



isec
Engenharia

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Estudo Experimental da Furação de
Aços Inoxidáveis Austeníticos e Duplex
com Brocas de 2 e 3 Gumes**

DEFINITIVO

Autor

João Vasco Ramos Marouvo

Orientadores

Prof. Doutor Fernando António Gaspar Simões

Prof. Doutor Pedro Manuel Soares Ferreira

INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, Março de 2022



isec

Engenharia

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo Experimental da Furação de Aços Inoxidáveis Austeníticos e Duplex com Brocas de 2 e 3 Gumes

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Especialização em Construção e Manutenção de Equipamentos Mecânicos

Autor

João Vasco Ramos Marouvo

Orientadores

Prof. Doutor Fernando António Gaspar Simões

Prof. Doutor Pedro Manuel Soares Ferreira

INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, Março de 2022

AGRADECIMENTOS

É com a conclusão deste trabalho que completo mais uma etapa da minha vida, estes não foram momentos fáceis, mas sem eles não seria possível tornar-me quem sou hoje e por isso nunca os esquecerei. Contudo, não teria sido possível alcançar os meus objetivos sem a ajuda e a presença de algumas pessoas que estiveram durante este tempo ao meu lado e a quem quero prestar os meus sinceros e profundos agradecimentos.

Em especial aos Professores Doutores Fernando Simões e Pedro Ferreira pela orientação prestada, acompanhamento, troca de opiniões, disponibilização de meios e dedicação prestada durante o acompanhamento do meu percurso. Mas também por todas as oportunidades, conselhos e apoio prestado em temas exteriores ao presente trabalho.

Ao Professor Doutor Luís Roseiro pela disponibilização das instalações do Laboratório de Biomecânica Aplicada, onde foram realizados os ensaios de maquinagem e por parte dos equipamentos necessários para a realização do estudo das vibrações.

Ao Professor Doutor Carlos Alcobia pela disponibilização do equipamento necessário para a realização dos testes de análise de vibrações.

Também não posso deixar de agradecer o apoio e conhecimento transmitido pelo técnico do Laboratório de Fabrico Assistido por Computador, Engenheiro Paulo Amaro, fundamentais para a execução dos testes e operação do centro de maquinagem.

Desejo igualmente expressar o meu agradecimento ao Professor Vítor Maranha pelas explicações sobre a utilização do equipamento e software de aquisição de vibrações.

À empresa Palbit® pelo acompanhamento nas minhas atividades através de apoio técnico, ferramentas e materiais utilizados.

Por fim, gostaria de agradecer também aos meus colegas por toda a motivação, apoio e sugestões, fundamentais para a execução do meu trabalho.

A todos, o meu Muito Obrigado.

RESUMO

Devido à interseção de três arestas de corte num ponto, as brocas de três gumes são caracterizadas por uma estabilidade superior, que resulta numa ótima precisão e acabamento. É neste sentido que se pretende realizar uma análise comparativa com as brocas de dois gumes na furação de alguns das ligas metálicas mais difíceis de maquinar.

Neste estudo, o desempenho das brocas de dois e três gumes de corte foi avaliado na furação dos aços inoxidáveis austeníticos e duplex, quando utilizados os sistemas de refrigeração via externa a baixa pressão e via interna a alta pressão. A avaliação do desempenho para as diferentes condições de trabalho foi conseguida através da aplicação de estratégias distintas, como a observação do desgaste, rugosidade superficial, tolerância dos furos, análise de vibração e formação de aparas.

Os resultados obtidos demonstraram que as brocas com três gumes de corte produzem furos com um acabamento e tolerâncias dimensionais superiores, quando comparadas com brocas de dois gumes. No entanto, apesar de possuírem melhores características de um ponto de vista de qualidade, as brocas de três gumes tiveram dificuldade em manter a integridade das arestas de corte, face à sua construção mais compacta. O fator mais importante para aumentar o número de furos realizados é a utilização de refrigeração interna de alta pressão. Para os testes com refrigeração externa, o AISI 304 tem um comportamento pior do que o aço inoxidável duplex, devido à maior suscetibilidade à formação de aparas aderentes e ao encruamento. A deterioração da ferramenta manifestou-se principalmente na forma de lascamento não uniforme para a refrigeração externa e desgaste de flanco uniforme para a refrigeração interna. Deste modo, na escolha entre brocas de dois e três gumes deve ser tida em conta a relação entre qualidade e produtividade que cada uma das ferramentas oferece.

Palavras-Chave: Aço inoxidável austenítico; Aço inoxidável duplex; Brocas de 2 e 3 gumes de corte; Refrigeração; Furação; Vida útil; Rugosidade; Tolerância; Vibração; Aparas

ABSTRACT

As a result, from the intersection of three cutting edges at one point, three flute drills are characterized by superior stability, which results in optimum precision and finish. In this sense, a comparative analysis is carried out with conventional twist drills in the drilling of some of the most difficult metal alloys to machine.

In this research, the performance of the drills was evaluated in the drilling of austenitic and duplex stainless steels. In the experimental procedure, external low-pressure cooling and internal high-pressure cooling was applied alternatively. The performance evaluation for the different working conditions was achieved through the application of different strategies, such as wear observation, surface roughness, hole tolerance, vibration analysis and chip formation.

The obtained results show that the drills with three cutting edges produce holes with a better finish and dimensional tolerance when compared to conventional drills. However, despite having better characteristics from a quality standpoint, the three cutting edges drills had difficulty maintaining the integrity of the cutting edges, given their more compact construction. The most important factor to increase the number of holes made is the use of high-pressure internal cooling. When external cooling was used, AISI 304 had a worse behavior than duplex stainless steel, due to greater susceptibility to built-up-edge formation and work hardening. Tool deterioration mainly manifested itself in the form of non-uniform chipping for the external coolant and uniform flank wear for the internal coolant. Thereby, when choosing between drills of two and three cutting edges, the relationship between quality and productivity that each tool offers must be taken into account.

Keywords: Austenitic stainless steel; Duplex stainless steel; Three Flute Drill; Three cutting edges; Cooling; Drilling; Tool Life; Roughness; Hole tolerance; Vibration; Chips

ÍNDICE

Índice de Figuras	vi
Índice de Quadros	x
Simbologia	xi
Abreviaturas.....	xii
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 – Enquadramento e motivação do trabalho	1
1.2 – Objetivos e metodologia	2
1.3 – Estrutura da dissertação	3
Capítulo 2 - Enquadramento teórico	4
2.1 – Caracterização dos aços inoxidáveis.....	4
2.1.1 – Efeito dos elementos de liga	5
2.1.2 – Aços inoxidáveis ferríticos	7
2.1.3 – Aços inoxidáveis martensíticos	7
2.1.4 – Aços inoxidáveis austeníticos	8
2.1.5 – Aços inoxidáveis endurecidos por precipitação.....	8
2.1.6 – Aços inoxidáveis duplex	9
2.1.7 – Análise da maquinabilidade dos aços inoxidáveis	10
2.2 – Operação de furação	11
2.2.1 – Geometria das brocas	11
2.2.2 – Comparação entre brocas de 2 e 3 gumes	14
2.2.3 – Fluido de corte.....	16
2.3 – Deterioração da ferramenta	17
2.3.1 – Mecanismos causadores de deterioração.....	18
2.3.2 – Tipos de deterioração.....	19
2.4 – Métodos de monitorização do desgaste	23
2.4.1 – Medição do desgaste na ferramenta	23
2.4.2 – Variações no diâmetro interno	25
2.4.3 – Acabamento superficial	25
2.4.4 – Análise de vibrações	27

2.4.5 – Formação de aparas	29
Capítulo 3 - Método experimental	33
3.1 – Material	33
3.2 – Ferramentas	34
3.3 – Equipamento.....	35
3.3.1 – Centro de maquinagem.....	35
3.3.2 – Equipamento para caracterizar a furação	36
3.4 – Procedimento experimental e estratégia de maquinagem	40
3.4.1 – Parâmetros de corte.....	41
3.4.2 – Avaliação e correção do run-out.....	43
3.4.3 – Fluido de corte.....	43
Capítulo 4 - Resultados e discussão	45
4.1 – Testes preliminares com brocas de 2 gumes de corte.....	45
4.1.1 – Localização da deterioração na ferramenta	45
4.1.2 – Evolução da deterioração.....	47
4.1.3 – Influência da geometria da ferramenta no material	48
4.2 – Testes com brocas de 3 gumes de corte	48
4.2.1 – Localização da deterioração na ferramenta	48
4.2.2 – Evolução da deterioração.....	51
4.3 – Estudo comparativo entre brocas de 2 e 3 gumes de corte.....	53
4.3.1 – Rugosidade	53
4.3.2 – Dimensão dos furos	55
4.3.3 – Análise de vibrações	59
4.3.4 – Formação de aparas	66
Capítulo 5 - Conclusões gerais e trabalhos futuros	70
5.1 – Síntese do trabalho e conclusões gerais	70
5.2 – Desenvolvimentos futuros.....	72
Referências bibliográficas	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Taxa de oxidação de uma liga evidenciada pela variação do peso em função do teor em cromo, ao fim de 52 meses (Carbó, 2008).	4
Figura 2. Teor de níquel e cromo em % de massa para as diferentes classes de aços inoxidáveis – adaptado de (Britannica, 2021).....	7
Figura 3. Evolução da microestrutura da ferrite, duplex e austenite com a adição de níquel (IMOA, 2014).	9
Figura 4. Avaliação qualitativa das várias classes de aços inoxidáveis – adaptado de (Bertelli, et al., 2005).	10
Figura 5. Ilustração das diferentes partes de uma broca, com as respetivas designações – adaptado de (Mitsubishi Materials, 2020).....	12
Figura 6. Diferentes tipos de geometria de ponta especial, definidos na norma DIN 1412 (StimZet, 2021).....	14
Figura 7. Aresta transversal de uma broca de 2 gumes de corte (Manufacturing News, 2019).	15
Figura 8. Aresta transversal de uma broca de 3 gumes de corte (Manufacturing News, 2019).	15
Figura 9. Curvas de desgaste da ferramenta para diferentes velocidades de corte ($V_1 > V_3$) – adaptado de (Groover, 2010).	17
Figura 10. Evolução do desgaste em função da temperatura gerada pelos parâmetros de corte (Souza, 2011).	18
Figura 11. Formação de desgaste exagerado na face de incidência principal (Sandvik, 2018).	20
Figura 12. Formação de desgaste exagerado nas arestas secundárias de corte (Sandvik, 2018).	20
Figura 13. Formação de apara aderente na aresta principal de corte (Sandvik, 2018).	21
Figura 14. Formação de fraturas na aresta de corte principal (Sandvik, 2018).	21
Figura 15. Formação de fraturas no canto externo da ferramenta (Sandvik, 2018). ..	22
Figura 16. Formação de fraturas na aresta transversal da ferramenta (Sandvik, 2018).	22
Figura 17. Variação da precisão dimensional, face à circularidade (a) e linearidade (b) (OSG, 2021).	25

Figura 18. Pobre qualidade superficial acentuada pelo entupimento de aparas (Sandvik, 2015).	25
Figura 19. Passagem do domínio do tempo para o domínio de frequência (AAVOS, 2014).	28
Figura 20. Dependência da aceleração, velocidade e deslocamento a velocidade constante em função da frequência (Pérez, 2015).	29
Figura 21. Plano ortogonal de corte (Groover, 2010).	29
Figura 22. Efeito do ângulo de cisalhamento ϕ na espessura da avara: (a) ângulo ϕ maior com uma espessura de avara (t_c) inferior; (b) ângulo ϕ menor com uma espessura de avara (t_c) superior. (Groover, 2010)	30
Figura 23. Tipos de avara formados em operações de corte: (a) Descontínua; (b) Contínua; (c) Contínua com avara aderente; (d) Serrilhada. (Groover, 2010)	31
Figura 24. Formação da avara helicoidais junto à zona de corte (Batzer, et al., 1998).	31
Figura 25. Ensaio de medição da dureza: (a) e (b) fotografias do durómetro; (c) indentações no material.	33
Figura 26. Diferenças geometrias nas brocas de: (a) 2 gumes de corte; (b) 3 gumes de corte.	34
Figura 27. Centro de maquinagem Haas UMC-750SS, utilizado nos testes (Haas, 2020).	35
Figura 28. Microscópio digital e sistema de aquisição/tratamento de imagem, utilizado na medição da deterioração das brocas.	36
Figura 29. Disposição do equipamento para medição da rugosidade.	36
Figura 30. Micrómetro de interiores de 3 pontos, usado nas medições.	37
Figura 31. Fixação do acelerómetro à árvore de acordo com o sistema de eixos da fresadora CNC.	37
Figura 32. Configurações de montagem e seus efeitos na frequência (PCB Piezotronics, 2002).	38
Figura 33. Variações no sinal captado em função da frequência de amostragem: (a) Sinal analógico real; (b) Sinal captado segundo o teorema de Nyquist; (c) Sinal captado a baixa frequência de amostragem. (Pérez, 2015)	39
Figura 34. Processamento do sinal de vibrações dos 3 eixos, no software MATLAB.	39
Figura 35. Representação do bloco após o fim dos ciclos de furação, gerados no software Mastercam®.	41
Figura 36. Esquematização do movimento de avanço da ferramenta (Sandvik, 2015).	42

Figura 37. Medição do <i>run-out</i> da broca com um comparador.....	43
Figura 38. Visor do refratômetro para uma das medições com concentração de 8,3%.	44
Figura 39. Comparação do nível de deterioração entre a aresta principal e secundária de corte (teste A1).	45
Figura 40. Distribuição da deterioração para o último furo efetuado em cada teste, nas brocas de 2 gumes.	46
Figura 41. Evolução da deterioração nas brocas de 2 gumes, em função do número de furos.	47
Figura 42. Formação de apara aderente nas arestas de corte, num dos testes com refrigeração externa.	49
Figura 43. Distribuição da deterioração para o último furo efetuado em cada teste, nas brocas de 3 gumes.	50
Figura 44. Distribuição da velocidade de corte ao longo da aresta principal de corte (Sandvik, 2015).	51
Figura 45. Gráfico da evolução da deterioração das brocas de 3 gumes.	52
Figura 46. Gráfico de barras da rugosidade superficial nos diferentes testes.	53
Figura 47. Perfil de distribuição da rugosidade ao longo dos furos.	54
Figura 48. Gráficos da variação de diâmetro à profundidade de 25 mm, para brocas de 2 gumes.	55
Figura 49. Gráficos da variação de diâmetro à profundidade de 25 mm, para brocas de 3 gumes.	56
Figura 50. Variações na linearidade provocadas pelo desvio da broca ao longo da linha de eixo.	57
Figura 51. Gráfico de variação média do diâmetro máximo no topo e fundo dos furos.	58
Figura 52. Gráfico típico do domínio de tempo durante a operação de furação.	59
Figura 53. Valores de RMS e pico para os diferentes testes em domínio de tempo.	60
Figura 54. Frequências naturais e harmónicas do equipamento, na ausência de corte.	61
Figura 55. Vibração induzida nas brocas com 2 gumes de corte com diferentes níveis de deterioração: teste A1 (32º furo), teste B1 (60º furo), teste A2 (60º furo) e teste B2 (60º furo).	63
Figura 56. Vibração induzida nas brocas com 3 gumes de corte com diferentes níveis de deterioração: teste C1 (3º furo), teste C2 (60º furo), teste C3 (30º furo) e teste C4 (60º furo).	64

Figura 57. Gráfico em cascata da vibração induzida para os furos realizados no teste C4.....	65
Figura 58. Formação de aparas irregulares na fase final de vida da broca, no furo 30 do teste C3.	66
Figura 59. Forma típica das aparas com brocas de 2 gumes para os respetivos testes	67
Figura 60. Forma típica das aparas com brocas de 3 gumes para os respetivos testes.	67
Figura 61. Enrolamento de aparas à volta da ferramenta.	68

ÍNDICE DE QUADROS

Tabela 1. Critério de fim de vida útil para desgaste e fratura presente na norma (ISO 8688-1, 1989).....	24
Tabela 2. Condições de medição da rugosidade de acordo com a norma (ISO 4288, 1996).....	26
Tabela 3. Forma típica das aparas nas operações de furação (Mitsubishi Materials, 2020).....	32
Tabela 4. Composição química, em percentagem de massa, dos materiais testados.	33
Tabela 5. Propriedades mecânicas dos materiais testados.	33
Tabela 6. Condições aplicadas aos testes e número de furos realizados.....	41
Tabela 7. Parâmetros de corte utilizados para as diferentes geometrias de brocas.	42

SIMBOLOGIA

Parâmetros de corte

f_z	Avanço por dente [mm/dente]
n	Velocidade de rotação [rpm]
V_c	Velocidade de corte [m/min]
V_f	Velocidade de avanço [mm/min]
VB	Desgaste na face de saída principal [mm]
CH	Desgaste por fratura ou lascamento [mm]
Z_n	Número de gumes de corte

Parâmetros de Rugosidade

Ra	Rugosidade média [μm]
Rz	Rugosidade em altura média entre o vale e o pico [μm]

Parâmetros de Vibração

A	Amplitude [m/s^2]
F	Frequência [Hz]
F_s	Frequência de amostragem [Hz]

Parâmetros de Formação de Aparas

α	Ângulo de inclinação
ϕ	Ângulo de cisalhamento
t_c	Espessura da apara
t_o	Profundidade de corte

ABREVIATURAS

CNC	Computer Numerical Control (Controlo Numérico Computadorizado)
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DIN	Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão para Normalização)
EDM	Electrical Discharge Machining (Eletroerosão)
EN	European Standard (Norma Europeia)
EU	Unidades de Engenharia
ISEC	Instituto Superior de Engenharia de Coimbra
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional de Normalização)
MQL	Minimum Quantity Lubrication (Quantidade mínima de lubrificante)
PVD	Physical Vapor Deposition (Deposição Física de Vapor)
RMS	Root Mean Square (Valor eficaz)
WC	Carboneto de tungsténio

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 – Enquadramento e motivação do trabalho

A criação de produtos tem sido uma atividade essencial para o desenvolvimento das civilizações, mesmo antes dos primeiros registos históricos. As primeiras evidências de operações de furação remetem para a pré-história (Gwinnett & Gorelick, 1998), uma das tecnologias de fabrico mais primitivas tem acompanhado a evolução da espécie humana ao longo dos tempos, estando presente nos mais grandiosos feitos da humanidade, tais como a exploração marítima, revolução industrial, aviação, revolução digital, corrida espacial, entre outros. Muitos de nós não se dão conta, mas a furação está presente na produção dos produtos mais complexos até aos mais meros objetos do nosso cotidiano.

As operações de furação encontram-se dentro da categoria dos processos de fabrico subtrativos e são usadas para remover o excesso de material de uma peça inicial, para que a forma resultante tenha a geometria desejada. Isto é alcançado por uma ferramenta rotativa mais dura e resistente, que normalmente possui duas arestas de corte. Onde o movimento de avanço é realizado numa direção paralela ao eixo de rotação em direção à peça (Groover, 2010). Entre os processos de maquinagem, a furação é uma das operações mais importantes no corte de metais, representando aproximadamente 33% das operações (Çaydaş, et al., 2011). Contudo, sob condições de corte constantes a falha da broca é um processo estocástico inevitável. As razões para a variação da sua vida útil são a falta de homogeneidade na peça de trabalho e materiais da broca, respetivas propriedades mecânicas, fluido de corte e irregularidades associadas ao seu movimento e assimetria inevitável introduzida durante a deterioração das arestas de corte (Jantunen, 2002). O estado da ferramenta, durante a produção de qualquer peça, afeta a qualidade do produto no sentido da sua precisão dimensional e acabamento superficial.

Face ao consumo crescente das economias, as empresas de hoje em dia têm de se adaptar e tornar cada vez mais eficientes ao ponto de conseguirem aumentar a sua produção para o mesmo espaço de tempo, impondo uma exigência cada vez maior sobre as ferramentas para satisfazer a demanda atual. Como resultado, fabricantes e investigadores têm unido esforços para desenvolver ferramentas e materiais tecnologicamente mais avançados para compensar as exigências. Como reflexo, a monitorização da deterioração tem recebido um foco especial nos últimos anos, por ter dados alguns dos maiores contributos para alcançar este objetivo. Os métodos de monitorização permitem compreender melhor e prever o momento de falha da ferramenta, maximizando a sua utilização até ao fim da vida útil (Simon & Deivanathan, 2019).

O processo de caracterização das operações de furação é especialmente importante na maquinagem de materiais exigentes. Os aços inoxidáveis que têm aumentado o seu consumo de forma significativa nos últimos 20 anos, a um ritmo de 5% face aos restantes metais, representam algumas das ligas mais difíceis de maquinar. Os aços inoxidáveis austeníticos e duplex são considerados os melhores em resistência à corrosão entre as diferentes ligas de aços inoxidáveis. Devido à alta resistência, as aplicações de aços inoxidáveis duplex têm aumentado como

uma alternativa às ligas austeníticas. Nesse sentido, o estudo da maquinagem desses materiais é uma questão importante, a fim de melhor compreender o desempenho das ferramentas e a qualidade das peças fabricadas para indústrias de alta demanda. O pobre desempenho das brocas nestes materiais deve-se essencialmente à baixa condutividade térmica (inferior em 50% à dos aços carbono simples), alta ductilidade, alta resistência à tração, tendência para encruar e reatividade com a maioria dos materiais de ferramenta a altas velocidades de corte (Nomani, et al., 2013).

A elaboração deste trabalho surge da oportunidade de colaborar com a equipa de desenvolvimento do fabricante de ferramentas Palbit®, que durante o desenvolvimento das suas brocas de três gumes de corte se demonstrou disponível para colaborar com o DEM do ISEC, que ao momento se encontrava a estudar o processo de furação do aço inoxidável duplex. Foi neste contexto que surgiu o interesse, por ambas as partes, em aprofundar os seus conhecimentos na maquinagem dos aços inoxidáveis austeníticos e duplex com brocas de três gumes, tendo como ponto de referência as brocas de dois gumes.

1.2 – Objetivos e metodologia

Pouca ou quase nenhuma informação se encontra publicada nos meios científicos sobre a utilização de brocas de três gumes, apesar de ser uma tecnologia já com alguns anos. Os estudos mais aprofundados remetem para os finais da década de 80 e inícios da década de 90 (Ema, et al., 1988; Ema, et al., 1991; Agapiou, 1993), mas no meio tempo, estas ferramentas têm vindo a ser esquecidas apesar dos esforços constantes por parte dos fabricantes para as aperfeiçoar. Adicionalmente, estudos recentes como o de Sultana et al. (2015) e de Nomani et al. (2015) a respeito da maquinabilidade de aços inoxidáveis austeníticos e duplex, respetivamente, destacam a falta de informação para estabelecer condições de trabalho ótimas.

Assim, com o intuito de contribuir para o conhecimento científico, o trabalho apresentado visa estudar o comportamento das brocas de três gumes para diferentes tipos de refrigeração, quando aplicadas na furação de aços inoxidáveis austeníticos e duplex. Em simultâneo, foram realizados os mesmos testes para brocas de dois gumes, que representam o padrão utilizado na indústria, com o objetivo de criar um ponto de referência.

Para o efeito, em primeiro lugar foram realizados vários testes em ambiente controlado, com base numa análise prática para identificar os mecanismos e tipos de deterioração predominantes, ao mesmo tempo que foi adquirido o sinal de vibrações. Posteriormente, foram aplicadas estratégias distintas para avaliar a sua eficácia na identificação de indícios de deterioração, tais como a medição da rugosidade superficial, tolerância dimensional dos furos, análise de vibrações e formação de aparas.

No final do trabalho, espera-se ter reunido informação suficiente para caracterizar as brocas de três gumes numa perspetiva da qualidade dos furos e longevidade da ferramenta, através da compreensão dos mecanismos de deterioração, de maneira a ser possível a criação de uma linha de raciocínio para controlar o processo de furação e prever a evolução do comportamento das ferramentas.

1.3 – Estrutura da dissertação

Os temas descritos ao longo do trabalho serão abordados exclusivamente na perspectiva da furação, sendo apenas apresentados os conceitos que ajudam a explicar a metodologia usada. Parte dos temas podem tornar-se complexos quando aprofundados, sem que em nada contribua para a descrição do que é pretendido abordar, acabando por fugir da mensagem que se pretende transmitir. Sendo assim, o trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos.

No capítulo 1 é realizada uma contextualização do trabalho, acompanhada dos motivos que fundamentam a sua execução e o modo como este se encontra organizado.

Seguidamente, no capítulo 2 são apresentadas as bases teóricas que sustentam as decisões tomadas durante a execução do trabalho e que ajudam a explicar os conceitos transmitidos na perspectiva dos materiais ensaiados, ferramentas, critérios e parâmetros para mensurar a vida útil e os métodos de avaliação.

O capítulo 3 aborda a componente experimental onde se realiza uma descrição detalhada das propriedades dos materiais, geometria e revestimentos das brocas e procedimento adotado na realização dos testes. São ainda identificados os equipamentos, cuidados a ter e respetivos parâmetros.

