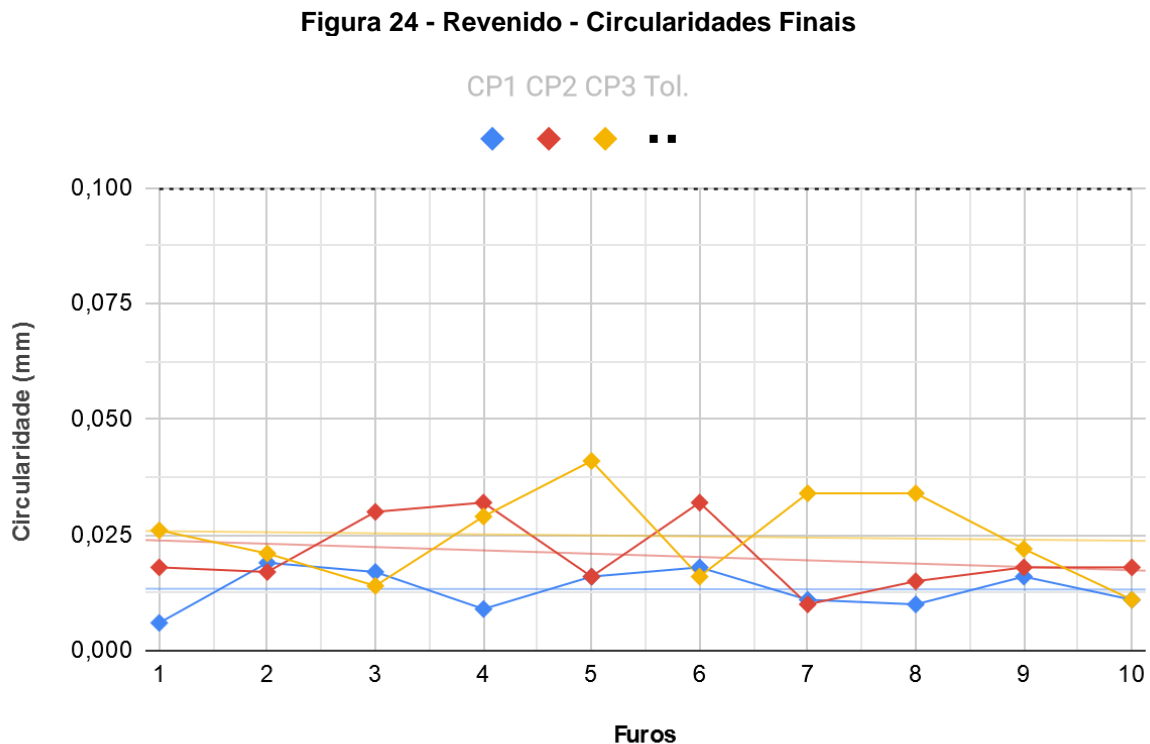
Na **Figura 23** são apresentados os resultados de medição das circularidades no início dos furos dos três corpos de prova, realizados pelas brocas revenidas a vapor. Neste gráfico pode-se perceber uma maior aleatoriedade das indicações, com poucos pontos coincidentes. Porém, todas as indicações mostraram-se dentro da tolerância definida em 0,100 mm, sendo o maior valor 0,094 mm e o menor 0,008 mm.



Fonte: autoria própria.



Apesar de também apresentar poucos pontos coincidentes, os resultados de medição das circularidades no fim dos furos dos três corpos de prova apresentaram menor discrepância entre os valores máximos e mínimos das medições em relação às circularidades iniciais. Pela **Figura 24** pode-se observar que o maior erro foi de 0,041mm e o menor de 0,010mm:



Fonte: autoria própria.

Isto é esperado, pois, no fim do furo as guias da broca estão em contato com uma área bem maior nas paredes do furo, possibilitando uma maior estabilidade no caminho da furação.