A apresentação e discussão dos resultados é efetuada no capítulo 4, onde são expostos gráficos e imagens que ajudam a entender os conceitos.

Finalmente, no capítulo 5, referem-se as conclusões principais e indicam-se algumas perspectivas futuras de desenvolvimento.

CAPÍTULO 2 - ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1 – Caracterização dos aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas ferrosas que apresentam propriedades físicas e químicas superiores aos aços comuns. Constituídas maioritariamente por ferro e crómio, elementos como o carbono, níquel e molibdénio também fazem parte da constituição, mas em menor teor. O elemento crómio desempenha o papel mais importante, pois é este que concede a elevada resistência à corrosão, principal propriedade pela qual os aços inoxidáveis são reconhecidos. Para uma liga ser classificada como aço inoxidável tem de possuir um teor mínimo de 10,5% de crómio, um máximo de 1,2% de carbono e outros elementos de liga. Na figura 1, é visível que para teores superiores a 10,5% de crómio a velocidade de oxidação destas ligas diminui consideravelmente (Carbó, 2008).

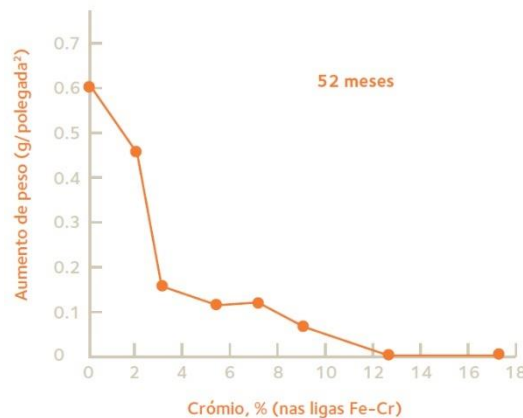


Figura 1. Taxa de oxidação de uma liga evidenciada pela variação do peso em função do teor em crómio, ao fim de 52 meses (Carbó, 2008).

Pela descrição anterior, seria de esperar que o crómio não oxidasse, mas na realidade é o oposto que acontece. O crómio possui uma elevada tendência para se oxidar. É a capacidade deste elemento para reagir com o oxigénio presente no ar, água ou ambiente que permite formar um filme de óxidos protetores, que dão origem ao fenómeno de passivação que evita a propagação da oxidação (Carvalho, 2019). A superfície do material exposta é revestida por uma película de óxido de crómio Cr_2O_3 , impermeável e aderente com uma espessura média de 3nm a 5nm. As características anteriores, aliadas da capacidade regenerativa deste filme, permite ao aço inoxidável resistir à oxidação nos mais variados meios corrosivos (Carbó, 2008; Pessoa, 2008; ISSF, 2020).

A presença de carbono na constituição, normalmente num teor de 0,01 a 0,50%, permite melhorar as propriedades mecânicas das ligas. A quantidade de carbono e crómio pode ser correlacionada, uma vez que o carbono atenua o efeito do crómio. A resistência à corrosão é comprometida na região do contorno de grão devido à ausência de crómio livre de carbonetos.

Para eliminar o efeito do carbono é necessárias aumentar a massa de crómio numa proporção de 17 vezes (Pessoa, 2008).

2.1.1 – Efeito dos elementos de liga

A presença de outros elementos de liga como o níquel, molibdénio, cobre, nitrogénio, nióbio, silício, enxofre, tungsténio, cério, manganês, zircónio, alumínio e titânio contribuem para melhorar as propriedades mecânicas, resistência a altas e baixas temperaturas, resistência a corrosão, trabalhabilidade e outras características desejáveis (Pessoa, 2008; ISSF, 2020; SSINA, 2019).

Crómio

É o elemento mais importante, ao permitir formar uma camada protetora à superfície da liga. Com o aumento do teor em crómio a eficácia da camada passiva aumenta. A presença de crómio promove a formação de ferrite na estrutura granular, funcionando como estabilizador da ferrite.

Carbono

Está sempre presente e permite melhorar a resistência mecânica da liga, com repercussão na capacidade de resistir a corrosão devido a formação de carbonetos. À exceção das ligas martensíticas, o teor é mantido baixo. Nas ligas martensíticas o teor é superior para conferir melhor resistência mecânica e dureza. O carbono tem a particularidade de funcionar como estabilizador da austenite.

Níquel

É imprescindível nas ligas austeníticas, sendo responsável pela sua resistência mecânica, resistência térmica, ductilidade e tenacidade. Em geral, o níquel é responsável por estimular a formação de austenite e melhorar a resistência à corrosão, apesar de não interferir no fenómeno de passivação. Os aços inoxidáveis com um teor entre 8 e 9% possuem uma estrutura totalmente austenítica, o que confere características de trabalho superiores à dos aços inoxidáveis ferríticos. Para condições mais exigentes de trabalhabilidade e resistência à corrosão são usadas ligas com um teor superior. A adição de níquel anula as propriedades magnéticas.

Molibdénio e Tungsténio

A presença de molibdénio aumenta a resistência a corrosão uniforme e localizada (pitting, corrosão em fendas, corrosão sob tensão, etc.), especialmente na presença de ácidos clorídricos. Ambos os elementos funcionam como estabilizadores da ferrite, pelo que carecem de especial atenção quando empregues em aços inoxidáveis austeníticos, de modo a manter o equilíbrio da estrutura austenítica. Nas ligas martensíticas a adição de molibdénio melhora a resistência a altas temperaturas.

Cobre

Aumenta a resistência a corrosão quando em contacto com ácidos e reduz o encruamento. A presença deste elemento favorece a formação de austenite.

Nitrogénio

Melhora a resistência mecânica da liga e aumenta a capacidade de resistir à corrosão uniforme. É um estabilizador da austenite.

Silício

Favorece a resistência a corrosão quando em contacto com ácido sulfúrico e nítrico altamente concentrados. Quando presente em teores elevados, nas ligas austeníticas, previne a cementação a temperaturas elevadas. Em adição, o silício funciona como estabilizador da ferrite.

Enxofre

É adicionado em quantidades baixas para melhorar a maquinabilidade dos aços inoxidáveis, com a desvantagem de reduzir a resistência a corrosão e formar inclusões.

Cério

Melhora a adesão do filme de óxido de cromo a altas temperaturas e aumenta a resistência mecânica das ligas.

Manganês

É adicionado durante a fundição para auxiliar na desoxidação e prevenir a formação de inclusões de sulfeto de ferro, responsáveis por causar fraturas a altas temperaturas. A presença de manganês melhora a solubilidade do nitrogénio nas ligas. Devido a capacidade de favorecer a formação de austenite é usado como substituto do níquel em situações especiais.

Titânio, Nióbio e Zircónio

Os elementos referidos têm uma afinidade superior à do cromo para formar carbonetos, a maior afinidade destes elementos previne a formação de carbonetos de cromo que reduzem a resistência à corrosão. Em situações que não é possível controlar o teor em carbono ou reduzi-lo a níveis baixos é usado titânio ou nióbio para estabilizar as ligas contra a corrosão intergranular. O titânio é o elemento principal na estabilização dos aços inoxidáveis. O nióbio é adicionado às ligas ferríticas para melhorar a resistência à fadiga térmica. Estes elementos têm a capacidade de promover a formação de ferrite.

De forma resumida, a principal diferença entre as classes de aços inoxidáveis reside no teor de cromo e níquel. Os dois elementos de liga mais comuns, constituem grande parte da massa em elementos de liga. A figura 2 relaciona o teor em cromo e níquel para as diferentes classes de aços inoxidáveis, com indicação das ligas que concedem propriedades adicionais.

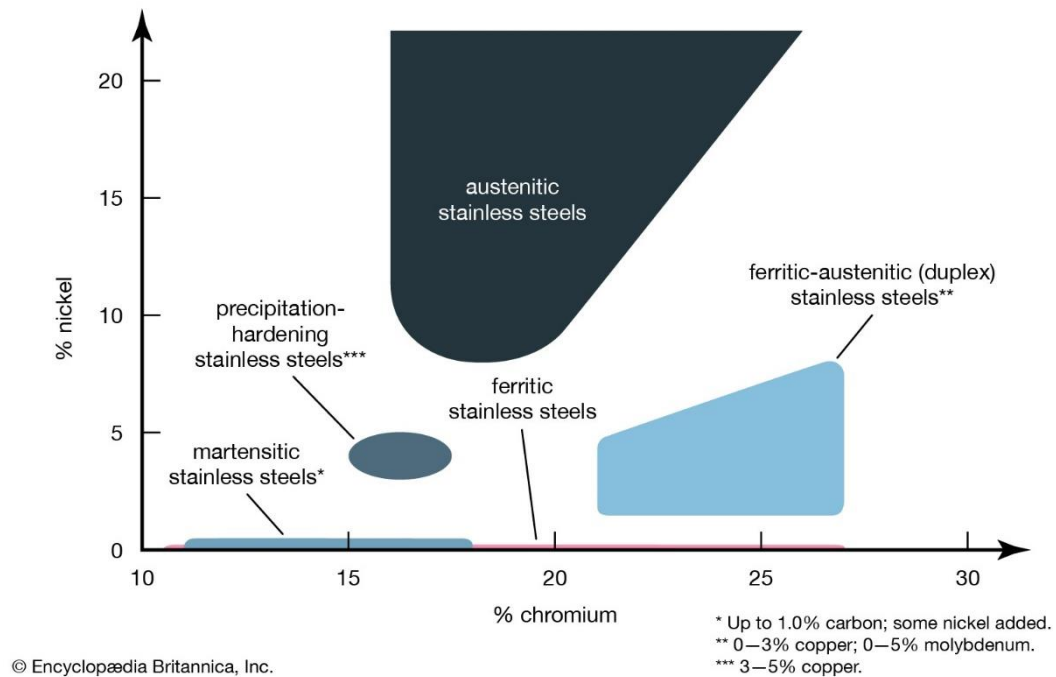


Figura 2. Teor de níquel e cromo em % de massa para as diferentes classes de aços inoxidáveis – adaptado de (Britannica, 2021).

Os elementos de liga e os respectivos teores são ajustados de forma controlada, com o objetivo de obter propriedades específicas para determinada aplicação. A grande diversidade de aços inoxidáveis é distinguida segundo as fases presentes na sua microestrutura.

2.1.2 – Aços inoxidáveis ferríticos

Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas binárias constituídas maioritariamente por ferro e cromo, tipicamente entre 12,5 e 17%, sendo isentas de níquel. A resistência mecânica é inferior à das restantes classes de aços inoxidáveis, resultante do baixo teor em carbono. Apesar da limitada tenacidade a baixas temperaturas apresentam uma confortabilidade aceitável. Possuem propriedades magnéticas com uma estrutura cúbica de corpo centrado (c.c.c.) e não são termicamente tratáveis, mas exibem uma resistência à corrosão superior à dos aços inoxidáveis martensíticos.

A designação de aços inoxidáveis ferríticos resulta do facto de estes apresentarem uma estrutura granular (à base de ferrite) e propriedades (resistência mecânica, ductilidade, etc.) semelhantes à dos aços não ligados de médio teor em carbono (Carbó, 2008; ISSF, 2020).

2.1.3 – Aços inoxidáveis martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos são ligas binárias de ferro e cromo (10,5 a 18%), com um teor em carbono (0,2 a 1,0%) superior ao das restantes classes de aços inoxidáveis. A maior concentração de carbono torna esta classe de aços inoxidáveis mais dura e resistente a

nível mecânico, com o inconveniente de ser menos resistente à corrosão que outros aços inoxidáveis com o mesmo teor de cromo e elementos de liga (Burnett, 2014; ISSF, 2020)

O processo de têmpera permite transformar a ferrite em austenite a altas temperaturas. Durante o arrefecimento, a austenite é transformada em martensite, daí o nome desta classe de aços inoxidáveis. A martensite é uma fase rica em carbono com um comportamento frágil e muito dura.

Em adição, os aços inoxidáveis martensíticos são compostos por uma estrutura tetragonal de corpo centrado (t.c.c.) com um comportamento magnético, pouco dúctil e muito duro, que se traduz numa elevada resistência ao desgaste (Carbó, 2008).

2.1.4 – Aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos são ligas ternárias compostas tipicamente por ferro, 16 a 26% de cromo e 6 a 12% de níquel. A adição de níquel como elemento de liga permite transformar a estrutura ferrítica em austenítica. Em algumas ligas é acrescentado molibdénio para melhorar a resistência à corrosão localizada ou manganês de forma a reduzir o uso de níquel e aumentar a elasticidade. Devido ao baixo teor em carbono não podem ser endurecidos por tratamento térmico, em alternativa são deformados plasticamente abaixo da temperatura de recristalização, o que provoca encruamento do material (Carbó, 2008; ISSF, 2020; Britannica, 2021).

As ligas austeníticas são as mais utilizadas, ao representar cerca de dois terços da produção de aços inoxidáveis. Apresentam uma capacidade superior de resistir à oxidação face as ligas ferríticas e martensíticos e são resistentes ao calor com boas propriedades mecânicas numa ampla gama de temperaturas. Devido à estrutura cúbica de faces centradas (c.f.c.) oferecem uma excelente formabilidade e a deformação pode ser controlada pela composição química. Não manifestam comportamento frágil a baixa temperatura e mantem a elevada tenacidade. Comparativamente as outras ligas têm menor condução térmica que reflete numa maior expansão e capacidade térmica.

Os aços inoxidáveis austeníticos não apresentam características magnéticas, no entanto quando são maquinados ou trabalhados podem manifestar uma ligeira magnetização. Nas zonas onde ocorre deformação, a austenite é transformada em martensite (Carbó, 2008; ISSF, 2020; Burnett, 2014).

2.1.5 – Aços inoxidáveis endurecidos por precipitação

Os aços inoxidáveis endurecidos por precipitação são tipicamente constituídos por ferro, 15 a 17,5% de cromo, 3 a 5% de níquel e 3 a 5% de cobre. Estas ligas são caracterizadas pela sua resistência mecânica, que ocorre da adição de alumínio, cobre, nióbio e titânio em quantidade inferiores a 0,5% da massa total (Britannica, 2021; Burnett, 2014).

Como o nome sugere, são endurecidos pela precipitação de compostos intermetálicos formados pela adição de elementos de liga (alumínio, cobre, nióbio e titânio). A precipitação é conseguida por um tratamento térmico de solubilização, onde os compostos intermetálicos são dissolvidos na matriz austenítica. O controlo da precipitação é conseguido através do processo de envelhecimento posterior. Onde a temperatura (inferior à de solubilização) e tempo são controlados para obter o tamanho ideal de precipitados, o que resulta num aumento da dureza do aço sem provocar distorções, empenos e fissuras como na têmpera (Infomet, 2020).

As ligas endurecidas por precipitação destacam-se pela resistência à corrosão semelhante à das ligas austeníticas e resistência mecânica comparável à das ligas martensíticas (Britannica, 2021; Infomet, 2020).

2.1.6 – Aços inoxidáveis duplex

Os aços inoxidáveis duplex são constituídos tipicamente por ferro, 18 a 27% de crómio, 1 a 8% de níquel, 0 a 5% de molibdénio e 0 a 3% cobre. Alguns fornecedores classificam as ligas duplex em *lean duplex*, *standard duplex* e *super duplex*, consoante a concentração dos elementos e propriedades mecânicas (ISSF, 2020; Britannica, 2021).

As propriedades superiores deste material têm origem na sua microestrutura 1:1 de austenite e ferrite. Ambas as fases se encontram separadas em volumes de iguais dimensões, com ilhas de austenite distribuídas numa matriz ferrítica, conforme ilustrado na figura 3. A fase austenítica é responsável pela ductilidade e resistência à corrosão uniforme, enquanto a fase ferrítica concede uma resistência mecânica superior e auxilia na resistência a corrosão (Infomet, 2020; Saeid, et al., 2008).

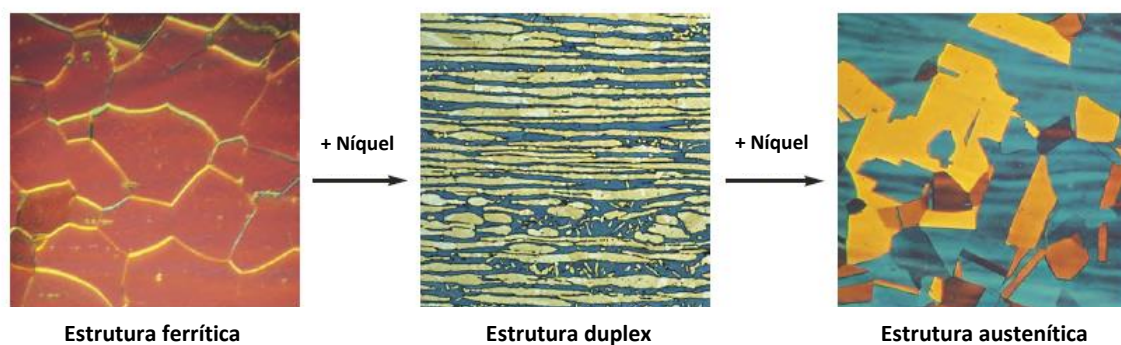


Figura 3. Evolução da microestrutura da ferrite, duplex e austenite com a adição de níquel (IMOA, 2014).

A combinação destas duas fases permite que as ligas duplex sejam mais resistentes à corrosão (uniforme e localizada) e mecanicamente mais resistentes que as ligas austeníticas e ferríticas (Britannica, 2021). Estas são ferromagnéticas e apresentam uma expansão térmica situada entre a dos aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos, com as restantes propriedades térmicas semelhantes à dos aços carbono simples. A baixas temperaturas deixam de ter um

comportamento dúctil para passar a quebradiço. Apresentam uma formabilidade razoável, no entanto requer esforços superiores aos usados nos aços inoxidáveis austeníticos (ISSF, 2020).

2.1.7 – Análise da maquinabilidade dos aços inoxidáveis

Em inúmeros estudos, com os de Kulkarni, et al. (2013) e Nomani, et al. (2013) é relatada a dificuldade acrescida para maquinar aços inoxidáveis relativamente a outros materiais, esta diferença de maquinabilidade é apresentada na figura 4 através de uma avaliação qualitativa. O elevado encruamento destes aços ao serem trabalhados juntamente com a baixa condutividade térmica, elevada dureza e tenacidade, são considerados os principais fatores para a sua pobre maquinabilidade. Os valores da dureza junto à superfície maquinada podem duplicar face ao valor inicial (Gomes, 2013).

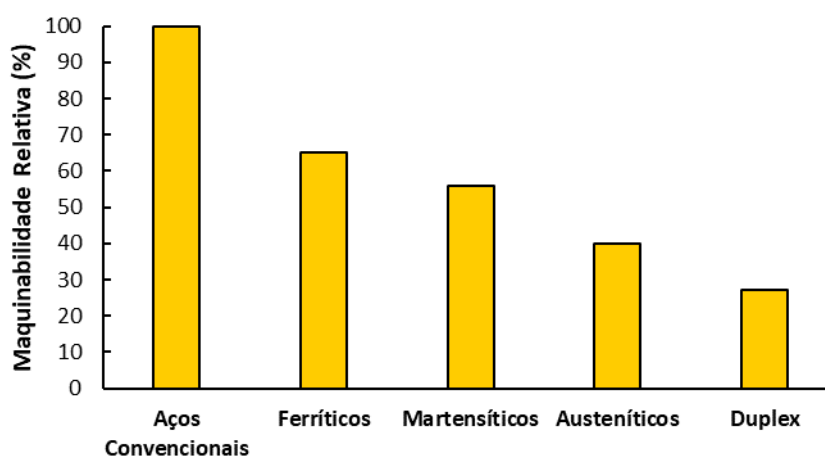


Figura 4. Avaliação qualitativa das várias classes de aços inoxidáveis – adaptado de (Bertelli, et al., 2005).

Do ponto de vista da maquinação, a característica mais importante é a tendência para encruar. Este é um fenómeno modificador da estrutura, quando um material é deformado plasticamente abaixo da temperatura de recristalização ocorre um aumento da sua resistência. Este fenómeno é exacerbado na presença da fase austenítica, que possui maior tendência para deformar devido ao maior número de planos deslizantes. Durante a deformação ocorre um aumento da resistência mecânica e da dureza, resultante da transformação da austenite metaestável (martensite) abaixo de certa temperatura. A martensite é um dos constituintes mais duros nos aços, pelo que contribui fortemente para o aumento das características anteriormente mencionadas (Dolinsek, 2003). A temperatura elevada gerada durante o corte devido a resistência mecânica e dureza, juntamente com a baixa condutividade térmica levam a uma concentração de calor na zona de corte, o que acelera o desgaste da ferramenta por difusão.

A elevada resistência à tração destes materiais resulta em forças de corte altas, que diminuem o desempenho da ferramenta ao provocar desgaste severo. De forma similar, a elevada tenacidade faz aumentar a temperatura que diminui a eficiência da quebra de aparas. Em casos extremos, as aparas longas começam a acumular e acabam por entupir o canal de extração, o que leva a quebra da ferramenta.

Ao contrário dos aços convencionais, os aços inoxidáveis sofrem de formação de aparas aderente mesmo a elevadas velocidades de corte. Devido à alta tenacidade e encruamento destes aços é necessária muita energia para formar aparas, que ao serem removidas durante o corte, exercem altas pressões na aresta de corte. Estas pressões combinadas com as temperaturas elevadas na interface aparas-ferramenta provocam a fundição de porções de aparas a ferramenta, o que prejudica a extração das restantes aparas. A pobre extração de aparas dá origem a um aumento das forças de corte, que por sua vez faz aumentar ainda mais a temperatura e causa mau acabamento superficial.

Nos aços inoxidáveis de alta liga é observado um desgaste ainda superior, a presença de inclusões de carboneto abrasivo acelera o desgaste, o que resulta num pior desempenho da ferramenta e intensifica os restantes mecanismos de deterioração.

A porosidade é outra problemática na maquinagem de aços inoxidáveis, especialmente naqueles que são produzidos por fundição. Devido aos poros o corte tende a ser interrompido o que causa um aumento da vibração na ferramenta e acelera o desgaste. As ferramentas que trabalham nestas circunstâncias tendem a apresentar um desgaste prematuro. Em adição, a porosidade diminui a condutividade térmica, é conseqüentemente a vida útil da ferramenta que está exposta a temperaturas mais elevadas por maiores períodos de tempo (Paro, et al., 2001; Silva, et al., 2007).

2.2 – Operação de furação

O processo de furação é um dos mais utilizados na indústria de produção. Grande parte das peças produzidas têm pelo menos um furo. Apesar da sua importância, este é um processo que tem ficado esquecido a nível de investigação.

Consoante o material a perfurar as exigências sobre a ferramenta variam, por esse motivo, a seleção da broca com a estrutura adequada é extremamente importante para o resultado da furação. As características do material a processar são extremamente importantes, como anteriormente referido, mas de igual modo, as características da broca carecem de especial atenção. Fatores como a geometria, material constituinte, fluido de corte e parâmetros de furação influenciam drasticamente o seu desempenho e vida útil.

Em termos de tolerância geométrica este processo carece de igual atenção, a execução de furos longos compromete a estabilidade da broca, ao reduzir a viabilidade de furos com um comprimento três vezes superior ao seu diâmetro ($L/D > 3$), sob o risco de ocorrência de excentricidade (Diniz, et al., 2014).

2.2.1 – Geometria das brocas

Consoante a aplicação, as brocas podem ser concebidas com diversas geometrias, algumas delas extremamente complexas. Na perspetiva do estudo desenvolvido, não é pretendido analisar as diferentes geometrias, mas sim o desempenho de um tipo de brocas em específico, sendo estas as brocas helicoidais de dois e três gumes de corte. Assim sendo, o

seguinte tópico é apresentado com a finalidade de contextualizar os termos utilizados ao longo do trabalho. Os termos utilizados para identificar as partes constituintes da broca, referidos na figura 5, são baseados na norma ISO 5419 (1982).

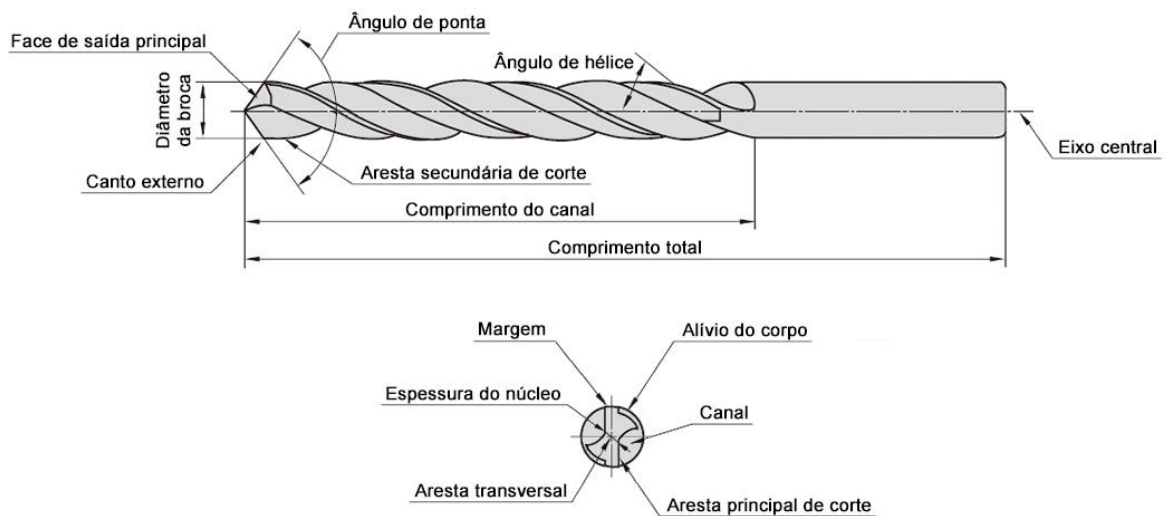


Figura 5. Ilustração das diferentes partes de uma broca, com as respetivas designações – adaptado de (Mitsubishi Materials, 2020).