#### 4.4.2 RESULTADOS DA BROCA REVESTIDA COM TiN

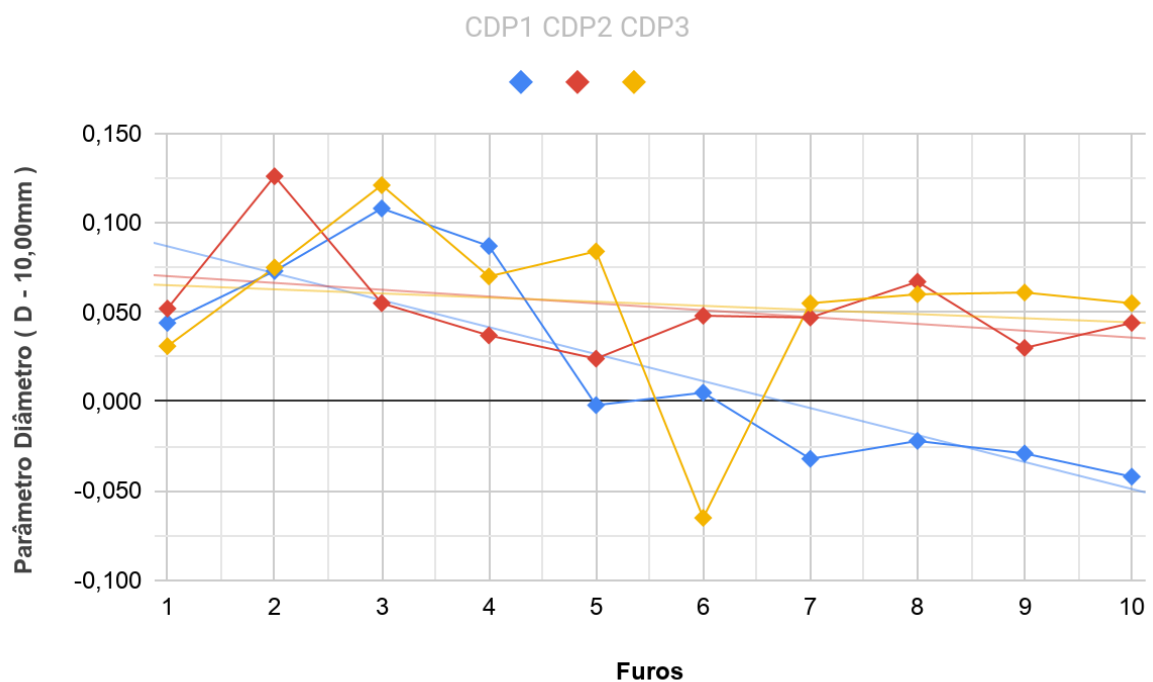
Na **Figura 25** são apresentados os resultados de medição do parâmetro de diâmetro no início dos furos dos três corpos de prova, realizados pelas brocas revestidas com TiN.

Pela figura é possível notar que a partir do sexto furo, o corpo de prova representado pela linha azul apresentou diâmetros menores do que o nominal (10 mm). Isto pode ter ocorrido devido ao desgaste desta ferramenta. Quando se

observou as arestas das brocas, notou que em todas as brocas uma aresta sempre estava bem menos desgastada do que a outra. Pode ser que nesta broca, as arestas tiveram valores de desgastes bem diferentes indicando um desgaste gradual da ferramenta.

Comparando com os valores de tolerâncias dimensionais padronizadas, os furos usinados por esta broca possuem IT 12, devido o limite superior máximo medido ser de 0,126 mm.

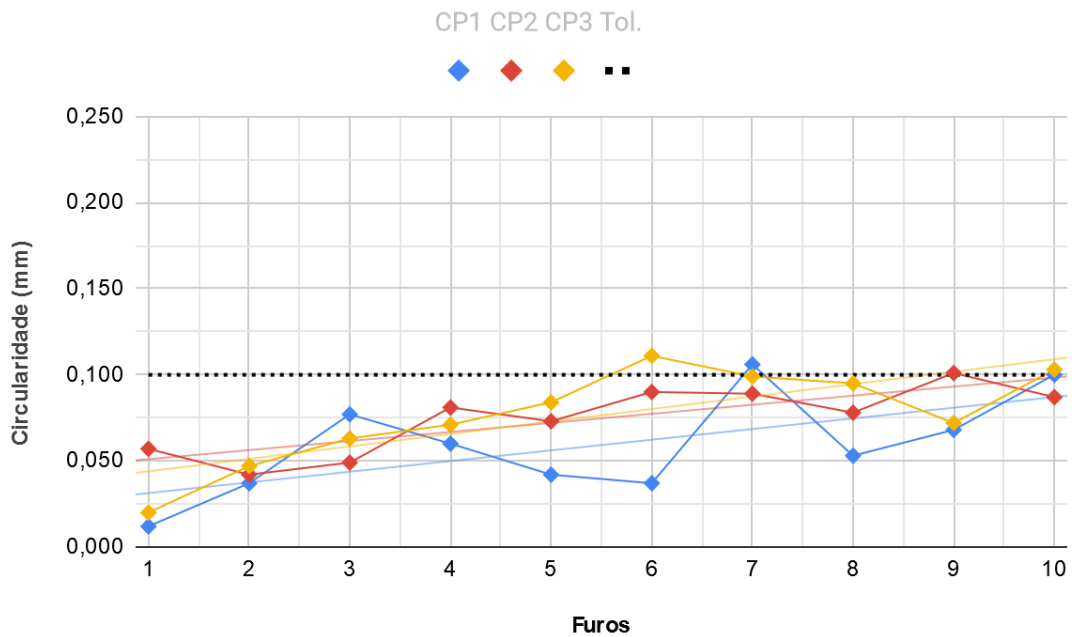
**Figura 25 – TiN - Diâmetros Iniciais**



Fonte: autoria própria.

Na **Figura 26** vê-se uma tendência no aumento da circularidade a cada furo. A partir do sexto furo, quatro medições ultrapassaram o limite de tolerância estabelecido em 0,100 mm.

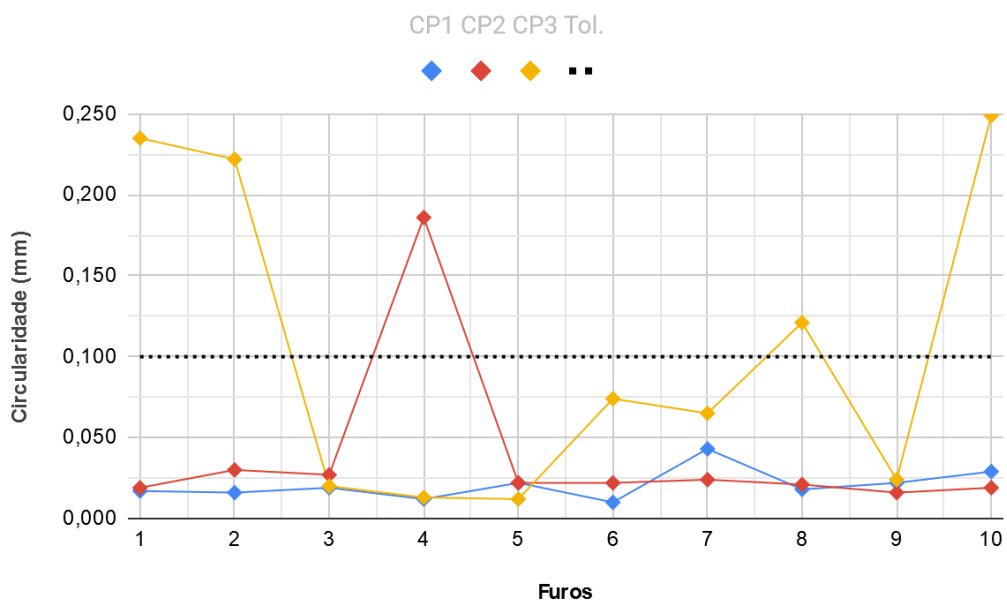
**Figura 26 - TiN - Circularidades Iniciais**



Fonte: autoria própria.

Para a circularidade no fim de cada furo percebe-se que, apesar do primeiro e segundo corpos de prova, em azul e vermelho na **Figura 27**, apresentarem valores estáveis de circularidade, o terceiro corpo de prova apresentou indicações mais aleatórias. Nota-se que os valores ultrapassaram cinco vezes o limite de tolerância estabelecido, chegando a 0,249 mm.

**Figura 27 - TiN - Circularidades Finais**



Fonte: autoria própria.

Este resultado não era o esperado, pois como ocorreu na broca revenida, esperava-se que as circularidades finais fossem mais estáveis que as iniciais. Com os resultados da usinagem do terceiro corpo de prova, pode-se dizer que há uma incerteza na repetibilidade da broca TiN, quanto à circularidade no fim dos furos.