As brocas helicoidais são caracterizadas por muitas partes e recursos que as distinguem das demais. No entanto, muitas destas características são interdependentes, o que simplifica o processo de descrição. Abaixo são apresentados os principais termos que permitem compreender o princípio de funcionamento das mesmas (Ruko, 2018; Diniz, et al., 2014; ISO 5419, 1982).

Aresta principal de corte

As arestas principais de corte são as responsáveis pela remoção de material e são formadas pela interseção da face de saída principal com o canal.

Aresta secundária de corte

As arestas secundárias de corte ajudam na remoção do material e têm como função adicional remover as aparas que adiram à superfície lateral do furo. Estas são formadas pela abertura dos canais.

Aresta transversal

A aresta transversal não possui qualquer capacidade de corte, pelo que é responsável por esmagar parte do material, ao exercer pressão e fricção. Em simultâneo o material esmagado é desviado em direção as arestas principais de corte que fazem a sua remoção. Estas propriedades, desfavoráveis para o processo de furação, são responsáveis por parte da energia consumida que é convertida em calor. No entanto, esta é essencial para a integridade da broca, uma vez que conecta as duas arestas principais de corte.

Ângulo de hélice

É uma das principais características da broca, a sua inclinação determina o processo de formação das aparas. O ângulo de hélice é formado pela inclinação do canal com o eixo central da broca. Ângulos de hélice maiores favorecem a remoção de aparas de forma eficaz em materiais macios, com tendência a produzir aparas longas, como alumínio, cobre ou plástico macio. Em oposição, ângulos de hélice pequenos são preferíveis para materiais duros, com aparas curtas, quebradiços e resistentes, tais como aço, plástico duro, acrílico ou laminados.

Brocas com um ângulo de hélice pequeno, entre 10° a 19°, apresentam uma hélice com um aspeto estendido. Em contraste, as brocas com um ângulo de hélice grande, no intervalo dos 27° a 45°, apresentam uma hélice curta e comprimida. Valores compreendidos entre 19° e 40° são os mais comuns e são considerados normais.

Ângulo de ponta

O ângulo de ponta é responsável pela centragem da broca em relação ao material. A utilização de ângulos menores facilita a centragem, em especial nas superfícies curvas ou irregulares, ao diminuir o risco de escorregamento. Em contraste, ângulos superiores dificultam a centragem e diminuem o tempo de furação em troca de uma pressão de contacto superior. O ângulo é medido entre as arestas de corte principais e condiciona o comprimento da aresta principal de corte, que é maior para ângulos menores e vice-versa.

Canto externo

É o canto formado pela interseção das arestas de corte principal e corte secundário.

Eixo central

É a linha reta imaginária que atravessa o centro longitudinal da broca.

Canal

Ranhura helicoidal no corpo da broca responsável pela remoção de aparas e que permite ao fluido de corte alcançar a aresta de corte principal (refrigeração externa). A profundidade do canal determina a espessura do núcleo da broca.

Espessura do núcleo

A espessura do núcleo é determinante para a estabilidade da broca. Diâmetros de núcleo grandes conferem maior rigidez, sendo mais adequados para esforços de corte superiores e materiais mais duros. Como consequência da maior rigidez as brocas tendem a ser menos suscetíveis a forças laterais e mais resistentes a vibrações.

Margem

É criada através de um alívio no corpo com o intuito de diminuir o atrito por fricção entre a ferramenta e a superfície lateral do furo. As margens funcionam como guias que são projetados ao longo dos canais para garantir a orientação da broca no furo. A qualidade de acabamento das paredes do furo depende das margens.

Face de saída principal

Corresponde à superfície frontal da broca de forma cônica, também designada de flanco ou face de incidência. Normalmente, nestas faces é efetuado um acabamento especial para reduzir o tamanho da aresta transversal. Esta geometria de ponta especial melhora a capacidade de centragem e reduz de forma substancial as forças de corte.

Consoante a aplicação, existem vários tipos de geometria de ponta especiais, as formas mais comuns encontram-se padronizados na norma DIN 1412, figura 6. As brocas utilizadas na realização deste trabalho correspondem ao tipo C, o qual permite reduzir de forma considerável o comprimento da aresta transversal, que resulta num desempenho superior, uma vez que, existe menos esmagamento de material.

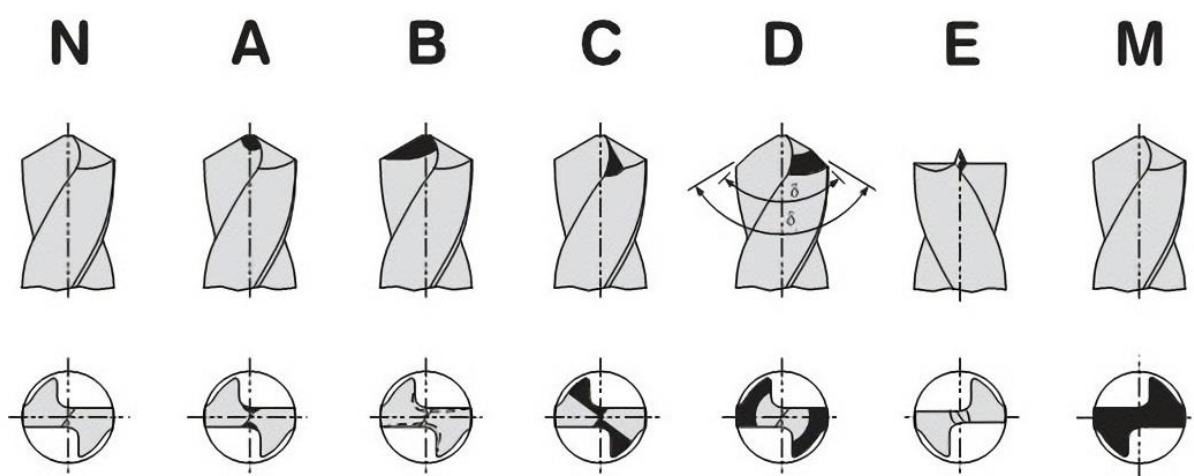


Figura 6. Diferentes tipos de geometria de ponta especial, definidos na norma DIN 1412 (StimZet, 2021).

2.2.2 – Comparação entre brocas de 2 e 3 gumes

A utilização de brocas de três gumes de corte não é uma prática comum, apesar de ser uma tecnologia já com alguns anos. Estas foram desenvolvidas com o objetivo de criar furos com melhor precisão sem necessidade de utilizar mandris. Artigos como o de (Ema, et al., 1988) reportam várias vantagens relativamente as brocas convencionais. O estudo referido demonstra que a vibração associada ao movimento de rotação (designado pelos autores de *whirling vibration*), comum nas brocas convencionais, tende a desaparecer na utilização de brocas de três gumes. Esta vibração é responsável por originar furos distorcidos de forma poligonal com um número ímpar de lados e marcas de estrias. Devido à ausência desta vibração, os furos criados tendem a apresentar uma circularidade, excentricidade e linearidade superior.

A adição de um terceiro gume de corte aumenta a área da secção transversal, o que torna estas brocas significativamente mais rígidas, ao apresentar uma rigidez torsional e resistência à flexão superior. No entanto, apesar da maior rigidez as brocas de três gumes demonstram ser mais suscetíveis aos parâmetros de corte, em contraste às brocas convencionais que suportam condições mais severas (Agapiou, 1993).

Nas brocas convencionais, a aresta transversal tem a forma de uma linha devido à interseção das duas faces de saída principal, visível na figura 7. Esta geometria concede um comportamento instável no momento inicial de contacto entre a ferramenta e a peça. A aresta transversal em forma de linha contacta com a peça em diversos pontos simultaneamente, o que promove um escorregamento da broca em relação a sua trajetória inicial. Este escorregamento dá origem a um movimento oscilatório que diminui a qualidade dos furos criados.

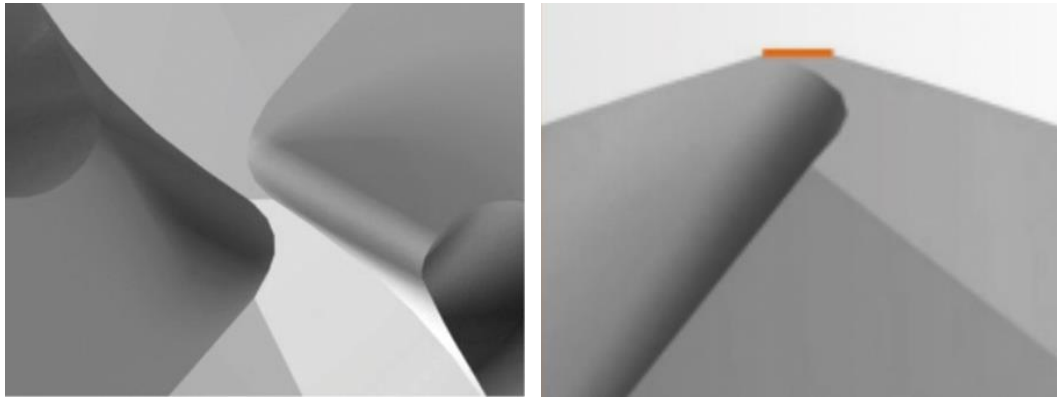


Figura 7. Aresta transversal de uma broca de 2 gumes de corte (Manufacturing News, 2019).

Por sua vez, as brocas de três gumes apresentam uma aresta transversal em forma de estrela devido à interseção de três faces de saída principal, visível na figura 8. A interseção das três faces cria um ponto de convergência que concede um efeito autocentrante, isto é, a ferramenta contacta com o material num ponto específico que juntamente com a distribuição das forças pelos três gumes impede a broca de desviar-se da sua trajetória (Pivkin, et al., 2020).

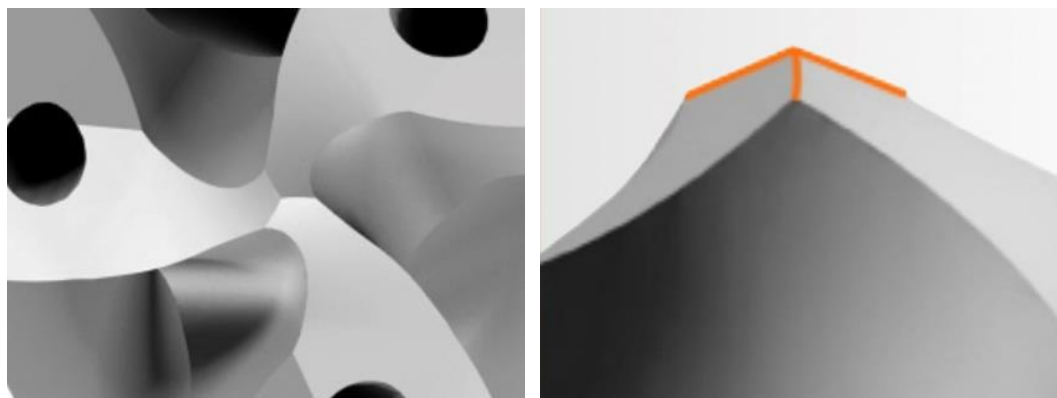


Figura 8. Aresta transversal de uma broca de 3 gumes de corte (Manufacturing News, 2019).

Apesar das suas vantagens, a adição de um terceiro canal para extração de aparas implica que estes tenham uma secção menor face as brocas convencionais, o que torna a utilização de refrigeração interna imprescindível para evitar a aglomeração de aparas em condições mais exigentes. De igual forma, a adição de uma terceira aresta de corte resulta num aumento das forças de corte (Ema, et al., 1991).

2.2.3 – Fluido de corte

A utilização de fluidos de corte com capacidades lubrificantes e refrigerantes permite reduzir a temperatura gerada na zona de corte, ao baixar as forças de maquinagem, arrefecer e minimizar o atrito gerado nas interações entre a peça, ferramenta e aparas. A diminuição do calor gerado evita que ocorram grandes dilatações térmicas, o que favorece o corte e diminui o aparecimento de vibrações que afetam o tempo de vida útil da ferramenta.

A eficácia do fluido de corte depende de fatores como a sua viscosidade, condutividade térmica, concentração e capacidade de penetração. A altas velocidades a penetração do fluido é dificultada, nestas situações quando possível, a refrigeração externa a baixa pressão é substituída por refrigeração interna a pressões superiores. Na refrigeração interna são utilizadas brocas concebidas com canais internos que permitem levar o fluido até à zona de corte, a utilização de pressões elevadas neste processo beneficia a extração das aparas ao quebrar e impulsionar através dos canais de extração. A má remoção de aparas resulta num aumento do atrito que favorece o desenvolvimento de calor, que pode levar ao recozimento do material e alterar a sua estrutura, ou em último caso, à rotura da broca (Souza, 2011; Diniz, et al., 2014).

No entanto, a utilização destes fluidos apresenta custos elevados e grandes impactos ambientais. Estudos como o de Gandarias, et al. (2008) tentaram implementar técnicas como a quantidade mínima de lubrificante (MQL) para reduzir o uso de fluidos de corte. Os resultados obtidos demonstraram que na maquinagem de aços inoxidáveis a utilização de lubrificantes é imprescindível, com resultados consideravelmente piores para a MQL face à refrigeração interna. O fluido de corte evita o surgimento de aparas aderente, principalmente na maquinagem de aços inoxidáveis onde a sua ductilidade favorece a adesão.

De forma resumida, as principais funções do fluido de corte passam por:

- Baixar a temperatura;
- Diminuir o coeficiente de atrito;
- Diminuir forças de corte;
- Ajudar na extração de aparas;
- Evitar aparas aderente;
- Aprimorar o acabamento superficial;
- Melhorar as tolerâncias dimensionais;
- Proteger contra a corrosão.

Os diversos fluidos de corte podem ser classificados em três categorias, sendo elas ar, tipo aquoso (água ou emulsões) e óleos. O ar, ao contrário dos restantes é mais barato e não poluente, mas em contrapartida o seu poder refrigerante e lubrificante é inferior. Em situações em que a utilização de líquidos é indesejada o ar é usado como alternativa. Em geral, as emulsões fornecem uma melhor refrigeração que os óleos, mas em compensação os óleos são melhores em situações mais exigentes com esforços superiores a baixa velocidade. Isto é, as emulsões são melhores para operações de maquinagem a altas velocidades (Diniz, et al., 2014; Roberson, 2017).

2.3 – Deterioração da ferramenta

A deterioração das ferramentas é um fenómeno indesejado, portanto é do interesse do utilizador maximizar o tempo de vida da ferramenta sem perder rentabilidade. A vida útil da ferramenta é definida como o tempo que esta demora a atingir um determinado critério a partir do qual o corte deixa de ser eficiente e obriga à sua substituição. O critério mais utilizado é o desgaste de flanco (face de saída ou incidência), devido a fácil medição e caracterização. Mas também, pelo facto de exercer influência direta no acabamento das peças a nível de tolerâncias dimensionais e rugosidade.

A vida útil da ferramenta pode ser controlada através de fatores como a geometria da ferramenta, material constituinte, estratégia de maquinagem, fluido de corte, parâmetros de corte, etc. Entre os fatores referidos, os parâmetros de corte são os mais fáceis e rápidos de alterar, pelo que são o fator preferencial para controlar o tempo de vida da ferramenta. As curvas de desgaste da ferramenta permitem avaliar a evolução do desgaste com o tempo para diferentes condições de corte, conforme apresentado na figura 9. São caracterizadas por um desgaste inicial rápido, durante o qual ocorre uma adaptação da geometria da ferramenta, seguindo de uma fase estável durante a qual o desgaste é constante com o tempo. Na fase final, ocorre um aumento repentino do desgaste até à rotura ou falha da ferramenta.

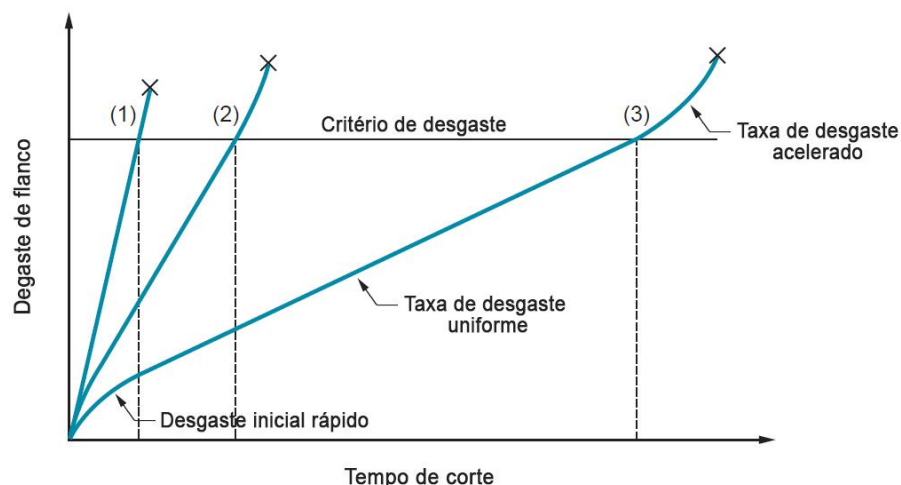


Figura 9. Curvas de desgaste da ferramenta para diferentes velocidades de corte ($V_1 > V_3$) – adaptado de (Groover, 2010).

A utilização de velocidades de corte altas apresenta vantagens a nível produtivo, ao permitir efetuar as operações num curto espaço de tempo, no entanto a exigência posta sobre a ferramenta leva a uma rápida deterioração devido ao aumento da intensidade dos mecanismos causadores de deterioração. Do ponto de vista económico, a utilização de parâmetros exigentes leva a uma falha prematura, o que resulta numa troca mais frequente de ferramentas e consequentemente num aumento das despesas. De forma análoga, a utilização de velocidades de corte baixas permite aumentar o tempo de vida, mas em contrapartida o processo deixa de ser rentável ao apresentar longos períodos de produção. Posto isto, não existem condições ideais, pelo que existe a necessidade de criar um compromisso entre custo e produtividade.

Cada tipo de deterioração vai ocorrer ou progredir de forma distinta, dependendo das condições de corte. Com o objetivo de caracterizar o comportamento da ferramenta em função do tempo, Taylor propôs a equação empírica (2.1) para descrever as curvas de vida. Esta relaciona a velocidade de corte (V_c) e o tempo de vida da ferramenta (T), onde n e C são constantes do material para determinadas condições de maquinagem (Soares, 2016).

$$V_c \cdot T^n = C \quad (2.1)$$

2.3.1 – Mecanismos causadores de deterioração

A compreensão dos mecanismos de deterioração é de extrema importância, pois facilita a escolha da ferramenta, estratégia e parâmetros de corte mais apropriados. A seleção criteriosa destes fatores em busca da máxima produtividade e tempo de vida da ferramenta é limitada pela temperatura, figura 10. Durante o processo, a ferramenta está sujeita a uma combinação de mecanismos de origem mecânica, térmica e química que atuam em simultâneo. Em decorrência de tais solicitações é praticamente impossível distinguir os mecanismos entre si. No entanto, existe sempre um mecanismo que prevalece perante os restantes (Souza, 2011).

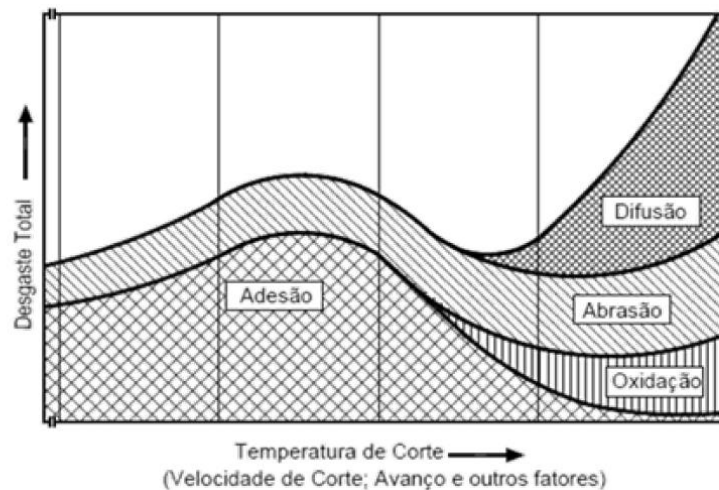


Figura 10. Evolução do desgaste em função da temperatura gerada pelos parâmetros de corte (Souza, 2011).

Como o material da peça e da ferramenta de corte apresentam heterogeneidades, podem ser observadas avarias de natureza distinta durante o seu uso. O desgaste tende a prenunciar-se essencialmente na face de ataque e de saída na forma de abrasão, adesão, difusão e oxidação.

A abrasão é um dos principais mecanismos de desgaste ao estar sempre presente. É mais evidente na face de saída, devido ao movimento de avanço que pressiona a ferramenta contra o material, enquanto na face de ataque o escorregamento de aparas flexíveis tem um efeito mais atenuado. As partículas duras existentes entre as superfícies de escorregamento promovem o desgaste que é intensificado pelo aumento de temperatura ao diminuir a dureza da ferramenta. Estas partículas atuam como micro-arestas de corte que riscam a superfície da ferramenta e normalmente têm origem em inclusões de elevada dureza presentes na peça ou são formadas

pelo encruamento do material. Ferramentas mais duras ou com revestimentos de elevada dureza tendem a apresentar menos desgaste por abrasão.

O desgaste por adesão tende a ocorrer devido à compatibilidade metalúrgica entre duas superfícies de matérias distintos em contacto, para situações de esforço moderado, baixas temperaturas e baixas velocidades. Devido ao constante estado de compressão na interface, estabelecem-se as condições apropriadas para a formação de um extrato metálico que provoca aderência. No instante em que os dois materiais aderem dão-se microsoldaduras, que devido ao movimento relativo acabam por partir junto a um dos metais e não na superfície de contacto. Durante a rutura, partículas da superfície de um metal migram para a superfície do outro. Este fenómeno pode ocorrer sem a formação de apara aderente. A utilização de fluido de corte e revestimentos com baixo coeficiente de atrito diminuem a chance de ocorrer adesão.

No caso da difusão, o desgaste ocorre na forma de transferência de átomos de um metal para o outro. Este é um fenómeno microscópico que é ativado pelo aumento de temperatura na zona de corte e depende da afinidade físico-química dos dois metais envolvidos. Devido às diferenças de concentração química e temperatura elevada alguns elementos químicos da ferramenta transitam para a peça, o que provoca um enfraquecimento superficial da ferramenta. No caso das ferramentas de metal duro, ocorre a formação de carbonetos complexos menos resistentes que são rapidamente removidos por abrasão.

A altas temperaturas e na presença de ar e água, presentes no fluido de corte, ocorre oxidação da peça e ferramenta. Dependendo dos materiais envolvidos, os filmes de óxidos formados podem ter várias durezas. No caso de filmes de óxidos porosos, normalmente de baixa dureza, são facilmente removidos sem causar grande desgaste na ferramenta. No entanto, alguns óxidos como a alumina possuem uma dureza e resistência superior à da ferramenta. A oxidação forma-se especialmente na interface de contacto entre a apara e a ferramenta, onde a presença de ar e água é superior. Normalmente, as arestas de corte são as primeiras a sofrer com o efeito da oxidação, o que promove um mau acabamento superficial das peças e uma redução da vida útil da ferramenta (Soares, 2016; Diniz, et al., 2014).

2.3.2 – Tipos de deterioração

Devido ao contacto entre a ferramenta e a peça o desgaste é inevitável, logo é de extrema importância que o utilizador consiga distinguir os diferentes tipos de deterioração e respetivas origens, de forma a evitar e corrigir situações em que o desgaste ocorre de forma exagerada. A longevidade máxima da ferramenta é atingida quando o desgaste se manifesta uniformemente ao longo das arestas de corte. Isto depende principalmente da correta fixação da peça e ferramenta, material da peça e ferramenta, geometria da ferramenta, operação de maquinaria, parâmetros e fluido de corte (Souza, 2011). Assim, os fatores anteriores devem ser conjugados de forma a minimizar situações de deterioração localizada, que podem manifestar-se na forma de desgaste, fratura frágil ou deformação plástica.

O desgaste manifesta-se principalmente na aresta principal de corte, a qual é responsável por cortar e extrair material da peça. O contacto constante com novo material da peça promove

a perda progressiva de material da superfície da broca, sendo mais evidente na face de incidência principal devido às elevadas pressões exercidas entre a ferramenta e a peça. Por sua vez, o desgaste também se manifesta na face de ataque devido ao deslizamento de aparas, mas como as pressões exercidas são muito inferiores este é menos perceptível. Entre os vários tipos, o desgaste de flanco (figura 11) é o preferível, quando se manifesta de forma uniforme. Este pode tomar valores exagerados quando são utilizadas velocidades de corte muito altas, avanços muito baixos, fluido de corte insuficiente, *run-out* elevado e ferramentas de baixa dureza ou próxima da peça.

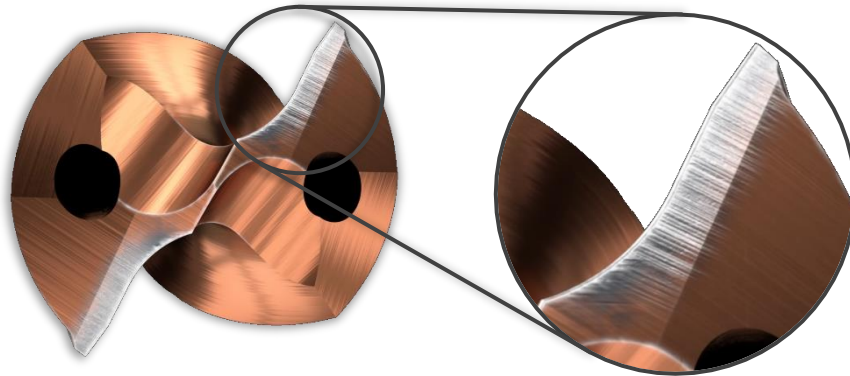


Figura 11. Formação de desgaste exagerado na face de incidência principal (Sandvik, 2018).

De forma similar, os fatores anteriores têm influência direta no desgaste observado na aresta de corte secundária, ilustrada na figura 12. A redução de produtividade é causada pelo atrito entre as paredes laterais do furo e da ferramenta, sendo agravado por desalinhamentos da broca em relação ao eixo de rotação e pela dilatação térmica devido ao aumento de temperatura (Sandvik, 2015).

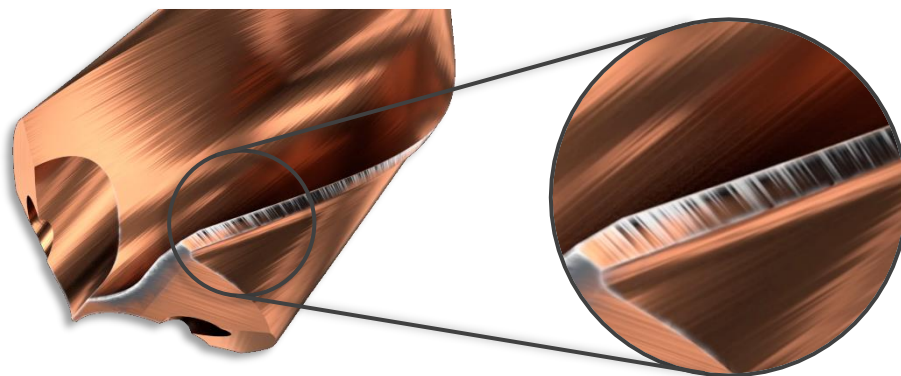


Figura 12. Formação de desgaste exagerado nas arestas secundárias de corte (Sandvik, 2018).

A tendência para formar aparas aderente varia de material para material, sendo mais vulgar em matérias dúcteis e a baixas velocidades de corte. Apesar disto, os aços inoxidáveis tendem a apresentar aparas aderente mesmo a altas velocidades, figura 13. Esta camada aderente acaba por modificar o processo de corte, o que resulta em esforços superiores e diminuição de eficiência. A formação de aparas aderente pode ser evitada através do aumento da velocidade de corte, utilização de ferramentas com revestimentos e gumes de corte mais afiados e refrigeração com uma percentagem de óleo elevada (Sandvik, 2018).

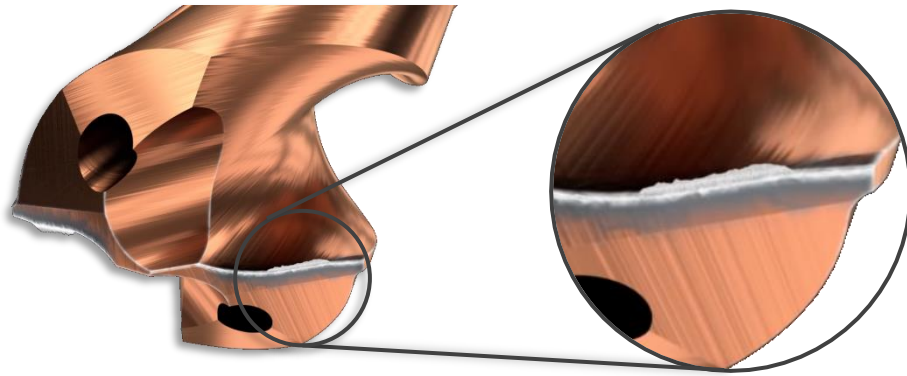


Figura 13. Formação de apara aderente na aresta principal de corte (Sandvik, 2018).

A apara aderente é em parte responsável pelo aparecimento de fraturas nas arestas principais de corte. Com o tempo, o volume de apara aderente tende a crescer gradualmente até que a permanência no seu lugar deixe de ser possível, neste instante devido à instabilidade a apara acaba por solta-se bruscamente, promovendo uma perturbação dinâmica. Ao libertar-se a apara aderente causa fraturas na broca, visível na figura 14, devido às fortes ligações entre esta e a ferramenta a separação tende a ocorrer pelo material, em vez da zona de contacto.

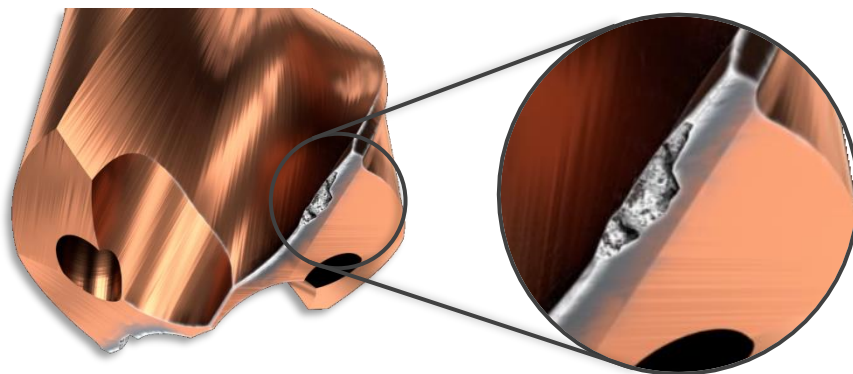


Figura 14. Formação de fraturas na aresta de corte principal (Sandvik, 2018).

No entanto, a fratura também pode ocorrer inesperadamente devido a outros fatores, ferramentas muito duras podem ter tendência a fraturar, em geral, quanto maior a resistência ao desgaste menor é a tenacidade e resistência ao choque. Por outro lado, esforços excessivos e localizados na aresta de corte e no canto externo (figura 15), paragens instantâneas e corte interrompido, são fatores que também podem estar na origem das fraturas (Diniz, et al., 2014). Devido ao movimento de rotação a velocidade e os esforços radiais acabam por ser superiores junto da periferia da ferramenta, que coincide com uma das zonas de menor rigidez.

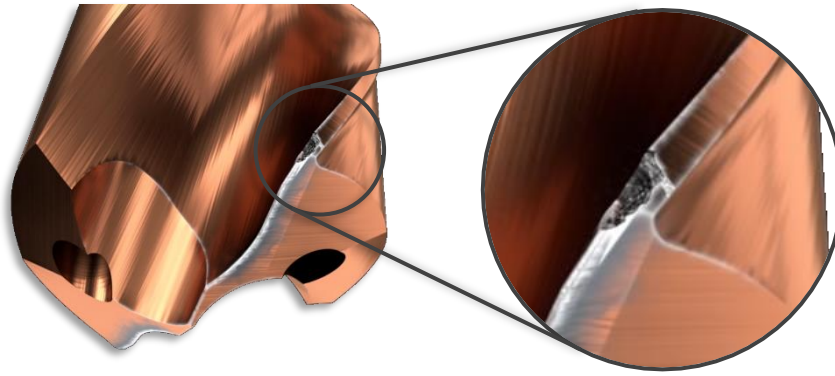


Figura 15. Formação de fraturas no canto externo da ferramenta (Sandvik, 2018).

O lascamento da aresta de corte e do canto externo pode causar problemas operacionais, se o desgaste tolerável for excedido a peça pode acabar danificada. Os problemas anteriores podem ser evitados através da verificação dos sistemas de fixação da ferramenta e material, verificação do *run-out*, fornecimento do fluido de refrigeração e redução do avanço (Sandvik, 2018).

Outro problema é o desgaste exagerado ou fratura da aresta transversal em casos extremos (figura 16). Como mencionado anteriormente, a aresta transversal não possui capacidade de corte, tendo como função esmagar o material em direção as arestas principais de corte que realiza a sua extração. Por este motivo, a aresta transversal é uma das primeiras zonas a manifestar sinais de desgaste. O desgaste da aresta transversal tem uma grande influência na qualidade dos furos e no desgaste das restantes zonas, devido à má centragem da broca é desenvolvido um movimento oscilatório que a torna instável. As geometrias de ponta especiais, apresentadas na figura 6, são uma das formas que permite melhorar a capacidade autocentrante da ferramenta, mas em contrapartida torna esta zona mais frágil, uma vez que o seu objetivo principal é diminuir a dimensão do núcleo e consequentemente da aresta transversal. Para evitar desgaste acelerado é recomendado aumentar a velocidade de corte ou diminuir o avanço.

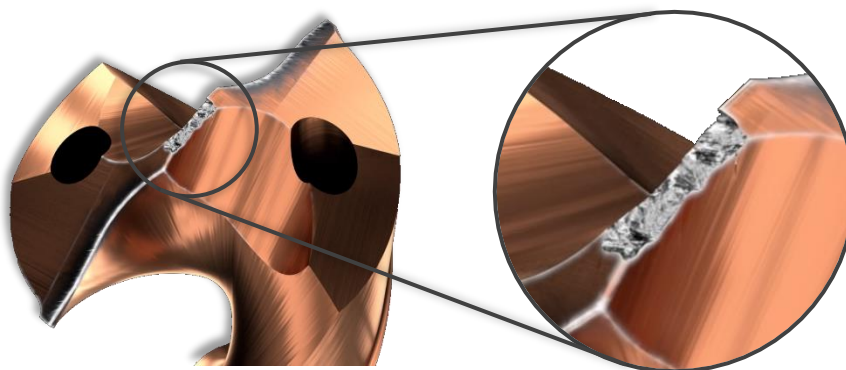


Figura 16. Formação de fraturas na aresta transversal da ferramenta (Sandvik, 2018).

Normalmente o desgaste excessivo da ferramenta pode ser detetado em estágios iniciais, com a experiência torna-se fácil de identificar a existência de vários fatores que indicam uma anomalia no processo de furação, sendo estes:

- Sons intermitentes;
- Esforços elevados;
- Rebarbas nos furos;
- Altas temperaturas;
- Quebra da ferramenta.

2.4 – Métodos de monitorização do desgaste

A capacidade de prever o momento de falha de uma ferramenta permite tirar o máximo partido desta sem correr o risco de danificar a peça produzida. O desgaste tem um impacto negativo na produção ao influenciar a qualidade superficial e dimensional das peças produzidas. Ao longo das últimas décadas, têm sido desenvolvidas e aprimoradas várias técnicas para monitorizar e prever o comportamento das ferramentas. Os métodos de avaliação de desgaste encontram-se divididos em duas categorias gerais, métodos diretos e indiretos. Como o nome sugere, os métodos diretos são utilizados para determinar o desgaste diretamente na ferramenta e permitem obter um valor exato. Estes métodos são menos práticos, em geral implicam a remoção da ferramenta para efetuar uma análise visual e respetiva medição, o que obriga à paragem do equipamento. Em alternativa a maioria dos métodos indiretos, como a medição de forças e vibração, podem ser utilizados enquanto o processo de fabrico decorre (Jantunen, 2002).

Relativamente ao processo de furação, várias técnicas de deteção têm sido relatadas na literatura por investigadores que lidaram com problemas de deteção de desgaste, fratura e baixa qualidade dos furos. Essas técnicas incluem medição dimensional da ferramenta e peça, forças e potência de corte, emissão acústica, vibração e sistemas de visão. Alguns métodos são mais apropriados para a deteção de falhas repentinas, enquanto outros são mais efetivos para medir a evolução do desgaste (El-Wardany, et al., 1996).

O trabalho desenvolvido aborda algumas destas técnicas, tendo-se focado na inspeção visual com recurso a sistemas óticos, medição dimensional, acabamento superficial, análise de vibrações e formação de aparas. A medição e avaliação do acabamento dos furos juntamente com a vibração e formação de aparas, são técnicas que permite prever o estado da broca de forma indireta.

2.4.1 – Medição do desgaste na ferramenta

Entre os vários métodos que permitem caracterizar a evolução da deterioração, a medição de forma direta é o mais utilizado por investigadores. Ao contrário dos restantes métodos, este possibilita a medição de pequenas alterações na geometria da ferramenta. As alterações observadas num curto espaço de tempo são impercetíveis à vista desarmada, pelo que este método carece da utilização de equipamento especializado como lentes ou instrumentos óticos.

Os valores obtidos são utilizados para expressar a magnitude de um certo fenómeno de deterioração relativamente a um critério de fim de vida, que corresponde ao instante a partir do

qual a utilização da ferramenta deixa de ser eficiente. O processo de furação apresenta a particularidade de não possuir uma norma com valores indicativos para o fim de vida, no entanto com as devidas interpretações a norma ISO 8688-1 (1989) pode ser utilizada para o efeito. A norma apresentada estabelece valores para a operação de facejamento por fresagem, fazendo a devida distinção entre os tipos de deterioração. Na tabela 1 são apresentados os valores para o desgaste de flanco e por fratura, que são os tipos de deterioração mais comuns nas brocas. Dependendo da forma como o desgaste se desenvolve (uniforme, não uniforme ou localizado), podem ser aceites diferentes valores.

Tabela 1. Critério de fim de vida útil para desgaste e fratura presente na norma (ISO 8688-1, 1989).

Fenómeno de deterioração		Critério, mm			Ilustração
		S	N	L	
VB	Desgaste de flanco				
1	Uniforme	0,2	0,35	0,5	
2	Não uniforme	0,9	1,2	1,5	
3	Localizado	0,8	1,0	1,2	
CH	Fratura ou lascamento				
1	Uniforme	Para y ou z com valores de comprimento correspondentes			
2	Não uniforme				
3	Localizado				
		Comprimento, mm			
A	Micro fratura	< 0,3	0,2	0,25	
B	Macro fratura	0,3 até 1	0,25	0,4	0,5
C	Quebra	> 1,0	-	-	-

Em determinadas situações é possível observar vários tipos de deterioração em simultâneo, quando tal acontece, deve ser tido em conta o tipo de deterioração mais próximo de atingir o critério de fim de vida. Em determinadas condições, os testes a efetuar podem apresentar custos avolumados face ao equipamento, ferramentas ou material utilizado. Tendo em conta estas situações o critério encontra-se dividido em três valores limite (S, N e L), com o objetivo de controlar o custo de cada teste e quantidade de material utilizado. Em situações que os pontos anteriores não carecem de especial atenção é utilizado um critério do tipo normal (N), onde os valores selecionados são um compromisso razoável entre confiabilidade, custos por ensaio e intensidade normal de deterioração. Para testes de maiores dimensões é usado um critério maior (L), o que permite obter informações sobre a ferramenta em condições mais severas, este tipo de teste é recomendado quando se pretende explorar o potencial da ferramenta até ao limite e determinar o fenómeno de destruição. Em situações que os custos associados aos testes ascendem a valores elevados é permitido o uso de valores menores (S) para o critério, com a desvantagem de obter menos informação, mas suficiente para tirar conclusões.

2.4.2 – Variações no diâmetro interno

Em alternativa, o desgaste da ferramenta pode ser avaliado de forma indireta através da qualidade dos furos. Com o tempo, o desgaste tende a afetar a capacidade de corte da ferramenta diminuindo a sua eficiência. A alteração da geometria da ferramenta a nível da aresta transversal e principal de corte introduz um movimento oscilatório que provoca um desvio da trajetória e vibrações. O funcionamento defeituoso da ferramenta, introduz assim defeitos na forma dos furos criados que aumentam de tamanho com a severidade da deterioração da broca. Estes defeitos podem manifestar-se na forma de excentricidade, circularidade e linearidade.

A excentricidade manifesta-se na forma de um desvio na entrada do furo em relação a posição pretendida, nesta situação o eixo central do furo deixa de coincidir com o da broca. Os defeitos de circularidade manifestam-se radialmente e correspondem às variações no raio da circunferência do furo, aproximada circular, em relação a um círculo coaxial circunscrito, esquematizado na figura 17 a). A linearidade corresponde às variações observadas ao longo do furo em relação ao eixo central, esquematizadas na figura 17 b).

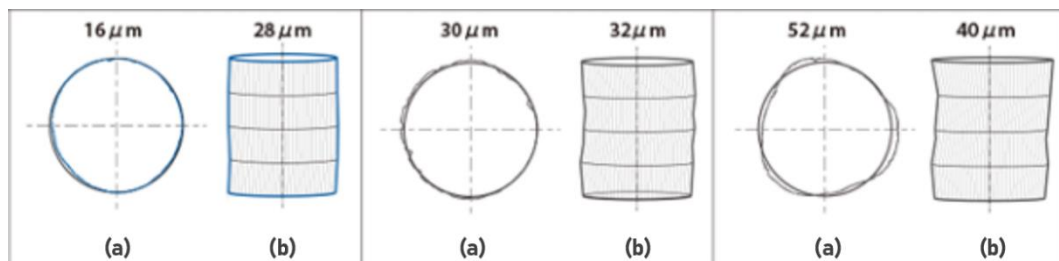


Figura 17. Variação da precisão dimensional, face à circularidade (a) e linearidade (b) (OSG, 2021).

2.4.3 – Acabamento superficial

Outra forma de detetar variações na geometria da ferramenta é através do acabamento superficial dos furos. Conforme a broca vai sofrendo alterações a capacidade de corte e extração de aparas diminui. Devido as alterações no gume de corte as aparas criadas tendem a ficar maiores e mais irregulares, dificultando a sua extração. Com o tempo, as aparas começam a comprimir dentro dos canais de extração, exercendo pressões progressivamente maiores contra a superfície dos furos degradando o seu acabamento, ilustrado na figura 18. Em simultâneo, o arredondamento da aresta de corte, devido a deterioração, confere maior resistência em troca de um aumento de atrito, devido à maior área de contacto entre a ferramenta e a peça (Diniz, et al., 2014). A maior entrega da ferramenta dá origem a vibrações de maior intensidade, que se refletem no acabamento da peça. Assim, de forma indireta as alterações superficiais permitem obter informações sobre o estado de deterioração da ferramenta.



Figura 18. Pobre qualidade superficial acentuada pelo entupimento de aparas (Sandvik, 2015).

O acabamento superficial dos furos pode ser avaliado através das variações superficiais, compostas pela rugosidade, ondulações e erros de forma. A rugosidade corresponde a pequenos desvios repetitivos ou aleatórios relativamente à superfície nominal, produzidos pelo avanço da ferramenta e outras irregularidades resultantes do processo de arranque do material. Por sua vez, a ondulação corresponde a irregularidades de dimensões superiores, resultantes de desvios da máquina ou da peça, vibrações, dilatações térmicas ou deformações plásticas. Os erros de forma devem-se ao percurso da ferramenta, isto é, são causados pelo movimento que permite dar forma à peça (Ribeiro, 2019).

A rugosidade é medida ao longo de um perfil ou conjunto de perfis paralelos em relação a um plano de referência, obedecendo a regras presentes numa norma. O trabalho apresentado segue as recomendações presentes na norma ISO 4288 (1996), resumidas na tabela 2.

Tabela 2. Condições de medição da rugosidade de acordo com a norma (ISO 4288, 1996).

Perfis não periódicos		Perfis periódicos		Condições de medição		
Esmerilhamento, afiamento, lapidação, eletroerosão		Torneamento, fresagem, retificado		r_{tip}	Raio máximo da ponta do apalpador	
				λ_c	Comprimento de amostragem	
				l_n	Comprimento de avaliação	
				l_t	Distância total percorrida	
R_t, R_z μm	R_a μm	R_{Sm} mm	r_{tip} μm	$\lambda_c = l_r$ mm	l_n mm	l_t mm
>0,025...0,1	>0,006...0,02	>0,013...0,04	2	0,08	0,4	0,48
>0,1...0,5	>0,02...0,1	>0,04...0,13	2	0,25	1,25	1,5
>0,5...10	>0,1...2	>0,13...0,4	2*	0,8	4	4,8
>10...50	>2...10	>0,4...1,3	5	2,5	12,5	15
>50...200	>10...80	>1,3...4	10	8	40	48

*Quando $R_z > 3 \mu m$ ou $R_a > 0,5 \mu m$, pode ser utilizado um raio de ponta do apalpador (r_{tip}) = 5 μm .

Apesar da ferramenta movimentar-se a velocidades constantes, o perfil de rugosidade é não periódico. O atrito constante da aresta secundária de corte contra as superfícies laterais, juntamente com o movimento das aparas, induz alterações sobre a superfície ao ponto de tornar o perfil não periódico.

A rugosidade média (R_a) e a altura média entre o vale e o pico (R_z), são os parâmetros estatísticos mais comuns para caracterizar a rugosidade:

- R_a – média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do comprimento de amostragem;
- R_z – distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais fundo do comprimento de amostragem.

2.4.4 – Análise de vibrações

Os processos de fabrico são influenciados pela dinâmica da operação de corte e pelas interações dentro do sistema máquina, ferramenta e peça. Um dos aspetos mais importantes, diz respeito a vibração relativa entre a ferramenta e a peça, onde a mínima variação dá origem a resultados finais totalmente diferentes. Nos tópicos anteriores, é referido por várias vezes que as alterações sofridas ao longo da vida útil da ferramenta são enfatizadas pelo aumento da amplitude das vibrações ou pelo aparecimento de novas frequências. As vibrações indesejadas causam desgaste prematuro ao intensificar as avarias, com consequências a nível da perda de precisão, qualidade superficial, danos no equipamento, ruídos indesejados e desagradáveis e aumento do consumo de energia elétrica. O estudo das vibrações tem suscitado um interesse cada vez maior por parte de investigadores, em estudos como o de Simon e Deivanathan (2019) foi estabelecida uma relação entre a vibração e o desgaste da ferramenta, realçando a capacidade de ser possível detetar desgaste e lascamento mesmo em estágios iniciais. Ou em casos mais avanços, com a ajuda dos avanços informáticos é possível analisar o impacto das vibrações e prever o comportamento da ferramenta, através de redes neuronais com uma precisão de 99,9% (Nakandhrakumar, et al., 2016). De forma resumida, este tema tem recebido especial atenção por permitir detetar fenómenos de deterioração e respetiva origem, permitindo otimizar as condições de corte e prever comportamentos, mas também por ser responsável pela deterioração das ferramentas. Com o aumento da vibração, a vida útil da ferramenta tende a diminuir drasticamente, pois microlascamentos tendem a desenvolver-se ao longo da aresta de corte (Souza, 2011).

Face ao tema do trabalho, pretende-se analisar as vibrações desencadeadas pelo contacto da ferramenta com a peça. Parte destas têm origem no corte do material, no entanto as vibrações de maior amplitude devem-se as forças de atrito desenvolvidas no contacto da face de incidência principal com o material. Como a deterioração se manifesta com maior intensidade nesta face, as transformações geométricas têm um papel importante na forma das curvas de vibração.

Por definição, as vibrações consistem no movimento oscilatório repetitivo de um corpo, durante um determinado intervalo de tempo em torno da sua posição de equilíbrio. A oscilação deste corpo pode ser descrita graficamente de duas formas distintas. Em domínio de tempo, a onda descreve o comportamento do corpo através da sua amplitude num determinado instante, podendo ser expressa em aceleração, velocidade ou deslocamento. Em alternativa, a onda anterior pode ser decomposta em várias ondas de frequências específicas, isto é, através da transformada rápida de Fourier é possível obter um gráfico em domínio de frequência, onde é expressa a amplitude máxima para cada frequência detetada. A passagem de domínio de tempo para domínio de frequência e vice-versa é conseguida através das equações complementares 2.2 e 2.3, que correspondem a transformada rápida de Fourier e sua inversa.