#### 4.4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste tópico foram comparados os resultados de medição dos ensaios feitos por cada broca, para os primeiros furos, com o intuito de confrontar diretamente seus desempenhos. Os dados foram condensados na **Tabela 6**, para facilitar a visualização, destacando em verde a melhor situação.

**Tabela 6: Comparação dos resultados de medição para o primeiro furo**

		Revenido	TiN
Circularidade inicial ( $\mu\text{m}$ )	Média	0,025	0,030
	Desvio padrão	0,015	0,024
Circularidade final ( $\mu\text{m}$ )	Média	0,017	0,090
	Desvio padrão	0,010	0,125
Diâmetro inicial ( $\mu\text{m}$ )	Média	0,022	0,042
	Desvio padrão	0,012	0,011
Custo		R\$ 24,60	R\$ 27,70

Fonte: autoria própria.

Pela tabela é possível notar que a broca revenida a vapor apresentou erro de circularidade menor que da broca revestida por TiN. Esperava-se um desempenho melhor nas circularidades iniciais da broca revestida com TiN, já que esta é autocentrante, o que evitaria excentricidade. Destaca-se que o custo da broca revestida com TiN é superior.

## 5 CONCLUSÕES

Alguns atributos da broca revestida com TiN levavam a hipótese de que seu desempenho seria consideravelmente superior à broca revenida, sendo estes o custo mais elevado e a geometria autocentrante.

No entanto, com um custo 12,6% maior que a broca revenida, a broca TiN apresentou uma circularidade inicial média 54,03% pior, sendo este o atributo onde a redução da excentricidade pela geometria autocentrante deveria ter um impacto positivo.

A broca revenida não demonstrou um bom desempenho de tolerâncias dimensionais levando em conta o erro máximo (IT14), devido ao salto nos valores do segundo furo dos três corpos de prova. Mas, quando analisa-se a mediana dos dados, percebe-se que desconsiderando estes valores destoantes seu desempenho se torna melhor que o da broca TiN.

Destaca-se também os resultados da circularidade final, onde as guias da broca estão em contato com uma área maior do furo, esperando-se então tolerâncias melhores. Neste caso, mesmo analisando a mediana dos resultados, a broca TiN apresentou resultados piores.

Para uma melhor compreensão do comportamento no processo de furação do aço Strenx® 700, utilizando as brocas deste estudo, propõe-se realização de furos de centro, já que esta é uma prática muito comum na furação, assim como a utilização de um fluido de corte.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Elisangela A. S.; COSTA, César E.; MILAN, Júlio C. G. **Study of the Nitrided Layer Obtained by Different Nitriding Methods**. Rio de Janeiro: Matéria (Rio J.), 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR ISO 4287 - Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil, Termos, definições e parâmetros de rugosidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

AYDIN, Huseyin; ESSADIQI, Elhachmi; JUNG, In-Ho; YUE, Stephen **Development of 3rd generation AHSS with medium Mn content alloying compositions**. Montreal: Elsevier Journal of Materials Science & Engineering, 2012.

BEISS P. **Steam Treatment of Sintered Parts**. Londres: Journal of Powder Metallurgy, 1991.

BHUSHAN, Bharat **Modern Tribology Handbook**. Ohio State University: CRC Press LLC, 2001.

BINDER, R. **Influência dos Processos de Ferroxidação nas Propriedades do Ferro Sinterizado**. Florianópolis: Dissertação de Mestrado pela Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.

DA SILVA, Washington M. **Efeito da Pressão de Compactação e Tamanho do Pó de Ferro na Abrasão do Ferro Sinterizado Oxidado a Vapor**. Uberlândia: Dissertação de Mestrado pela Universidade Federal de Uberlândia, 2003.

DINIZ, Anselmo E.; MARCONDES, Carlos F.; COPPINI, Nivaldo L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Artiliber, 2014.

FERRARI, A.; VERONESI, V.; GAZZANICA, G. C. **A Study of the Influence of Steam Treatment on the Tribological Behaviour of Steel Specimens**. San Remo: Elsevier International Journal on the Science and Technology of Friction Lubrication and Wear, 1981.