- Transformada rápida de Fourier (D. Tempo → D. Frequência)

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-i \cdot 2\pi \cdot k \cdot n / N} \quad (2.2)$$

- Inversa da transformada rápida de Fourier (D. Frequência → D. Tempo)

$$x_n = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{i \cdot 2\pi \cdot k \cdot n / N} \quad (2.3)$$

A onda original, em domínio de tempo, não passa da sobreposição de várias ondas de diferentes frequências que podem ser distinguidas em domínio de frequência, na figura 19 o conceito anterior é exposto esquematicamente.

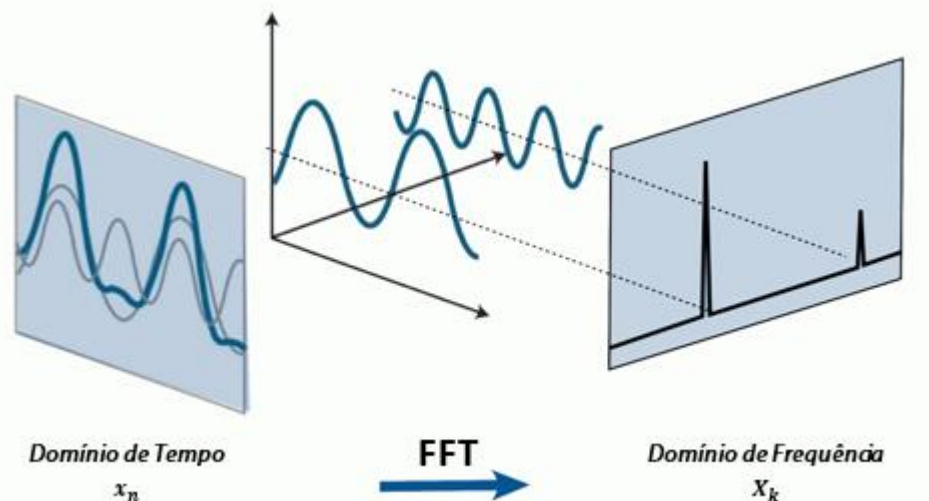


Figura 19. Passagem do domínio do tempo para o domínio de frequência (AAVOS, 2014).

Os picos observados no gráfico em domínio de frequência dizem respeito às frequências dominantes no sinal, parte destas frequências representam o processo de maquinagem e as restantes devem-se ao funcionamento do equipamento e do ambiente em redor. Neste caso, as frequências que não pertencem ao processo são classificadas de ruído, sendo algumas de difícil identificação devido à sua origem ser desconhecida. As frequências mais fáceis de identificar correspondem à frequência natural do equipamento e da rede elétrica (50 Hz).

Como anteriormente referido, as vibrações podem ser medidas em termos de aceleração, velocidade ou deslocamento. As unidades anteriores diferem principalmente na amplitude do sinal captado, a seleção deve ser feita em função da faixa de frequências que se pretende captar. Como ilustrado na figura 20, para sinais de baixa frequência a amplitude tende a ser maior quando a medição é realizada em termos de deslocamento, por sua vez, no caso de sinal de alta frequência a amplitude apresenta valores mais significativos quando medida em termos de aceleração. A medição em termos de velocidade é usada para medir frequências no intervalo deixado pelas duas unidades anteriores, isto é, a velocidade é priorizada quando se pretende efetuar medições entre os 10 Hz e 100 Hz (Pérez, 2015). No caso dos processos de maquinagem, a frequência a captar depende principalmente da velocidade de rotação utilizada, deste modo a medição das vibrações pode ser realizada em aceleração ou velocidade.

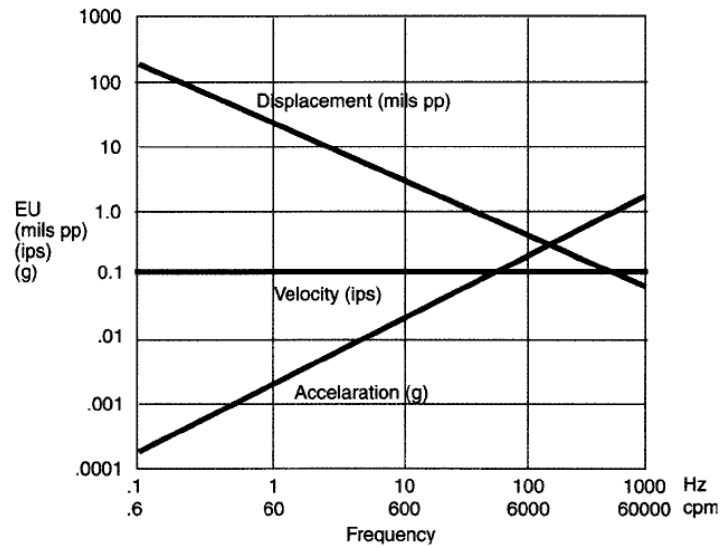


Figura 20. Dependência da aceleração, velocidade e deslocamento a velocidade constante em função da frequência (Pérez, 2015).

A medição da deterioração da ferramenta através da análise de vibrações apresenta a vantagem de poder ser utilizado em simultâneo com processo de maquinagem, ao contrário dos métodos anteriores que obrigam à paragem do equipamento. No entanto, o desenvolvimento de técnicas de filtragem e algoritmos para separar a informação desejada do ruído de fundo, destaca-se como sendo um dos principais desafios deste método (El-Wardany, et al., 1996).

2.4.5 – Formação de aparas

Nos processos de fabrico subtrativos, o material indesejado é removido na forma de aparas à medida que as peças tomam as dimensões e precisão exigida. A formação e escoamento de aparas é essencial para uma furação bem-sucedida, uma vez que influencia o desgaste da ferramenta, forças de corte, dissipação de calor, penetração do fluido de corte e vibrações. As aparas são formadas à medida que a ferramenta é forçada contra o material devido à deformação causada pela tensão de corte ao longo do plano de cisalhamento, que forma um ângulo ϕ com a direção de corte (figura 21).

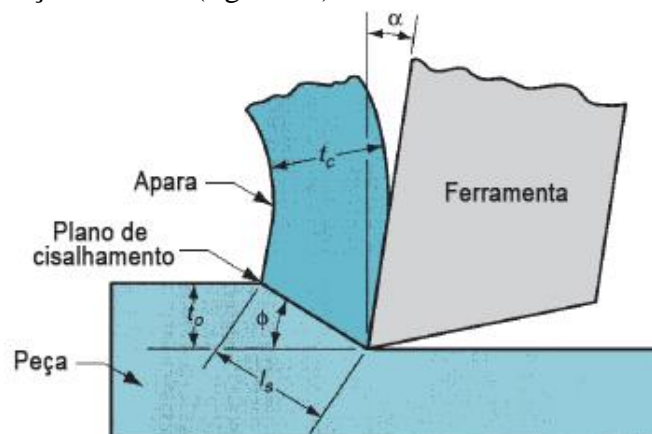


Figura 21. Plano ortogonal de corte (Groover, 2010).

Durante o processo de remoção do material indesejado, a aresta de corte da ferramenta é posicionada a uma certa distância abaixo da superfície da peça. Esta distância corresponde à espessura da avara t_o antes da sua formação, conforme é formada ao longo do plano de cisalhamento a sua espessura aumenta para t_c . Grande parte da energia consumida nos processos de maquinagem deve-se às deformações que ocorrem ao longo do plano de cisalhamento, uma aresta sem capacidade de corte ou alterada geometricamente tem grandes repercussões na formação das aparas. O ângulo de inclinação α , controlado pelo ângulo de hélice da broca, possui um papel importante na largura do plano de cisalhamento l_s , direção do escoamento e fricção entre a avara e a ferramenta. A influência do ângulo de inclinação sobre o ângulo de cisalhamento pode ser vista na figura 22, onde a utilização de um ângulo de inclinação maior permite obter um ângulo de cisalhamento superior com benefícios para a formação de aparas (Groover, 2010).

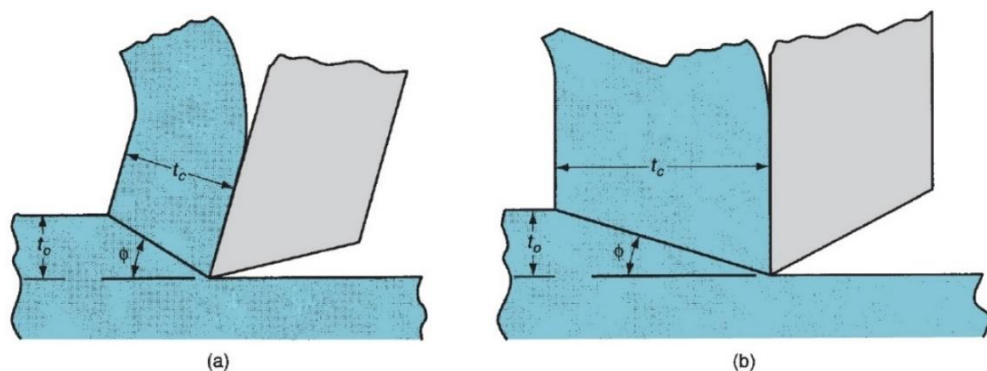


Figura 22. Efeito do ângulo de cisalhamento ϕ na espessura da avara: (a) ângulo ϕ maior com uma espessura de avara (t_c) inferior; (b) ângulo ϕ menor com uma espessura de avara (t_c) superior. (Groover, 2010)

Um ângulo de cisalhamento superior permite reduzir o esforço necessário para formar as aparas, uma vez que, o esforço é aplicado ao longo da área do plano de cisalhamento. A redução destes esforços resulta numa diminuição do consumo energético, potência de corte e temperatura. A principal fonte geradora de calor está na deformação e corte da avara ao longo do plano de cisalhamento, no entanto, apesar de menos notório a fricção da avara com a face de saída, seguido da fricção entre a face de incidência e a peça também têm contribuição. A dissipação do calor é conseguida através das aparas, peça, ferramenta e fluido de corte. Dos vários elementos a ferramenta é aquele que menos contribui para difundir a temperatura (10%), como consequência, as temperaturas elevadas contribuem para a sua rápida deterioração. Cerca de 80% do calor é dissipado pelas aparas, sendo que este valor aumenta para velocidades de corte superiores. A utilização de fluido de corte ajuda a baixar as temperaturas graças ao seu efeito refrigerante e lubrificante, isto é, além de retirar o calor da região de corte (refrigeração) também ajuda a reduzir o calor gerado (lubrificação) ao diminuir a área de cisalhamento graças ao menor coeficiente de atrito (Diniz, et al., 2014).

A geometria das aparas depende das condições em que estas se formam, tais como a velocidade de corte, temperatura na zona de corte, geometria da ferramenta, homogeneidade do material e fluido de corte. Na figura 23, são ilustrados os quatro tipos de formação de avara mais vulgares.

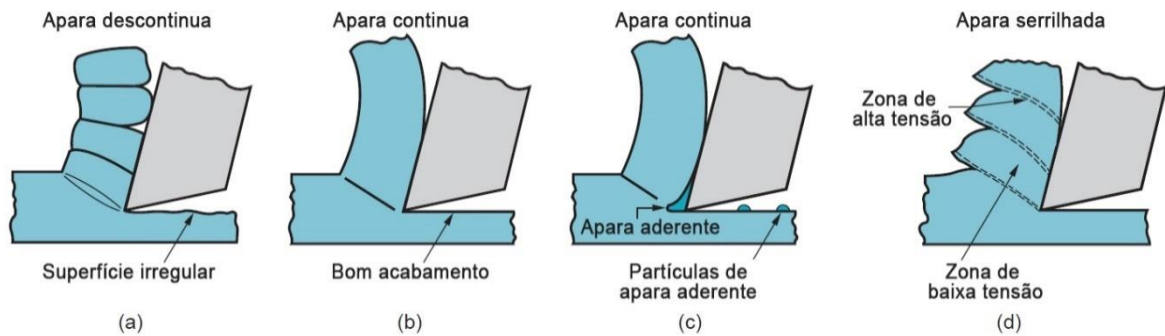


Figura 23. Tipos de aparas formados em operações de corte: (a) Descontínua; (b) Contínua; (c) Contínua com aparas aderentes; (d) Serrilhada. (Groover, 2010)

Na maquinagem de materiais relativamente frágeis (ex. ferro fundido) a baixas velocidades de corte, as aparas tendem a fragmentar-se, formando aparas descontínuas e superfícies irregulares. A formação deste tipo de aparas é favorecida pela sua fricção com a ferramenta e por avanços e profundidades de corte elevadas.

As aparas contínuas, por sua vez, resultam da maquinagem de matérias dúcteis, onde a fricção é menor providenciando um bom acabamento superficial. Porém a velocidades de corte baixas ou médias, a fricção entre a ferramenta e a apara promove a sua fundição à aresta de corte. Este fenómeno designado de aparas aderentes é um processo cíclico, caracterizado por um crescimento gradual até a estabilidade ser comprometida e a aparas acabar por soltar-se. Grande parte é transportada em conjunto com as outras aparas, mas uma pequena quantidade acaba por fundir a superfície da peça deixando para trás uma superfície áspera.

O quarto tipo de formação de aparas possui uma aparência de dente de serra que é produzida por uma formação cíclica que alterna entre alta e baixa tensão de cisalhamento. Este tipo está associado a certos metais difíceis de maquinar, como ligas de titânio, superligas à base de níquel e aços inoxidáveis quando são maquinados a velocidades de corte muito altas (Groover, 2010).





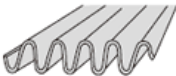

Na furação as aparas tendem a apresentar uma forma helicoidal, porque a parte interna da aresta de corte se move mais devagar do que a parte externa, assim as aparas resultantes são mais curtas no interior do que no exterior. A diferença de comprimento, faz com que as aparas se movam em direção ao centro da broca, em vez de perpendicularmente à aresta de corte. Quando a aparas contacta com a parte central dos canais de extração é forçada a curvar, resultando na sua forma helicoidal, ilustrado na figura 24.



Figura 24. Formação da aparas helicoidais junto à zona de corte (Batzer, et al., 1998).

Durante a deslocação ao longo do canal de extração a apara é forçada a girar em torno do seu próprio eixo, de maneira a evitar que se parta. Com o aumento da profundidade o movimento rotacional faz com que as espirais tenham dificuldade em manter sua forma, face ao atrito sucessivamente maior. É neste instante que ocorre a quebra da apara e o processo de formação recomeça (Jindal, 2012). Em geral as aparas podem apresentar várias geometrias consoantes a as condições a que se encontram submetidas, as formas de apara mais comuns na furação são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3. Forma típica das aparas nas operações de furação (Mitsubishi Materials, 2020).

Forma	Descrição
	<p>Espiral cônica</p> <p>As aparas deste tipo são produzidas quando a velocidade de avanço é baixa para materiais dúcteis. Esta é a forma mais comuns de aparas, se os segmentos forem pequenos não existe qualquer risco.</p>
	<p>Dentes de serra</p> <p>Forma-se na fase final dos furos passantes, quando a broca está a sair e parte da aresta de corte deixa de fazer contacto com a peça. Este tipo de apara tem tendência a enrolar à volta da ferramenta.</p>
	<p>Ventoinha</p> <p>É gerado para velocidades de avanço altas. Devido à sua espessura superior este tipo de apara é menos flexível e parte facilmente quando contacta com o canal de extração ou paredes do furo.</p>
	<p>Segmento</p> <p>Apara de forma espiral cônica que é quebrada antes de crescer pela restrição causada pela parede do furo devido à insuficiência de ductilidade. É a melhor forma de apara com um fluxo excelente.</p>
	<p>Zig-Zag</p> <p>Apara ondulada devido ao formato do canal de extração e propriedades do material. Facilmente comprime no interior dos furos, causando encravamentos.</p>
	<p>Agulha</p> <p>Aparas formadas pela vibração ou quando materiais quebradiços são enrolados com um raio de curvatura pequeno. A sua extração é satisfatória, mas certas situações podem comprimir.</p>

CAPÍTULO 3 - MÉTODO EXPERIMENTAL

3.1 – Material

De forma a avaliar o efeito do material no desempenho das brocas, foram selecionadas duas ligas de aços inoxidáveis distintas, AISI 304 e Duplex GX6CrNiN26-7 (EN 1.4347). Os materiais escolhidos representam as duas classes de aços inoxidáveis mais difíceis de maquinar, devido à sua elevada resistência mecânica, dureza, ductilidade e baixa condução térmica. Na tabela 4 e tabela 5 são indicadas a composição química e propriedades mecânicas dos materiais ensaiados.

Tabela 4. Composição química, em percentagem de massa, dos materiais testados.

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	V	W	N	Co	Fe
AISI 304	0.08	1	2	0.045	0.03	20	11	-	-	-	-	-	-	-	74.50
Duplex	0.03	0.95	1.47	0.02	0.00	25.12	5.89	0.20	0.14	0.01	0.02	0.08	0.12	0.08	65.86

Tabela 5. Propriedades mecânicas dos materiais testados.

Propriedades mecânicas	AISI 304	Duplex GX6CrNiN26-7
Resistência à tração [MPa]	565	686
Tensão de cedência [MPa]	258	456
Alongamento [%]	53	25
Dureza [HB]	213	277

Os dados indicados são fornecidos pelos fabricantes à exceção da dureza, para a qual foi realizado um conjunto de 4 medições para cada tipo de material de forma a obter um valor médio. A dureza foi determinada a partir da deformação causada pela penetração do indentedor no material, em que a geometria e carga aplicada dependem da unidade de medida (figura 25).

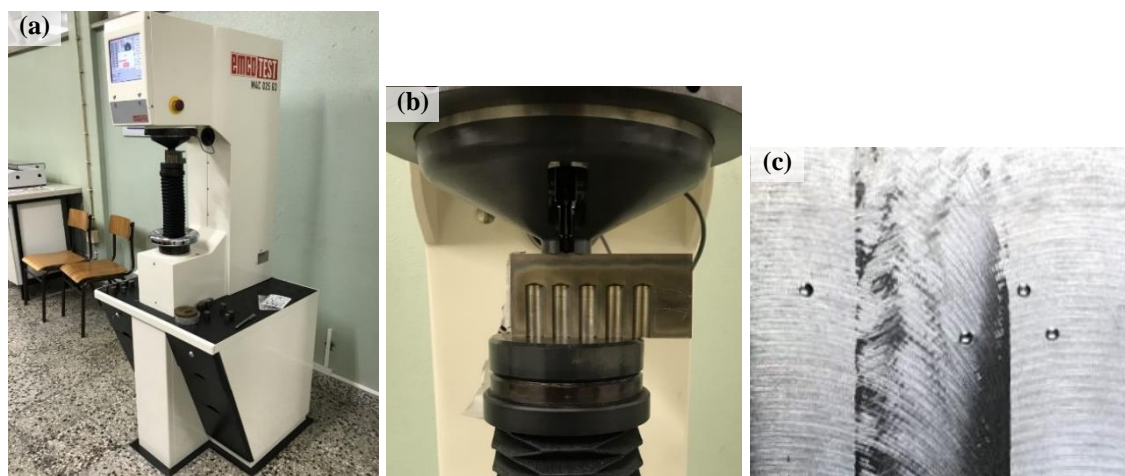


Figura 25. Ensaio de medição da dureza: (a) e (b) fotografias do durómetro; (c) indentações no material.

De modo a aproveitar o máximo material possível sem desperdícios, os blocos entregues pelos fornecedores, foram preparados em dimensões de 120x70x70 mm³ e 300x100x 40 mm³

para o aço inoxidáveis ASI 304 e duplex, respetivamente. As diferenças entre os dois materiais sobressaíram logo de início no momento da sua preparação, onde o aço inoxidável AISI 304 foi facilmente cortado com o auxílio de uma serra de fita, enquanto o aço inoxidável duplex teve de ser cortado por eletroerosão (EDM), revelando a dificuldade acrescida para conformar estas ligas devido à sua maior dureza.

3.2 – Ferramentas

Além da análise comparativa entre matérias, também é pretendido estudar as diferenças em desempenho para as diferentes geometrias de ferramenta. As brocas utilizadas nos ensaios diferem no número de gumes de corte e elementos associados (número de canais, arestas, etc.), as quais são visíveis na figura 26.

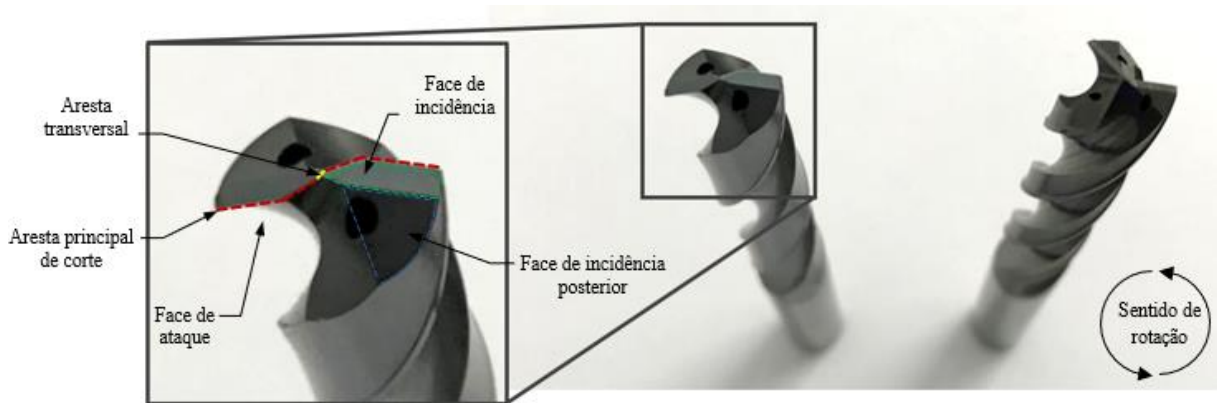


Figura 26. Diferenças geometrias nas brocas de: (a) 2 gumes de corte; (b) 3 gumes de corte.

Conhecidas as dificuldades acrescidas para maquinar aços inoxidáveis, as brocas foram selecionadas criteriosamente com a ajuda do fabricante Palbit®, que forneceu as ferramentas que melhor satisfazem as exigências impostas pelo estudo a realizar. As brocas com 10 mm de diâmetro são fabricadas por sinterização do carboneto de tungsténio (WC) e posteriormente revestidas por um filme de 4 μm de espessura de AlTiN, através da deposição física de vapor (PVD) pelo método HiPIMS, que concede uma maior resistência ao desgaste. Entre as várias características das brocas utilizadas é relevante mencionar a existência de canais internos para transporte do fluido de corte, geometria de ponta especial e ângulo de ponta de 140°. A utilização de ângulos de ponta superiores beneficia a furação de materiais duros, ao reduzir o comprimento do gume de corte e por conseguinte a força de corte necessária.

Devido às características de cada ensaio houve a necessidade de usar dois tipos de porta-ferramentas. Nos ensaios em que a refrigeração foi efetuada por meio externo as brocas foram fixas à árvore através de um porta-piças ER. Em contraste, nos ensaios em que a refrigeração foi fornecida a pressões elevadas pelo interior da broca, ocorreram problemas de estanquicidade que obrigaram à troca por um cone hidráulico. Os dois sistemas diferem principalmente na sua precisão, mais concretamente no valor do *run-out*, o qual foi medido de forma a garantir que a diferença entre os sistemas fosse insignificante.

3.3 – Equipamento

O equipamento utilizado ao longo da parte experimental deste trabalho, assim como o procedimento utilizado para recolher e tratar os dados é descrito detalhadamente nos tópicos abaixo, visando facilitar a compreensão da metodologia utilizada e possibilitar a reprodução do mesmo. Na execução dos ensaios foi utilizado um centro de maquinagem de 5 eixos no qual foi aplicado um acelerómetro triaxial para recolher o sinal de vibração durante as operações de furação. Antes de iniciar os testes, o bloco de material foi fixo à prensa da máquina e realizou-se a medição das coordenadas do zero-peça, seguido do comprimento e diâmetro da broca a utilizar. Durante os testes, em simultâneo com a recolha do sinal de vibrações, as brocas foram inspecionadas de forma a averiguar o estado de deterioração. Por fim, os blocos de material foram recolhidos para avaliar a qualidade dos furos através da rugosidade e variação dimensional.

3.3.1 – Centro de maquinagem

A precisão e exatidão das operações efetuadas é um dos pontos cruciais para o trabalho, a obtenção de valores inconsistentes pode pôr em causa a fiabilidade das conclusões. Assim, a seleção de um centro de maquinagem robusto, rígido e de elevada potência é importante para a consistência dos resultados obtidos. Na figura 27, é apresentado o centro de maquinagem da marca Haas, modelo UMC-750SS utilizado ao longo das atividades.



Figura 27. Centro de maquinagem Haas UMC-750SS, utilizado nos testes (Haas, 2020).

O centro de maquinagem apresentado permite posicionar as peças nas mais variadas posições, graças ao seu sistema de eixos que permite efetuar operações a 3, 3+2 ou 5 eixos simultâneos. Equipada com uma árvore de transmissão direta em linha com uma potência nominal de 22.4 kW, permite atingir velocidades de rotação até 15 000 rpm. A sua bomba de alta pressão, permite aplicar o fluido de corte através dos canais internos das ferramentas a alta pressão ou via externa a baixa pressão. O seu sistema de medição de ferramentas automático, através de um apalpador elétrico de contacto Renishaw® OTS, com uma precisão de 5 µm, permitiu medir as ferramentas entre trocas e verificar as variações de diâmetro entre brocas.