FRANKLIN, P.; DAVIES, B. L. **The Effects of Steam Oxidation on Porosity in Sintered Iron**. Brunel: Journal of Powder Metallurgy, 1977.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of Modern Manufacturing** Materials, Processes, and Systems. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.

HACISALIHOGU, I.; YILDIZ, F.; ALSARAN, A. **Wear performance of different nitride-based coatings on plasma nitrided AISI M2 tool steel in dry and lubricated conditions**. Erzurum: Erzurum Technical University, Department of Mechanical Engineering, 2017.

KUZIAK; KAWALLA; WAENGLER **Advanced high strength steels for automotive industry**. Gliwice: Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2008.

RADWANSKI, K.; WROZYNA, A.; KUZIAK, R. **Role of the advanced microstructures characterization in modeling of mechanical properties of AHSS steels**. Gliwice: Elsevier Journal of Materials Science & Engineering, 2015.

RAZAVIZADEH, K.; DAVIES, B. L. **Influence of Powder Type and Density on Pore Closure and Surface Hardness Changes Resulting from Steam Treatment of Sintered Iron**. Brunel: Journal of Powder Metallurgy, 1979.

RODRIGUES, L. V. **Confiabilidade Aplicada no Comportamento da Ferramenta de Corte de Geometria Definida**. Florianópolis: Dissertação de Mestrado pela Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

RODRIGUES; MOREIRA, F.; SANTANA, S. **Otimização nos Processos de Usinagem**. Disponível em <<https://docplayer.com.br/26353203-Otimizacao-nos-processos-de-usinagem.html>>. Acesso em: 27 out. 2018.

SANTOS, S. C. **Estudo da Influência de Revestimentos e da Aplicação de Fluido de Corte no Desempenho de Brocas de Aço-Rápido e de Metal Duro Integral na Usinagem de Ferro Fundido Cinzento**. Uberlândia: Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, 2002.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Artliber, 2007.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. New York: Oxford University Press, 2005.

SILVA, A.; RIBEIRO, C. T.; DIAS, J.; SOUSA, L. **Desenho Técnico Moderno**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS **Tool and Manufacturing Engineers Handbook**. 4. ed. Dearborn, Michigan: One SME Drive, 1983. p. 9-1.

SSAB **Increasing Useful Load and Fuel Economy**. Disponível em <<https://www.ssab.com.br/products/brands/strenx/customer-case-triel-ht>>. Acesso em: 22 ago. 2018.

SSAB **Customer Cases**. Disponível em <<https://www.ssab.us/products/brands/strenx/customer-cases>>. Acesso em: 23 ago. 2018

SSAB **Machining for Strenx**. Disponível em <<https://www.ssab.com.br/support/processing#downloads>>. Acesso em: 01 set. 2018

SSAB. **Data sheet Strenx® 700**. Disponível em <<https://www.ssab.com.br/products/brands/strenx/products/strenx-700>>. Acesso em: 29 out. 2018

TIER, M. A. D. **Avaliação da Resistência ao Desgaste do Aço AISI M2 Nitretado a Plasma**. Porto Alegre: Tese de Doutorado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.

TRENT, E. M.; WRIGHT, Paul K. **Metal Cutting**. Woburn: Elsevier, 2013.



**APÊNDICE – Programação CNC**

```
%  
O1001 (TCC)  
(T1 D=10. CR=0. TAPER=118DEG - ZMIN=-38.004 - DRILL)  
N10 G90 G94 G17 G49 G40 G80  
N15 G21  
N20 G28 G91 Z0.  
N25 G90  
  
(DRILL2)  
N30 T1  
N32 M06  
N35 S570 M03  
N40 G54  
N45 G00 X75. Y15.  
N50 G43 Z6. H01  
N55 G00 Z5.  
N60 G98 G83 X75. Y15. Z-38.004 R5. Q10. F68.  
N65 X60.  
N70 X45.  
N75 X30.  
N80 X15.  
N85 Y30.  
N90 X30.  
N95 X45.  
N100 X60.  
N105 X75.  
N110 G80  
N115 Z6.  
  
N120 G28 G91 Z0.  
N125 G90  
N130 G49  
N135 G28 G91 X0. Y0.  
N140 G90  
N145 M30  
%
```