As trajetórias de maquinagem foram programadas no *software* de fabrico assistido por computador Mastercam® 2020 e posteriormente processadas pelo controlador da Haas, *Visual Quick Code standard*.

3.3.2 – Equipamento para caracterizar a furação

Aquisição de imagem e medição da deterioração

Ao longo dos ensaios, o processo de furação foi interrompido em intervalos regulares com o objetivo de verificar o estado da ferramenta (sem a remover do porta-ferramentas) e efetuar as devidas medições de forma a verificar a evolução da deterioração de acordo com o critério de fim de vida selecionado.

A examinação do estado das brocas foi efetuada com recurso a um microscópio digital *Dino-Lite Basic*, apresentado na figura 28, juntamente com o respetivo *software* de aquisição de imagem *Dino Capture 2.0*. Posteriormente as imagens foram tratadas no programa *Axion Vision LE*, onde foi aplicada a escala correspondente à ampliação de 50 vezes e medido o desgaste de flanco e dimensão das fraturas.

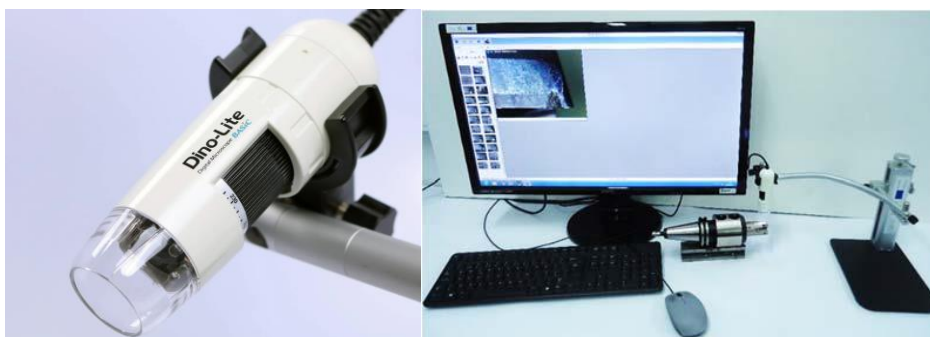


Figura 28. Microscópio digital e sistema de aquisição/tratamento de imagem, utilizado na medição da deterioração das brocas.

Rugosímetro

Após o término das operações de furação, a rugosidade das paredes laterais de todos os furos foi mediada em duas posições opostas com uma diferença de 180°, num total de seis medições, três em cada posição. As medições foram realizadas de acordo com a norma ISO 4288, tendo em conta o espaço disponível, foi utilizado um comprimento de amostragem de 2,5 mm com uma distância total percorrida de 7,5 mm. As medições foram realizadas com o rugosímetro Mitutoyo SJ-201, apresentado na figura 29.

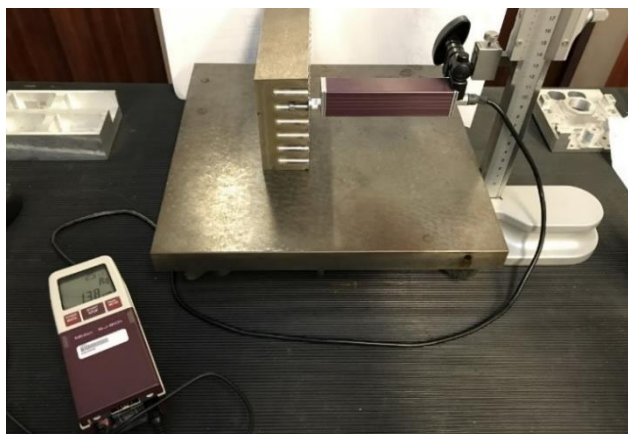


Figura 29. Disposição do equipamento para medição da rugosidade.

Micrómetro de interiores

O diâmetro dos furos foi medido várias vezes em toda a volta do perímetro, de forma a encontrar o valor máximo e mínimo. As medições foram efetuadas a 8 mm e 25 mm de profundidade com um micrómetro interno de 3 pontos da marca Bowers XTDU10-BT (figura 30), com uma precisão de 3 μm .



Figura 30. Micrómetro de interiores de 3 pontos, usado nas medições.

Medição de vibrações

Durante os ensaios de furação foi efetuada uma aquisição do sinal de vibrações, induzido pelo processo e centro de maquinagem, em intervalos regulares de forma a detetar eventuais alterações. O sinal de vibrações foi adquirido com um acelerómetro piezoelétrico triaxial, modelo 356B08 da marca PCB Piezotronics, com uma sensibilidade de 100 mV/g e uma gama de frequências de 0.5 a 5 000 Hz. No momento da fixação do acelerómetro existem vários fatores a ter em consideração, tais como a localização, robustez da zona, gama de amplitudes, acessibilidade e temperatura (PCB Piezotronics, 2002). No estudo apresentado, o sinal de vibração que se pretende captar tem origem na interação da ferramenta com a peça, por isso optou-se por fixar o acelerómetro à árvore da fresadora por ser o local mais próximo e de maior robustez, a montagem é apresentada na figura 31.

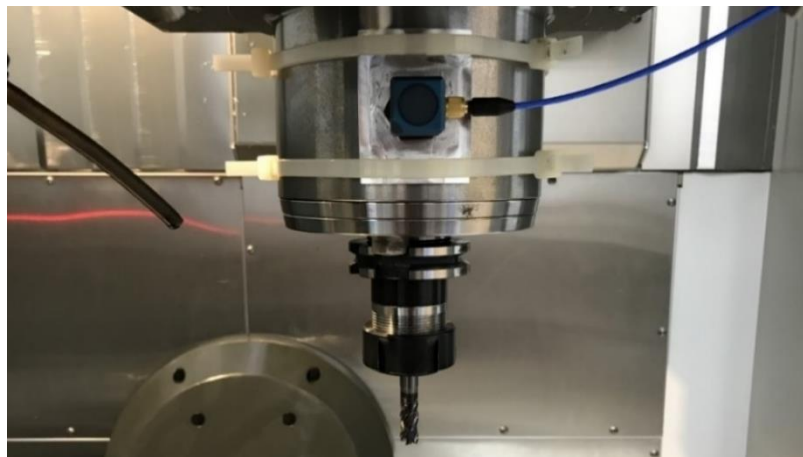


Figura 31. Fixação do acelerómetro à árvore de acordo com o sistema de eixos da fresadora CNC.

Dada a curvatura da árvore e ausência de pontos de roscagem, houve a necessidade de usar uma base de montagem à qual o acelerómetro foi posteriormente roscado de acordo com o sistema de eixos do equipamento, tendo o eixo x e y ficado no sentido oposto. Apesar deste método não representar a melhor opção segundo o esquema da figura 32, os desvios indicados tendem a ocorrer na medição de altas frequências o que não interfere com o estudo pretendido, uma vez que a faixa de medição utilizada se encontra distante dos valores afetados.

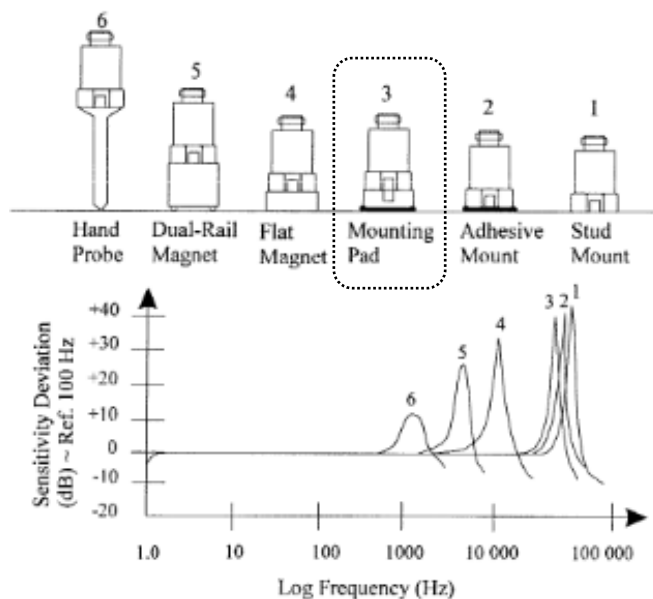


Figura 32. Configurações de montagem e seus efeitos na frequência (PCB Piezotronics, 2002).

O sinal adquirido pelo acelerómetro, na forma de uma grandeza analógica, precisou de ser convertido para digital através de uma placa de aquisição da National Instruments NI 9234, de forma a poder ser processado no *software* de tratamento de dados LabVIEW. O sinal analógico ao ser convertido para digital é registado em intervalos de tempo regulares na forma de pontos (amplitude, tempo), se a quantidade de pontos recolhidos for inferior a um determinado valor, o sinal representado irá descrever um acontecimento totalmente diferente da realidade. De acordo com o teorema de Nyquist, para se obter uma representação correta do sinal, a frequência de amostragem tem de ser pelo menos duas vezes superior a componente de frequência máxima do sinal que se pretende analisar, isto é, de forma a captar a frequência associada ao movimento de rotação da ferramenta a 1592 rpm, que corresponde a uma frequência de 26,5 Hz, a frequência de amostragem tem de ser superior a 53 Hz (Cerna & Harvey, 2000). No entanto, como foi pretendido captar os harmónicos associados a rotação da ferramenta e outros fenómenos adicionais, foi usada uma frequência de amostragem superior de 1613 Hz, que permite captar sinais com uma frequência máxima de aproximadamente 807 Hz. A utilização de frequências de amostragem superiores às indicadas pelo teorema de Nyquist, esquematizado na figura 33 (b), pode apresentar vantagens quando o armazenamento de dados não representa uma limitação, a sobre amostragem garante uma aquisição de dados mais robusta e próxima do sinal real (Pérez, 2015).

Se o teorema de Nyquist for violado, ocorre o fenómeno conhecido por *aliasing*, onde as frequências acima de metade da frequência de amostragem aparecem representadas com uma frequência inferior à do sinal real. Este fenómeno encontra-se representado na figura 33 (c), onde o sinal captado difere significativamente do sinal real, este fenómeno deve-se ao baixo número de amostras registadas num determinado intervalo de tempo (Dewesoft, 2020). Em condições idênticas, um sinal de baixa frequência apresenta uma definição superior à de um sinal de alta frequência, pelo facto existir um número de pontos superior para representar um ciclo completo.

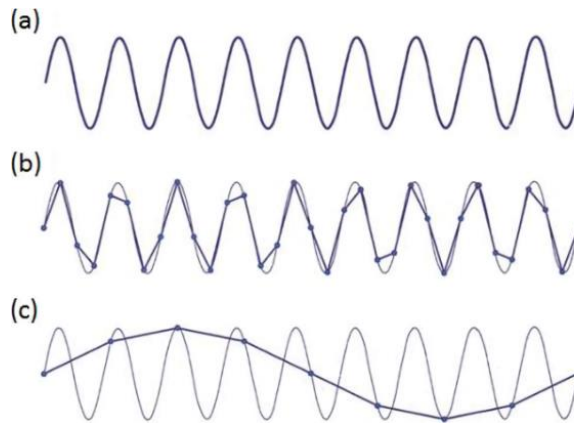


Figura 33. Variações no sinal captado em função da frequência de amostragem: (a) Sinal analógico real; (b) Sinal captado segundo o teorema de Nyquist; (c) Sinal captado a baixa frequência de amostragem. (Pérez, 2015)

Os dados recolhidos através do *software* de aquisição LabVIEW, foram posteriormente tratados no *software* de cálculo numérico MATLAB. De acordo com o que é pretendido analisar, foi desenvolvido um script que permitisse representar graficamente os domínios de tempo e frequência para a resultante dos três eixos. Os gráficos obtidos permitem acompanhar a evolução da ferramenta com o tempo e assim detetar as alterações progressivas ou repentinas causadas pela deterioração da mesma.

Através da raiz da soma dos quadrados, o sinal de vibração proveniente de cada eixo do acelerómetro foi conjugado de forma a obter um sinal resultante em domínio de tempo, que permitisse caracterizar os momentos de maior ou menor exigência para a ferramenta. De seguida, foi aplicada a transformada rápida de Fourier para converter o sinal para o domínio de frequência, com o objetivo de possibilitar a identificação das frequências características do processo de furação, equipamento e deterioração. Os pontos anteriormente referidos descrevem o princípio de funcionamento do script desenvolvido para o tratamento dos dados e encontram-se esquematizado na figura 34.

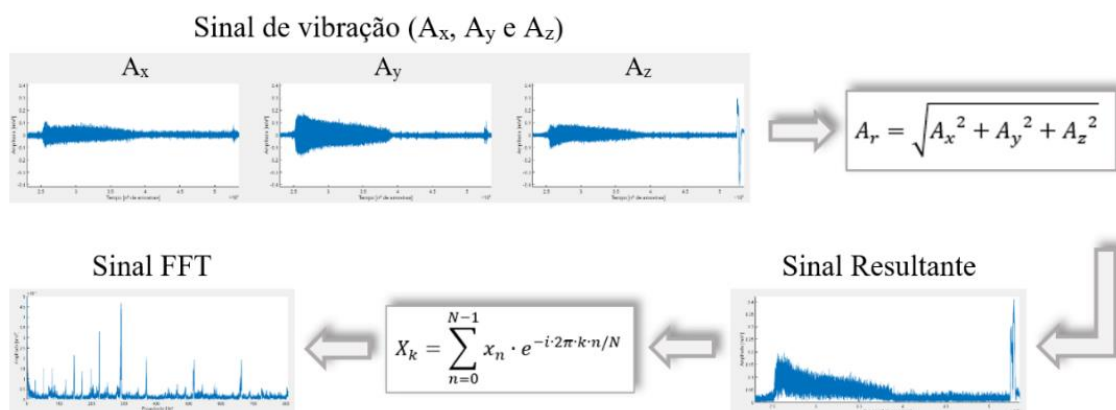


Figura 34. Processamento do sinal de vibrações dos 3 eixos, no software MATLAB.

Os sinais em domínio de tempo e frequência obtidos da resultante dos 3 eixos, foram utilizados para comparar o desempenho das brocas para as diferentes condições impostas. O

valor em absoluto, obtidos para cada ensaio, foram comparados através do pico máximo e do valor eficaz (RMS) para os primeiros 16 384 pontos ($2^n = 2^{14}$), após o contacto da ferramenta com o material. O valor eficaz é um dos parâmetros mais utilizadas na caracterização dos sinais de vibração ao permitir medir a energia contida no sinal num determinado intervalo de tempo, quanto maior a energia contida no sinal maior é a sua capacidade destrutiva. O seu cálculo é obtido da equação (3.1), onde A_i representa a amplitude em cada ponto e T o número de pontos contido no intervalo selecionado.

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T A_i^2} \quad (3.1)$$

A amplitude registada varia entre valores positivos e negativos que descrevem o movimento oscilatório no acelerómetro em relação ao sistema de eixos. Para o cálculo da energia contida no sinal a posição no acelerómetro não tem qualquer interesse, mas sim a sua magnitude, por este motivo a amplitude deve ser interpretada tendo em conta o seu módulo. Isso é feito ao elevar cada ponto ao quadrado e ao aplicar a raiz quadrada sobre estes.

3.4 – Procedimento experimental e estratégia de maquinagem

Durante a preparação dos ensaios existem vários tópicos a ter em consideração de forma a minimizar fatores externos que possam vir a influenciar os resultados obtidos. Posto isto, a seleção da estratégia de furação torna-se um dos tópicos mais importantes, face às características dos materiais utilizados e profundidade dos furos. Nestas circunstâncias a estratégia de furação com incrementos de profundidade sucessivos (movimento de avanço e recuo sucessivo da broca) seria indicada para remover e controlar a formação de aparas, relatada na literatura como um problema, no entanto esta estratégia põe em causa a aquisição dos resultados por alguns dos métodos anteriormente referidos. Este tipo de furação é executado em várias passagens, podendo afetar a trajetória durante o movimento de avanço e retração, e assim obter furos com irregularidades dimensionais e de acabamento. Em adição, devido ao movimento repetitivo a ferramenta tende a estar em contacto com o material durante mais tempo que o estritamente necessário, acelerando a sua deterioração. Com base neste pensamento, optou-se pelo ciclo de furação em cheio, onde a furação é executada numa única passagem e a ferramenta exerce contacto com o material do início até ao fim da operação, durante o tempo estritamente necessário.

Os ciclos de furação foram realizados na forma de numa matriz de 8 por 4 para o aço inoxidável AISI 304 (visível na figura 35) e 10 por 6 para o aço inoxidável duplex. Os furos foram executados um por um, para facilitar o controlo do processo, numa única passagem com uma profundidade de 30 mm (3xD) e um espaçamento entre furos de 15 mm. A profundidade escolhida, três vezes o valor do diâmetro, teve como objetivo a realização de um furo considerado profundo, mas que ao mesmo tempo permitisse a chegada do fluido de corte ao fundo do mesmo, quando utilizada refrigeração via externa.

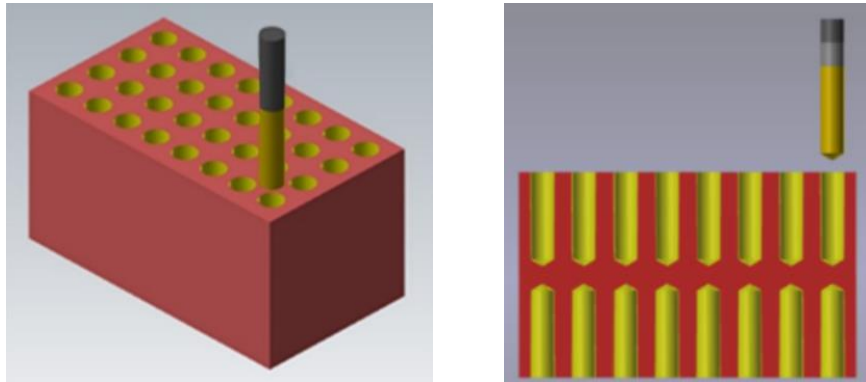


Figura 35. Representação do bloco após o fim dos ciclos de furação, gerados no software Mastercam®.

As atividades experimentais foram divididas num total de 8 testes, executados sobre diferentes condições. Numa fase inicial, foram realizados testes com brocas de 2 gumes de corte com a perspectiva de estudar o comportamento sobre diferentes condições, devido à quantidade de brocas fornecidas pelo fabricante foram utilizadas duas geometrias diferentes, tendo sido dada a designação A à primeira geometria e B para a segunda. Seguidamente, foram realizados os testes com brocas de 3 gumes às quais se deu a designação C. Na tabela 6 são apresentados os vários testes com a respetiva informação sobre o tipo de geometria da ferramenta, material do bloco, tipo de refrigeração e número de furos realizados.

Tabela 6. Condições aplicadas aos testes e número de furos realizados.

Ferramenta	Material	Tipo de refrigeração	Nº de furos realizados	Teste
Broca de 2 gumes de corte	AISI 304	Externa	32	A1
		Interna	60	B1
	Duplex	Externa	60	A2
		Interna	60	B2
Broca de 3 gumes de corte	AISI 304	Externa	3	C1
		Interna	60	C2
	Duplex	Externa	30	C3
		Interna	60	C4

3.4.1 – Parâmetros de corte

Na furação, assim como noutras operações de maquinagem, os parâmetros de corte têm um impacto tremendo na qualidade dos furos, mas também na vida útil da ferramenta pelo que estes não devem ser desprezados. Os parâmetros de corte dependem de múltiplas variáveis que se encontram interligadas entre si, no entanto o movimento da ferramenta pode ser descrito em apenas dois, sendo estes a velocidade de rotação (n) e velocidade de avanço (V_f), esquematizadas na figura 36.

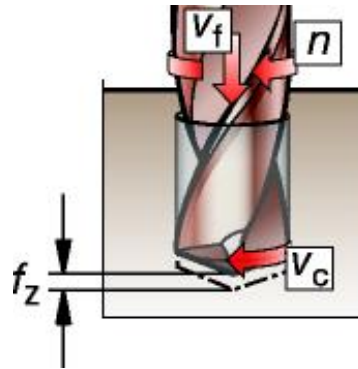


Figura 36. Esquemática do movimento de avanço da ferramenta (Sandvik, 2015).

O movimento rotacional da broca depende da velocidade de rotação imposta na árvore e é dada pela equação (3.2), em rotações por minuto (rpm), a partir da velocidade de corte (V_c) em m/min e do diâmetro da broca (D_c) em mm.

$$n = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D_c} \quad (3.2)$$

Por sua vez, a velocidade de avanço (em mm/min), caracteriza o movimento da ferramenta em relação à peça segundo o eixo Z. O seu cálculo é obtido da equação (3.3), em mm/min e depende do avanço por dente, f_z (em mm/dente), da velocidade de rotação e do número de gumes de corte, Z_n .

$$V_f = f_z \times Z_n \times n \quad (3.3)$$

Os testes efetuados visam caracterizar as brocas de um ponto de vista de desempenho e não produtivo, desta forma foi usada uma taxa de remoção de material idêntica para todos os testes, isto é, para qualquer uma das brocas o avanço por rotação é o mesmo (0,066 mm). No entanto, devido às diferenças geométricas, a adição de mais um gume de corte, nas brocas de três gumes, faz com que em cada rotação apenas sejam removidos 0,022 mm de material por gume, em contraste às brocas de dois gumes onde são removidos 0,033 mm. Este fator coloca uma exigência superior sobre as brocas de dois gumes que acabam por produzir aparas de espessura superior. O resumo dos parâmetros de corte utilizados para as brocas de dois e três gumes são apresentados na tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros de corte utilizados para as diferentes geometrias de brocas.

Parâmetros de corte	Broca 2 Gumes	Broca 3 Gumes
Velocidade de rotação - n [rpm]	1592	1592
Velocidade de corte - V_c [m/min]	50	50
Velocidade de avanço - V_f [mm/min]	105	105
Avanço por gume de corte - f_z [mm/dente]	0,033	0,022
Número de gumes de corte - Z_n	2	3

3.4.2 – Avaliação e correção do run-out

A minimização do *run-out* da ferramenta é um dos critérios mais importantes para uma furação bem-sucedida. O desalinhamento entre os eixos de rotação da árvore e da broca origina um movimento oscilatório, amplificador das vibrações do sistema, que irá manifestar-se na qualidade das operações e vida útil da broca. Nestas situações a capacidade de autocentragem tende a ser afetada, o que resulta em furos de diâmetro superior ao pretendido com ovalizações e inconsistências ao longo do seu comprimento. Este fenómeno manifesta-se nas ferramentas na forma de desgaste não uniforme, onde uma das arestas de corte secundárias apresenta valores de desgaste superiores (Sandvik, 2013).

Durante a montagem da broca no porta-ferramentas foi realizada uma limpeza dos componentes de maneira a eliminar qualquer variável que pudesse afetar os valores relacionados com a excentricidade da ferramenta, efeito habitualmente designado por “*run-out*”. As medições foram realizadas com um comparador, apresentado na figura 37. Os fabricantes de ferramentas recomendam um valor de *run-out* inferior a 0,02 mm para furacões bem-sucedidas, no entanto para o estudo apresentado foi definido um valor máximo de 0,01 mm com o objetivo de minimizar as diferenças entre os dois sistemas de porta-ferramentas (Hendley, 2017).



Figura 37. Medição do *run-out* da broca com um comparador.

3.4.3 – Fluido de corte

Devido às propriedades dos aços inoxidáveis o uso de fluido de corte durante operações de furação é imprescindível para alcançar uma vida útil prolongada da broca, sendo também a sua presença igualmente importante na qualidade dos furos.

Como anteriormente referido, o trabalho apresentado pretende comparar as diferenças em desempenho quando empregue refrigeração externa ou interna, para o feito o centro de maquinagem encontra-se equipado com dois sistemas de refrigeração distintos. No sistema de refrigeração externa, um fluxo constante de fluido de corte a baixa pressão é direcionado contra a ferramenta, com o objetivo que parte deste consiga chegar ao interior do furo através dos

canais de extração de aparas e assim exercer as suas funções. Em contrate, no sistema de refrigeração interna o fluido de corte passa por uma bomba de alta pressão onde é pressurizado até aos 21 bar, sendo depois conduzido pelo interior do equipamento e dos canais de refrigeração da broca até à zona de corte no interior do furo.

O fluido de corte utilizado trata-se de um óleo mineral miscível em água, que foi diluído até ser obtida uma concentração ligeiramente superior a 8%, com base nas recomendações do fabricante das ferramentas Palbit®, de forma a assegurar as suas propriedades. Na figura 38 é apresentado o visor do refratómetro utilizado para realizar várias medições ao longo dos ensaios com o objetivo de garantir que os valores de concentração não diferissem substancialmente dos valores iniciais.



Figura 38. Visor do refratómetro para uma das medições com concentração de 8,3%.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Testes preliminares com brocas de 2 gumes de corte

Com o intuito de criar um ponto de referência para o desempenho das brocas de 3 gumes, numa fase inicial foram realizados vários testes com brocas de 2 gumes. Estes foram realizados com duas geometrias de ferramenta diferentes nos dois materiais em condições de refrigeração distintas. Como recomendado pela norma, o tipo de deterioração que mais contribui para o fim de vida da ferramenta foi utilizado como critério para interromper os testes. Para os casos em que a deterioração se prenunciou principalmente na forma de desgaste uniforme de flanco (VB1) foi estabelecido um valor máximo de 0,35 mm e para os testes onde foi observada a perda de material por lascamento não uniforme (CH2) foi definido o valor máximo de 0,4 mm. No entanto, em alguns dos testes onde o dano observado comprometia a integridade do equipamento ou material, decidiu-se interromper as operações de forma a evitar danos ou a destruição total da ferramenta.

4.1.1 – Localização da deterioração na ferramenta

Dependendo das características da broca, material e condições de corte a deterioração pode pronunciar-se de formas totalmente distintas, tanto a nível de intensidade como localização. Nos testes realizados, observou-se um nível de deterioração significativamente maior ao longo da aresta principal de corte, com algumas zonas críticas a apresentar fraturas. Na aresta secundária de corte a deterioração manifesta-se exclusivamente na forma de desgaste uniforme ao longo de 30 mm, correspondentes à profundidade dos furos. Na figura 39 é evidenciada a diferença de deterioração entre a aresta principal (a) e secundária de corte (b).

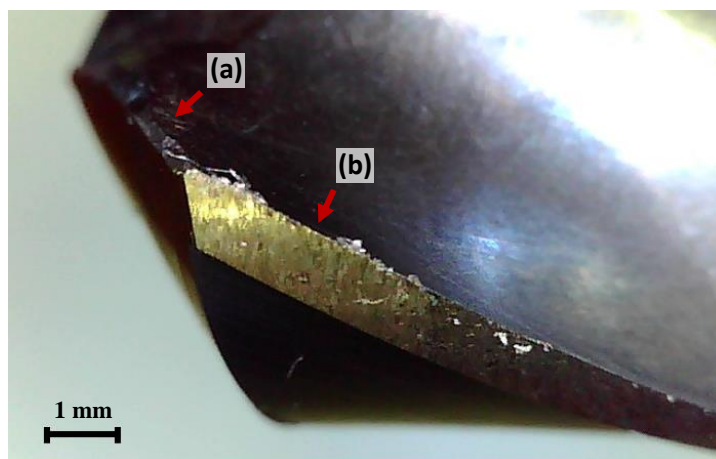


Figura 39. Comparação do nível de deterioração entre a aresta principal e secundária de corte (teste A1).

O corte do material é conseguido pela interação da aresta principal de corte em relação ao material, onde são exercidos grandes esforços que contribuem para as elevadas temperaturas

que aí se observam. Sendo que esta é a única aresta responsável pelo corte de material de forma direta, não é estranho que as restantes se mantenham relativamente intactas até ao fim da vida útil. Apenas uma pequena extremidade da aresta secundária contribui de forma direta para o corte, com um comprimento igual ao avanço, onde é notória uma deterioração superior ao restante comprimento da mesma. O desgaste uniforme observado ao longo da aresta secundária tem origem na fricção entre a ferramenta e a superfície lateral dos furos, devido ao movimento de rotação. De forma semelhante, a aresta transversal de corte também apresenta um nível de deterioração bastante inferior ao da aresta principal de corte, apresentando exclusivamente desgaste uniforme devido ao efeito de compressão do material.

Ao analisar os resultados em cada teste é possível observar um padrão na distribuição da deterioração, podendo-se afirmar que os fenómenos causadores de falha têm origem na aresta principal de corte. Com base nestas observações, assim por diante, a atenção deste trabalho decairá na aresta principal de corte, que é o único elemento a apresentar valores de deterioração significativos, comparativamente aos restantes que não exibem qualquer risco para o desempenho das brocas.

Na figura 40, são apresentadas fotografias da aresta principal de corte, na perspetiva da face de incidência (fig. lado esquerdo) e na perspetiva da face de ataque (fig. lado direito) para o último furo efetuado em cada um dos testes.

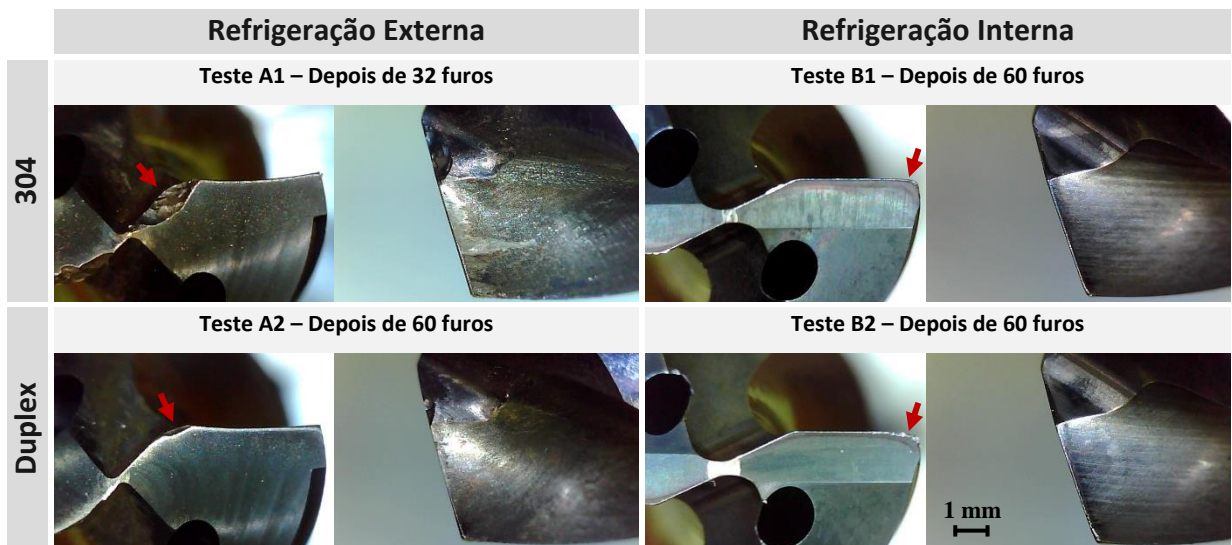


Figura 40. Distribuição da deterioração para o último furo efetuado em cada teste, nas brocas de 2 gumes.

Dentro dos ensaios realizados com brocas de 2 gumes, a deterioração manifestou-se de forma mais significativa no teste A1, onde são visíveis fraturas de dimensões consideráveis junto ao núcleo da broca. Os testes A2 e B2 também apresentam fraturas visíveis a olho desarmado, no entanto significativamente menores. Por sua vez, o teste B1 foi o que aprestou os melhores resultados, onde as dimensões da fratura passam praticamente despercebidas.

Ao comparar os resultados entre as diferentes geometrias, rapidamente se nota que as fraturas têm uma zona preferencial para a sua formação. Relativamente à primeira geometria

(A), que possui uma aresta principal curva, as fraturas tendem a localizar-se próximo do núcleo, em contraste com a segunda geometria (B) que apresenta fraturas na periferia da broca. Como é visível a geometria da ferramenta pode ditar a localização da deterioração.

4.1.2 – Evolução da deterioração

Devido à interação das ferramentas com o material a sua deterioração é inevitável, no entanto esta dá-se a diferentes velocidades dependendo das condições de trabalho. No presente capítulo é avaliada a evolução da deterioração com o decorrer dos testes, os valores correspondentes são apresentados na figura 41 para o gume de corte mais solicitado. Apesar de existirem diferenças entre os gumes, estas pode ser desprezada quando os testes são analisados como um todo, isto é, a diferença registada é muito pequena relativamente ao valor da deterioração em si. Por outro lado, de acordo com a norma, o critério de fim de vida é alcançado quando um dos gumes de corte atinge o valor indicado e nesse momento os testes devem ser interrompidos. No entanto, apesar das recomendações impostas na norma, decidiu-se implementar um limite máximo de 60 furos para os testes que não alcançaram o critério de fim de vida.

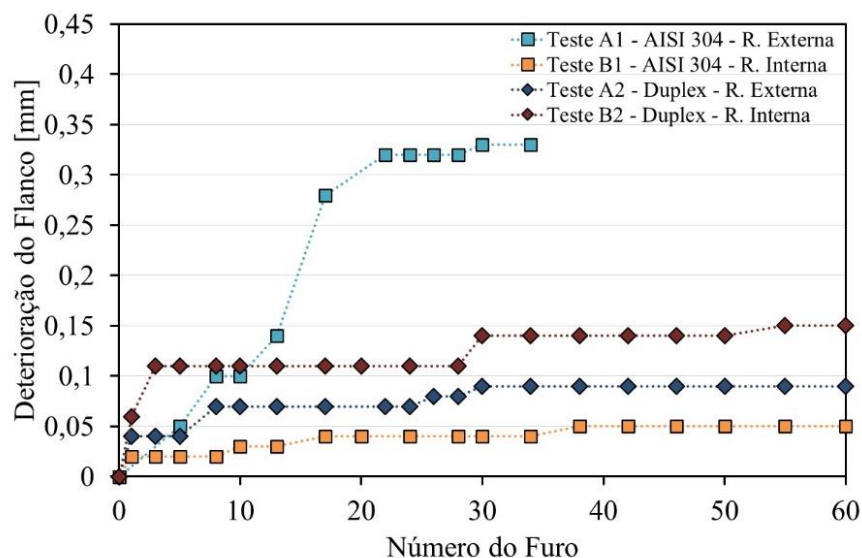


Figura 41. Evolução da deterioração nas brocas de 2 gumes, em função do número de furos.

Os resultados obtidos seguem o comportamento esperado de uma curva de vida, caracterizada por um desgaste inicial rápido, devido à adaptação da aresta de corte ao material, seguido de uma fase de estabilização em que a deterioração evolui a um ritmo constante e por uma fase final onde esta aumenta rapidamente até ocorrer falha total. Os piores resultados foram obtidos para o teste A1, onde a deterioração cresceu rapidamente até aos 0,32 mm. Devido às dimensões desta falha na aresta de corte, foi decidido interromper o teste com receio que esta evoluísse para falha catastrófica e acabasse por colocar o equipamento em risco. Os restantes ensaios tiveram um comportamento semelhante, marcado por um crescimento repentino no primeiro ou segundo furo seguido de um aumento lento e gradual até serem atingidos os 60 furos. Apesar

de também existir lascamento nestes testes, as dimensões atingidas não puseram em causa o desempenho das brocas, ao ponto de ser necessário interromper os ensaios por segurança.

O mesmo comportamento foi observado para todos os testes, com desgaste uniforme numa fase inicial, transitando para deterioração por lascamento numa fase imediatamente a seguir. Como seria de esperar, para o AISI 304 os piores resultados foram observados quando implementada refrigeração externa, quem em conjunto com a pobre condutividade térmica pela qual este material é conhecido, permitiu observar uma diferença significativa logo de imediato. No entanto, a velocidade com que esta diferença ocorre, também pode ser proveniente das diferenças entre geometrias. Uma vez que, o mesmo não ocorreu para o duplex, não é possível afirmar que o tipo de refrigeração por si só é o fator predominante para avaliar o tempo de vida.

4.1.3 – Influência da geometria da ferramenta no material

O desempenho das ferramentas encontra-se condicionado pela combinação de diversos fatores. A escolha da broca mais indicada não é suficiente para garantir o sucesso da operação, sendo necessário encontrar a melhor relação entre ferramenta, material e condições de corte. O gráfico anterior é um bom exemplo da conjugação destes fatores, onde o teste A2 em condições aparentemente mais desfavoráveis (refrigeração externa) obteve uma prestação superior à do teste B2 (refrigeração interna). Neste exemplo, a geometria da ferramenta teve o maior impacto, no entanto, isto apenas se verificou na furação do aço inoxidável duplex. Em contraste, o aço inoxidável AISI 304 aparenta beneficiar mais do tipo de refrigeração utilizada do que da geometria da ferramenta. É de evidenciar que as conclusões anteriores apenas se podem aplicar de acordo com os parâmetros de corte utilizados, a alteração destes pode causar diferenças significativas ao ponto de inverter os resultados.

4.2 – Testes com brocas de 3 gumes de corte

Como referido anteriormente, o tema das brocas de 3 gumes encontra-se menos explorado, por isso, nos capítulos seguintes é realizada uma análise mais aprofundada do seu comportamento durante as operações de furação na perspetiva da localização da deterioração e respetiva evolução.

4.2.1 – Localização da deterioração na ferramenta

As ferramentas possuem uma vida útil durante a qual sofre alterações na sua geometria, estas tendem a manifestar-se na forma de desgaste uniforme em situações ideais, mas como estas são praticamente inalcançáveis, acabam por ocorrer outras formas de deterioração menos desejáveis. Com o tempo, devido as solicitações contínuas da operação de furação a camada de revestimento da broca acaba por romper, deixando o material de menor resistência ao desgaste

exposto. É neste momento que as formas de deterioração menos desejadas tendem a aparecer, na forma de lascamento, fissuras, deformação plástica e em último caso falha catastrófica.

À semelhança dos testes com brocas de 2 gumes de corte, a deterioração manifestou-se de forma mais significativa ao longo da aresta principal de corte. Os piores resultados foram obtidos para os testes com refrigeração externa, onde a formação de apara aderente foi mais intensa. Apesar da formação de apara aderente ter estado presente nos 8 testes, foi sempre mais evidente nos casos com refrigeração via externa, onde o difícil acesso do fluido à zona de corte juntamente com a baixa condução térmica dos materiais fez a temperatura escalar rapidamente. Em adição, a dificuldade em fazer movimentar as aparas ao longos dos canais, especialmente nas brocas de 3 gumes onde estes são menores, promoveu a estagnação do fluxo de aparas facilitando a sua fundição às arestas de corte devido à ductilidade dos aços inoxidáveis. Este fenómeno pode ser observado em mais detalhe na figura 42.

Durante a realização dos vários testes foi notória uma diferença no grau de fundição das aparas ao gume de corte, a partir do momento em que se passou a utilizar refrigeração via interna a intensidade de formação de apara aderente diminuiu drasticamente, assim como o seu grau de fixação, ao ponto de ser possível remover as aparas com a aplicação de forças ligeiras, como o simples toque de um dedo.



Figura 42. Formação de apara aderente nas arestas de corte, num dos testes com refrigeração externa.

A formação de aparas aderentes é indesejável, uma vez que estas aceleram o processo de deterioração, acabando por comprometer a estabilidade e eficiência da broca. Esta concede uma forma arredondada à aresta de corte reduzindo a capacidade de penetração no material a cortar, com repercussões no aumento dos esforços e temperatura. Com o tempo, os aglomerados de apara aderente aumentam de dimensões chegando ao ponto de comprometer a permanência no seu lugar, neste momento ocorre o rompimento da apara, levando consigo pequenos fragmentos da broca, dando origem a lascamentos de dimensões sucessivamente maiores. Considerando que a resistência à tração e dureza do aço inoxidável duplex é superior, é de esperar uma adesão inferior por parte deste material, como efetivamente foi observado, estendendo a vida útil da ferramenta.

Na figura 43 são apresentados os perfis de deterioração da aresta principal de corte, na perspetiva da face de incidência (fig. lado esquerdo) e na perspetiva da face de ataque (fig. lado

direito), respetivamente. As fotografias apresentadas correspondem ao último furo de cada teste, em que para os testes C1 e C3 correspondem ao momento em que o critério de fim de vida foi atingido.

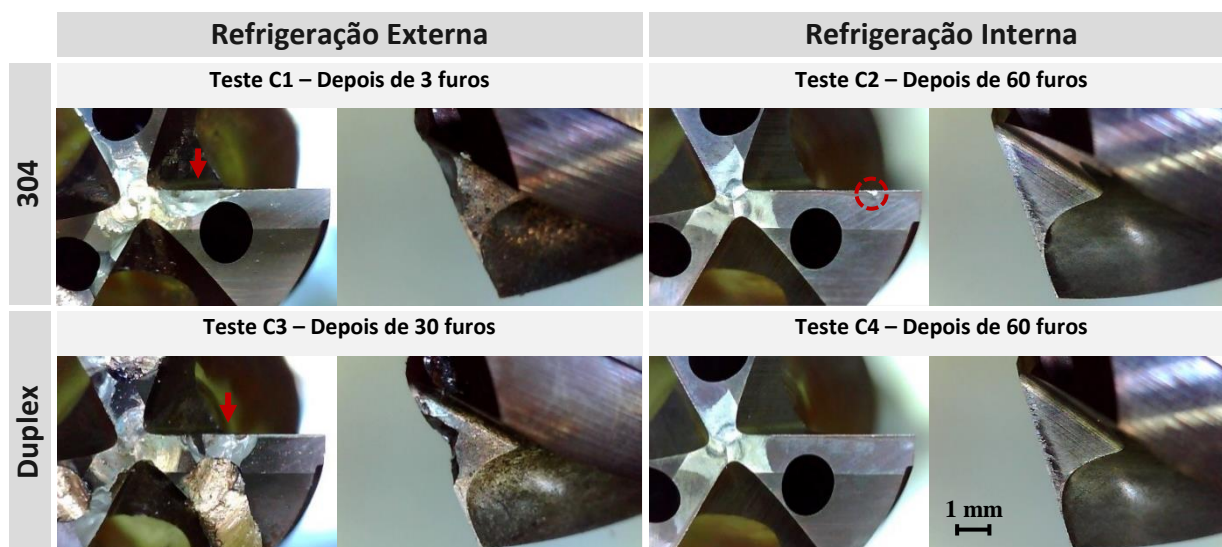


Figura 43. Distribuição da deterioração para o último furo efetuado em cada teste, nas brocas de gumes.

Os piores resultados correspondem aos testes C1 e C3, onde é evidenciada a perda de grandes dimensões de material na broca, apesar da presença de desgaste uniforme, considerou-se que o principal dano observado teve origem na perda de fragmentos da broca em posições localizadas através de lascamento. Durante os testes C2 e C4, a implementação de refrigeração via interna evitou o aparecimento de lascas nos primeiros 60 furos. Nestes testes, o principal dano observado deve-se ao desenvolvimento progressivo de desgaste uniforme ao longo do flanco por abrasão. Na fase final do teste C2, ocorreu a perda de um pequeno fragmento de material, indicado por um círculo na figura, porém a sua dimensão manteve-se constante até os testes terem sido interrompidos.

Os fenómenos de deterioração manifestam-se tanto na face de ataque como de incidência, porém, com o tempo as manifestações tomam dimensões superiores na face de incidência devido ao movimento de rotação da broca. Isto é, a deterioração propaga-se na direção do movimento relativo entre a ferramenta e a peça (plano perpendicular ao eixo central da broca). O nível de deterioração depende do grau de contacto e interação com o bloco de material, como é visível na figura anterior, o lascamento tende a localizar-se junto do núcleo da broca, onde a velocidade de corte e o ângulo de ataque são menores. As brocas utilizadas apresentam a peculiaridade do ângulo de ataque variar ao longo da aresta principal de corte, sendo este positivo na extremidade e negativo junto ao núcleo. Esta característica advém do processo de fabrico, que numa das últimas etapas da retificação da aresta de corte é aplicada uma operação que transforma o ângulo de ataque positivo, ao longo de toda a aresta formada pela interceção do canal de extração com a face de incidência, em negativo junto ao centro com o objetivo de reduzir a espessura do núcleo. Esta zona coincidiu com a localização em que a deterioração foi mais evidente. O ângulo nulo confere uma rigidez superior nesta zona, mas em contrapartida

resulta num aumento das forças de corte, necessárias para que a remoção de material da peça possa ocorrer, em compensação da redução do poder de corte. São estas forças, juntamente com a formação de apra aderente, que estão na base dos fenómenos de deterioração apresentados.

A velocidade de corte apresenta uma distribuição linear ao longo da aresta de corte, sendo esta nula ao centro, seguida de um aumento progressivo até atingir o valor máximo na periferia (figura 44). As forças aplicadas ao longo do gume, na direção da velocidade de corte, apresentam uma distribuição semelhante, isto é, inexistentes ao centro e máximos no ponto mais afastado. No centro as únicas forças registadas têm origem no efeito de compressão, devido à incapacidade da aresta transversal para cortar o material. Assim, a localização da deterioração resulta de uma conjugação dos fatores anteriormente mencionados, juntamente com o favorecimento da formação da apra aderente ao centro, enfatizada pela baixa velocidade de corte ao centro.

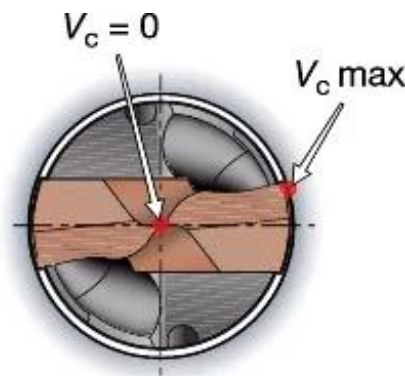


Figura 44. Distribuição da velocidade de corte ao longo da aresta principal de corte (Sandvik, 2015).

No teste C3 os canais concebidos para serem utilizados com refrigeração via interna resultaram num ponto de fragilidade, pois a inutilização desta função na refrigeração externa anulou as suas vantagens e evidenciou desvantagens. Os furos dos canais de refrigeração acabam por remover rigidez à ferramenta, em especial nas brocas de 3 gumes, onde a adição de mais um canal de extração de aparas obriga à deslocação dos furos para a proximidade da aresta de corte. A rigidez reduzida da ferramenta nesta zona favorece a fragmentação do gume devido à ausência de suporte da aresta. A falta de material nesta zona, permitiu que as aparas conseguissem alojar-se no interior dos furos de refrigeração, provocando a sua obstrução conforme se observa na respetiva figura.

4.2.2 – Evolução da deterioração

Ao analisar os testes realizados com brocas de 3 gumes de corte, rapidamente se observa que independentemente do material ensaiado, a vida útil da ferramenta é sempre menor para a refrigeração via externa, levando a crer que o tipo de refrigeração utilizado tem uma influência superior na deterioração da ferramenta do que o material onde está a ser realizada a furação. A evolução anteriormente descrita encontra-se representada na figura 45, onde foi registado o valor do desgaste no gume de corte mais danificado, de acordo com a norma ISO 8688-1.

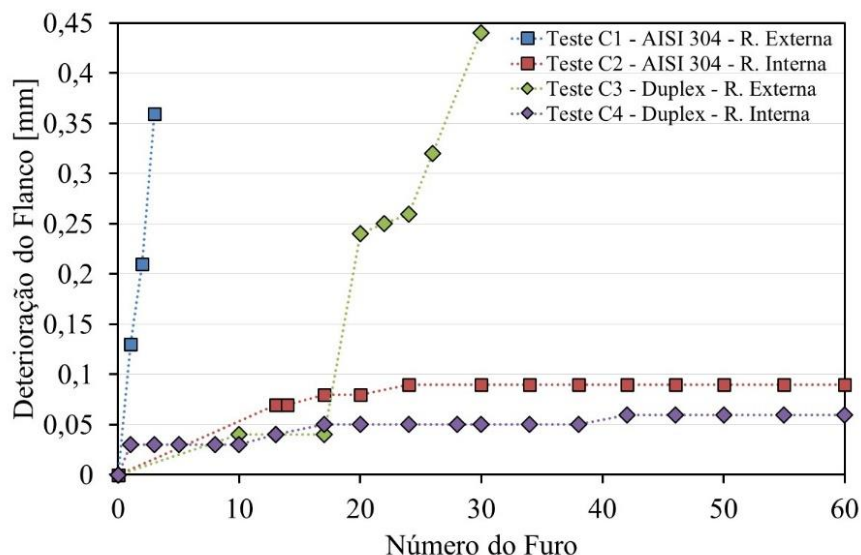


Figura 45. Gráfico da evolução da deterioração das brocas de 3 gumes.

As diferenças mais notórias advêm do modo de aplicação do fluido de corte. Nos testes onde é utilizada refrigeração via externa, os valores de deterioração tendem a aumentar de forma repentina até o critério de deterioração ser atingido. Por sua vez, nos testes onde foi utilizada refrigeração via interna, os valores tiveram um crescimento geral pouco significativo, mas acelerado durante os primeiros furos, correspondentes à fase inicial de adaptação da ferramenta. Na segunda fase, os valores começaram a estabilizar e mantiveram-se praticamente inalterados até os ensaios terem sido interrompidos. Quando o fluido de corte é aplicado via externa, existe uma certa dificuldade em fazê-lo chegar à zona de corte devido ao comprimento dos furos e movimento rotacional da ferramenta que promove a sua remoção do interior. A ausência de quantidades significativas de fluido de corte na região de interação da aresta principal de corte com a peça, promove o aumento da temperatura que favorece a formação de aparas aderentes, bem como o aumento dos esforços sobre o gume, levando à aceleração do processo de deterioração. Em adição, o aparecimento das primeiras fraturas no gume de corte, funcionam como um estímulo para a sua propagação e aparecimento de novas fraturas.

Relativamente aos materiais, verificou-se que o aço inoxidável AISI 304 teve os piores resultados, em especial na refrigeração via externa, onde a broca foi considerada inutilizável ao fim de apenas 3 furos. Devido à estrutura altamente dúctil dos aços inoxidáveis austeníticos, existe uma tendência superior para formar aparas aderentes de grandes dimensões e instáveis, que rapidamente degradam o gume de corte.

Comparativamente às brocas de dois gumes, quando é utilizada refrigeração via interna, as brocas de três gumes possuem um desempenho muito semelhante, no intervalo de 60 furos, sendo as diferenças observadas praticamente desprezáveis. É espectável que apenas na fase final de vida seja possível começar a observar diferenças significativas. Por sua vez, na refrigeração via externa, a diferença em desempenho entre as brocas de dois e três gumes foi bastante perceptível, ao ponto de as brocas de três gumes apresentarem danos significativos logo de imediato.

Em conclusão, de forma resumida, a implementação de refrigeração via interna é imprescindível para uma operação bem-sucedida, em especial nas brocas de três gumes. Este sistema não só reduz a formação de aparas aderentes de forma drástica, ao baixar as temperaturas, como também evita o entupimento dos canais de extração, ao quebrar e empurrar as aparas para fora dos furos.

4.3 – Estudo comparativo entre brocas de 2 e 3 gumes de corte

Do ponto de vista dos métodos caracterizadores da deterioração considerou-se mais oportuno realizar a comparação lado a lado dos resultados. Assim, nos capítulos seguintes são apresentados os resultados obtidos para as brocas de dois e três gumes na medição da rugosidade, dimensão dos furos, análise de vibrações e formação de aparas.

4.3.1 – Rugosidade

Com base em todos os furos realizados, na figura 46 são apresentados os valores da rugosidade média (Ra) e altura média entre o vale e o pico (Rz), com os respetivos desvios-padrão. Ao analisar os dados, é possível observar que a rugosidade média possui um desvio-padrão muito baixo, significando isto que os valores se mantêm praticamente inalterados do início ao fim, independentemente das condições do teste. Este acontecimento é explicado pela localização da deterioração, pois como observado anteriormente, a aresta principal de corte é aquela que sofre a maioria do dano, enquanto a aresta secundária se mantém praticamente inalterada. Desta forma, é perfeitamente normal que a superfície lateral do furo não apresente variações significativas, considerando que esta é formada pela aresta secundária (num comprimento correspondente ao avanço por gume) e pela zona de interceção das duas arestas de corte, primária e secundária.

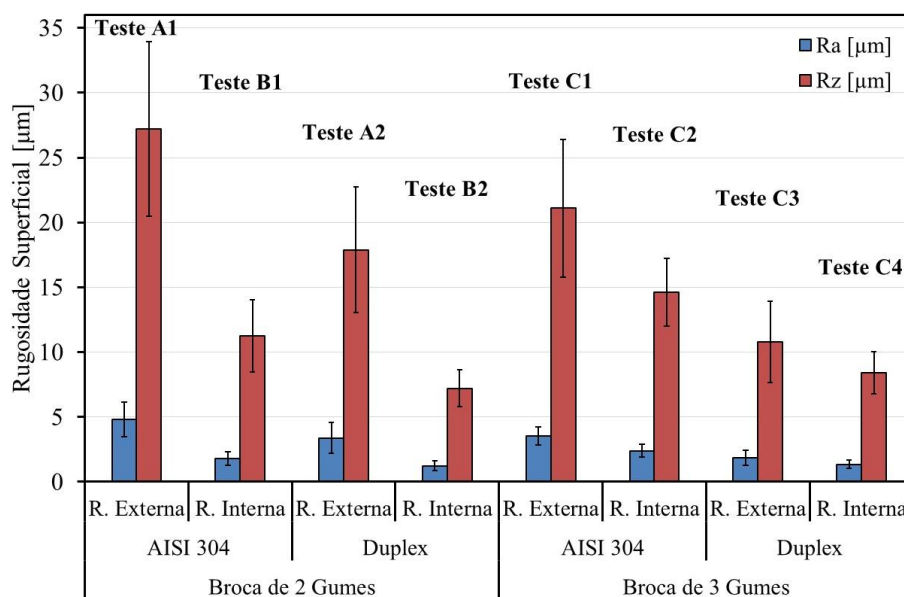


Figura 46. Gráfico de barras da rugosidade superficial nos diferentes testes.

Como seria de se esperar, para ambos os materiais, os maiores valores de rugosidade são obtidos na refrigeração via externa, já que nesta situação o comprimento das aparas é maior e a extração menos fluída com mais movimento aleatório, originando maior rugosidade na superfície do furo. Em relação aos materiais, o aço inoxidável AISI 304 apresenta um desempenho inferior ao duplex, principalmente devido aos menores valores de dureza. Uma vez que, no teste equivalente, a rugosidade superficial é sempre menor para o aço inoxidável duplex do que para o AISI 304, levando a crer que o material ensaiado tem maior influência na rugosidade do que propriamente o tipo de refrigeração. Em sentido contrário, anteriormente observou-se que a alternância entre a refrigeração interna ou externa tem um impacto superior na deterioração da ferramenta do que o material ensaiado.

Por último, fazendo uma análise da rugosidade baseada no tipo de broca utilizada, pode-se dizer que para o caso das brocas de três gumes, os melhores resultados são sempre obtidos para o aço inoxidável duplex, enquanto no caso das brocas de dois gumes, os melhores resultados são sempre obtidos para a refrigeração interna. Do ponto de vista teórico, a utilização dos mesmos parâmetros de corte para as brocas de dois e três gumes deveria conceder uma vantagem às brocas de três gumes. Isto é, enquanto as brocas de dois gumes têm um avanço por gume de corte de 0,33 mm por rotação, as brocas de três gumes têm apenas 0,22 mm por rotação. Esta diferença deveria expressar-se numa redução de aproximadamente um terço na rugosidade para as brocas de três gumes, entre testes equivalentes. Embora este efeito possa também ter influência nestes resultados, não foi evidente uma relação direta com este fator, dando a entender que para além do número de gumes a geometria deles próprios também têm um peso considerável nos resultados.

Nos blocos cortados por eletroerosão, são visíveis algumas irregularidades no perfil de distribuição da rugosidade. Na figura 47, as ranhuras deixadas pela passagem da ferramenta não apresentam o mesmo espaçamento e profundidade ao longo do comprimento do furo, dando a entender que existe um fenómeno modificador da superfície. Considerando que o avanço da ferramenta é constante e que estes efeitos são mais perceptíveis na refrigeração externa, pode-se afirmar que a aleatoriedade associada ao processo de furação e extração das aparas está na sua origem.



Figura 47. Perfil de distribuição da rugosidade ao longo dos furos.

4.3.2 – Dimensão dos furos

A avaliação da qualidade dos furos através da ovalização e linearidade são características igualmente importantes. Para determinadas aplicações é extremamente importante que os furos tenham as tolerâncias dimensionais corretas. De forma a obter um valor de referência para as alterações registadas ao longo dos furos, o diâmetro das brocas foi avaliado antes de realizar qualquer operação. Para uma broca com valor nominal de 10 mm, observou-se que o diâmetro das ferramentas variou entre 10.000 e 10.009 mm para as brocas de 2 gumes e 10.000 e 10.016 mm para as brocas de 3 gumes, encontrando-se dentro das tolerâncias indicadas pelo fabricante (Palbit, 2021).

A ovalização dos furos foi avaliada a uma profundidade de 25 mm, para a qual foram registados os valores do diâmetro máximo e mínimo, presentes na figura 48 e figura 49 para as brocas de 2 e 3 gumes de corte, respetivamente. Optou-se por realizar a medição o mais próximo da profundidade máxima, com o objetivo de minimizar eventuais inconsistências introduzidas pelo efeito oscilatório inicial durante o qual a ferramenta tende a desviar-se da sua trajetória. Quanto maior a diferença registada entre o diâmetro máximo e mínimo para o mesmo furo maior será a ovalização.

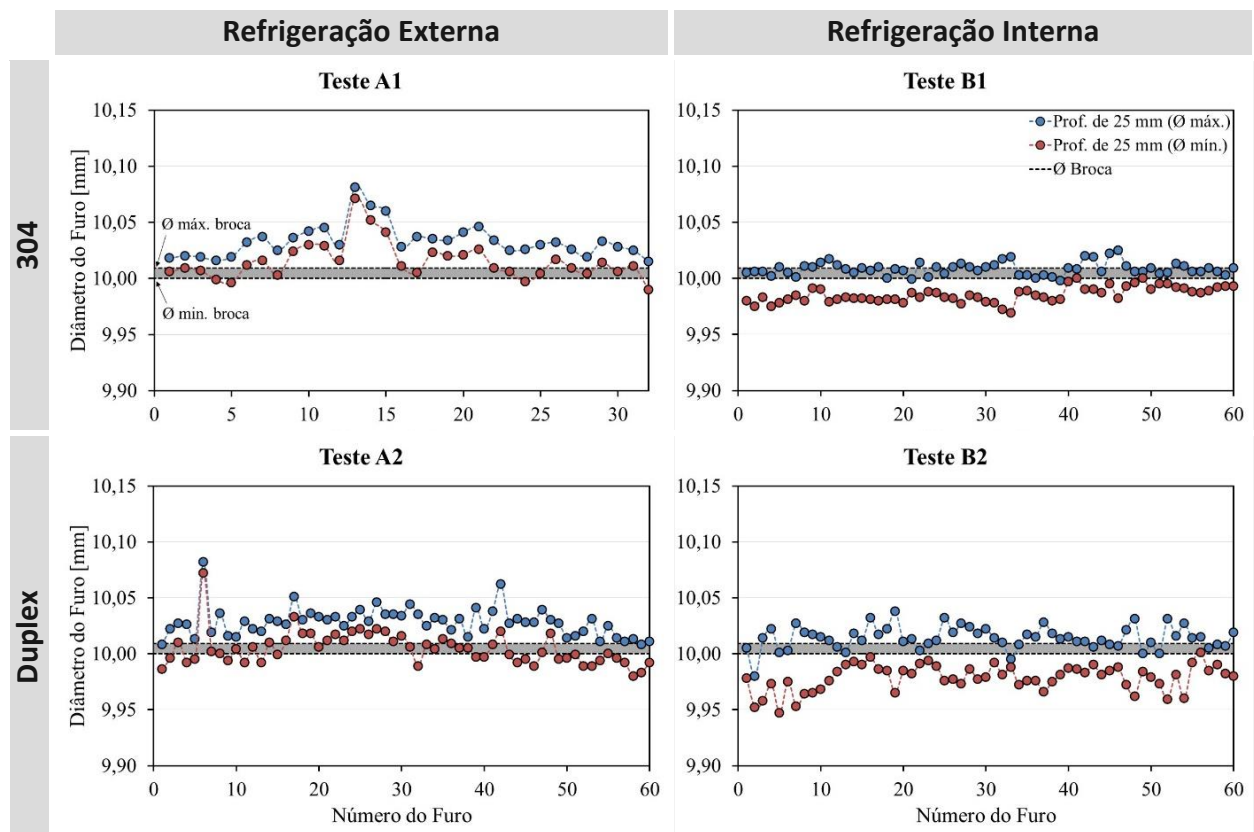


Figura 48. Gráficos da variação de diâmetro à profundidade de 25 mm, para brocas de 2 gumes.

Em geral, a geometria da ferramenta utilizada nos testes A1 e A2 apresenta uma diferença entre valores inferior à da geometria utilizada nos testes B1 e B2. Com base noutros estudos, seria de espera que os melhores resultados fossem obtidos nos casos com refrigeração interna, no entanto verificou-se que a geometria utilizada nos testes A1 e A2 tem um impacto

superior na ovalização dos furos, face ao tipo de refrigeração. Apesar das duas geometrias possuírem diâmetros nominais semelhantes, nos testes B1 e B2 os valores registados para o menor diâmetro tendem a ser inferiores à faixa de intervalo, em parte, este fenómeno é justificado pelas dilatações térmicas, que devido à passagem do fluido de corte pelo interior da broca têm maior efeito na expansão e contração da broca e consequentemente dos furos. Em contraste, nos testes A1 e A2 os valores registados tendem a ser superiores ao diâmetro nominal, pois a utilização de refrigeração via externa dificulta a chega do fluido à zona de corte, o que resulta numa dilatação térmica superior da broca e consequentemente em furos de diâmetro superior. Para agravar a situação, estas condições pioram a estabilidade da ferramenta que se reflete nas vibrações, conforme será discutido mais à frente. No teste A1 é possível observar claramente o efeito da deterioração acentuada da ferramenta que ocorreu nos furos 13, 14 e 15 (conforme se observou na figura 41), pois na avaliação do diâmetro dos furos, as maiores variações de valor também correspondem aos furos 13, 14 e 15. Para estes furos é observado um pico momentâneo dos valores que corresponde ao instante em que a deterioração evoluiu de forma mais significativa. Relativamente aos materiais ensaiados, verificou-se que a diferença entre o diâmetro máximo e mínimo para cada um dos furos, tende a ser menor para o aço inoxidável AISI 304, ao passo que o aço inoxidável duplex apresenta variações aleatórias mais frequentes. No que diz respeito às brocas de três gumes, a figura 49 apresenta os resultados obtidos.

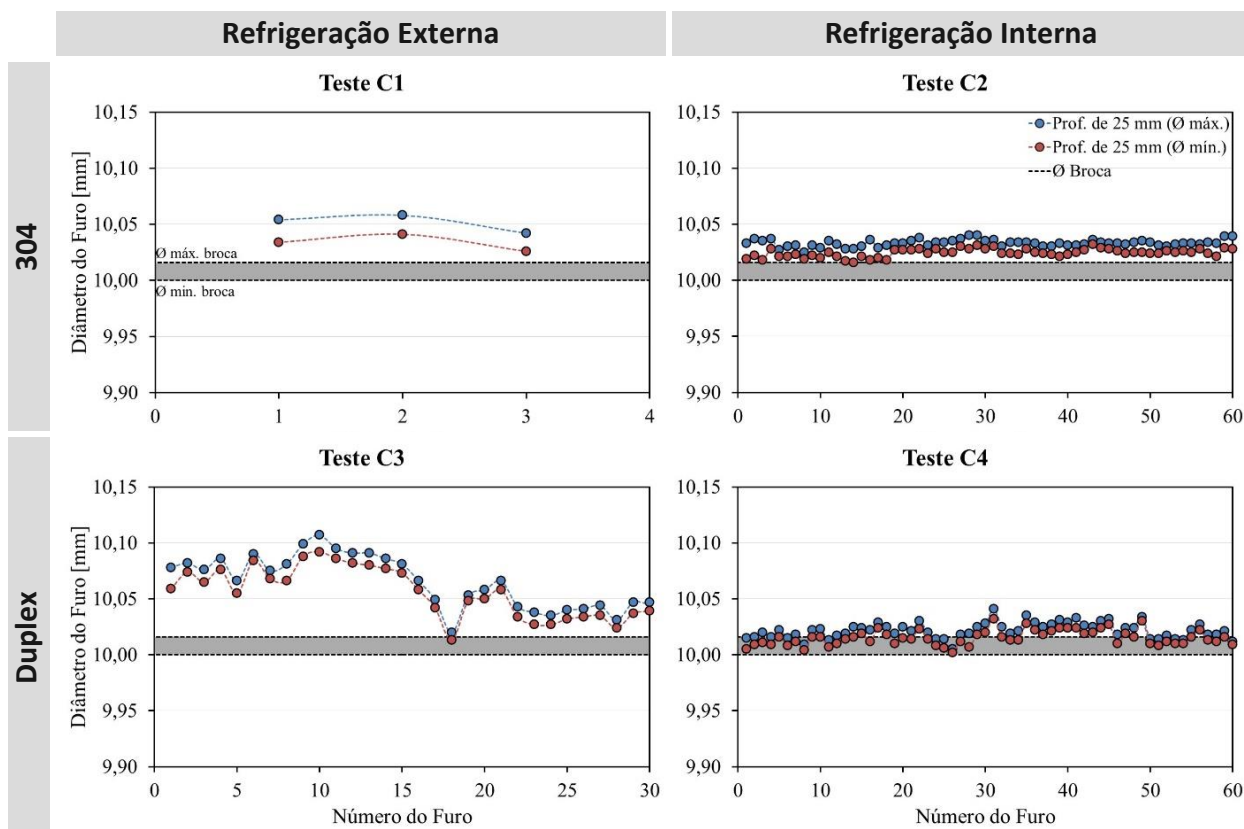


Figura 49. Gráficos da variação de diâmetro à profundidade de 25 mm, para brocas de 3 gumes.

Como seria de esperar, devido ao efeito autocentrante das brocas de três gumes, os valores de ovalização são inferiores aos registados para as brocas de dois gumes. Os testes com

refrigeração interna (testes C2 e C4) foram os que registaram os melhores resultados, tanto a nível da ovalização como da consistência dos valores ao longo dos testes, que se mantiveram basicamente constantes até ao fim. Nestes testes, a geometria da broca não sofreu alterações consideráveis devido à deterioração. Por sua vez, os piores resultados foram obtidos para o teste C3, que apesar de apresentar valores de ovalização relativamente baixos, demonstrou ter um comportamento instável, em especial no 17º furo. Ao relacionar os dados com o gráfico da evolução da deterioração (figura 45) é detetável que este acontecimento corresponde ao momento em que a deterioração começou a evoluir de forma apreciável.

No teste C1 a deterioração evoluiu de forma repentina, não permitindo registar uma amostra significativa de valores, sendo assim difícil de retirar conclusões. Contudo, existe uma diferença perceptível entre o diâmetro máximo e mínimo, indicando uma maior ovalização em comparação com os restantes testes em brocas de três gumes.

Novamente nos testes com refrigeração externa são registados diâmetros superiores ao valor nominal, devido ao pobre arrefecimento da ferramenta que resulta na sua dilatação. Em contraste com as brocas de dois gumes, os valores registados são em geral superiores ao diâmetro da ferramenta. Com base na discussão dos resultados é constatável que a estabilidade dos furos está mais dependente da manutenção da ferramenta em boas condições e do tipo de refrigeração, do que propriamente com o material sobre o qual são realizados os testes.

A linearidade é outra forma de avaliar a qualidade dos furos, permitindo este parâmetro averiguar eventuais variações ao longo do seu comprimento, em especial desvios na linha de eixo. Na figura 50 é apresentado um exemplo onde é evidenciada uma curvatura na linha de eixo ocorrida durante a operação de furação com a broca de dois gumes, a qual desviou-se da trajetória pretendida. Este fenómeno é mais evidente nas brocas de dois gumes, devido à forma que apresenta a aresta transversal da ferramenta, pois exerce contacto com o material ao longo de uma linha, em vez de um ponto, como é o caso das brocas de três gumes. O contacto em múltiplos pontos em simultâneo provoca um movimento oscilatório na ponta da broca, afetando a sua trajetória. Contudo, este problema não é exclusivo das brocas de dois gumes, podendo ser observado em situações que o entupimento de aparas dentro do furo obriga a ferramenta a desviar-se da sua trajetória e a exercer maior pressão num determinado sentido sobre a parede do furo, favorecendo a remoção de maiores quantidades de material nessa zona.

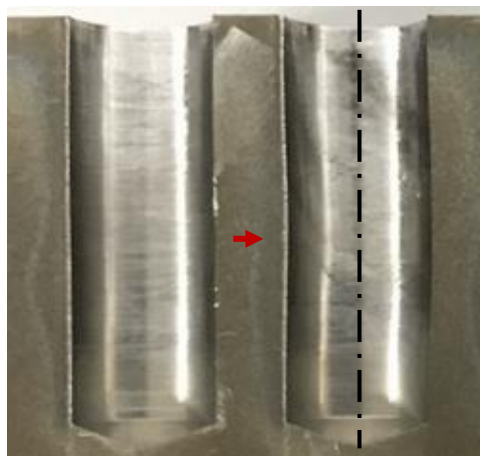


Figura 50. Variações na linearidade provocadas pelo desvio da broca ao longo da linha de eixo.

Os valores correspondentes à análise da linearidade são apresentados na figura 51, na forma do valor médio e respetivo desvio padrão de todos os furos para cada teste realizado, onde se encontra também assinalado com sombreado cinzento, a gama de valores do diâmetro para as ferramentas utilizadas. Para cada furo foram realizadas várias medições à profundidade de 8 mm e 25 mm, permitindo assim de forma indireta averiguar eventuais desalinhamentos ao longo do furo que se manifestam numa variação do diâmetro.

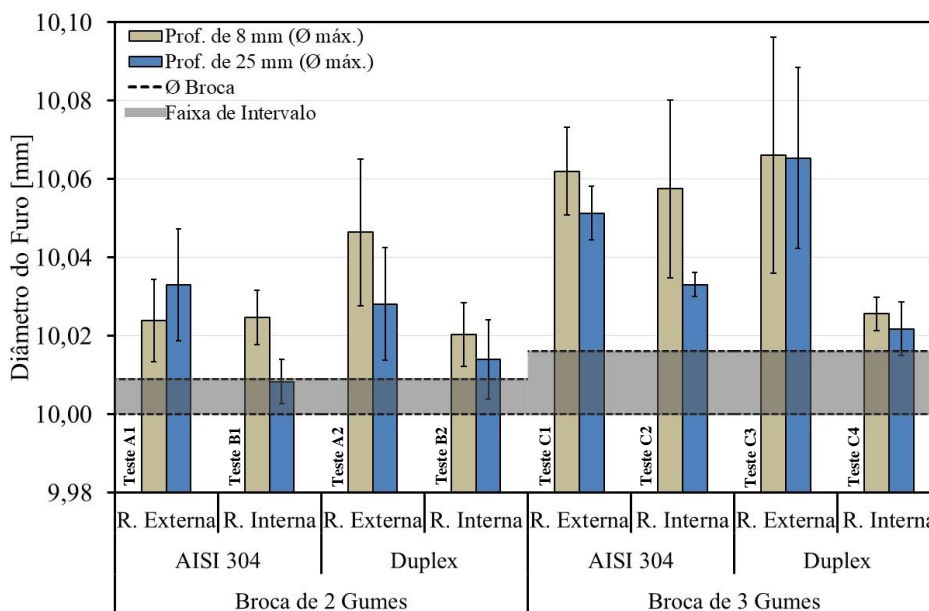


Figura 51. Gráfico de variação média do diâmetro máximo no topo e fundo dos furos.

À exceção do teste A1, observou-se que os valores à entrada do furo são normalmente superiores, devendo-se à fase inicial de centragem durante a qual a ferramenta está mais suscetível a vibrações, resultando num alargamento dos furos. Em geral, esta diferença é mais perceptível nas brocas de dois gumes (em especial no aço inoxidável duplex), resultado da menor capacidade de autocentragem. Além disso, são observadas várias mudanças de direção da broca ao longo do eixo. Os maiores desvios-padrão foram obtidos para o teste C3, sendo perfeitamente normal, considerando que para este teste os furos foram avaliados até ao ponto em que a ferramenta atingiu o critério de deterioração. Para todos os casos, observou-se que nos teste com refrigeração interna ocorre uma ligeira descida dos valores face ao teste equivalente com refrigeração externa. Os melhores resultados foram obtidos no aço inoxidável duplex com refrigeração interna, dando a entender que o tipo de material e refrigeração têm grande impacto nos resultados obtidos. Da análise dos resultados pode-se afirmar que para o aço inoxidável duplex as brocas de três gumes apresentam resultados superiores como seria de esperar, no entanto, para o aço inoxidável AISI 304 não é possível afirmar que uma broca apresenta vantagens sobre a outra.

4.3.3 – Análise de vibrações

Nos tópicos anteriores foi referido por várias vezes o impacto que as vibrações têm sobre a vida útil da ferramenta e qualidade dos furos. Deste modo, torna-se importante compreender a origem dos fenómenos causadores de vibrações indesejadas de forma a corrigi-los e otimizar o processo de furação. Estas vibrações podem ser causadas por diversos fatores, entre eles parâmetros de corte incorretos, fixação indevida da ferramenta ou peça, *run-out*, formação de apara aderente, fatores externos ou no caso estudado por alterações na geometria da ferramenta. O aparecimento de novas vibrações durante a operação de furação é o primeiro sinal de que a geometria da ferramenta está a sofrer alterações. Nestas situações as vibrações são muitas vezes subestimadas devido à complexidade de implementação deste método ou desconhecimento por parte dos utilizadores.

O estudo do comportamento das brocas através da análise do sinal de vibrações foi realizado no domínio de tempo e frequência. Na figura 52 é apresentado um gráfico do sinal em domínio de tempo, onde é possível observar a vibração registada para as várias etapas do processo de furação. Para todos os testes o registo da vibração identificou um comportamento semelhante por parte da ferramenta, com ligeiras alterações na amplitude do sinal conforme a evolução da deterioração.

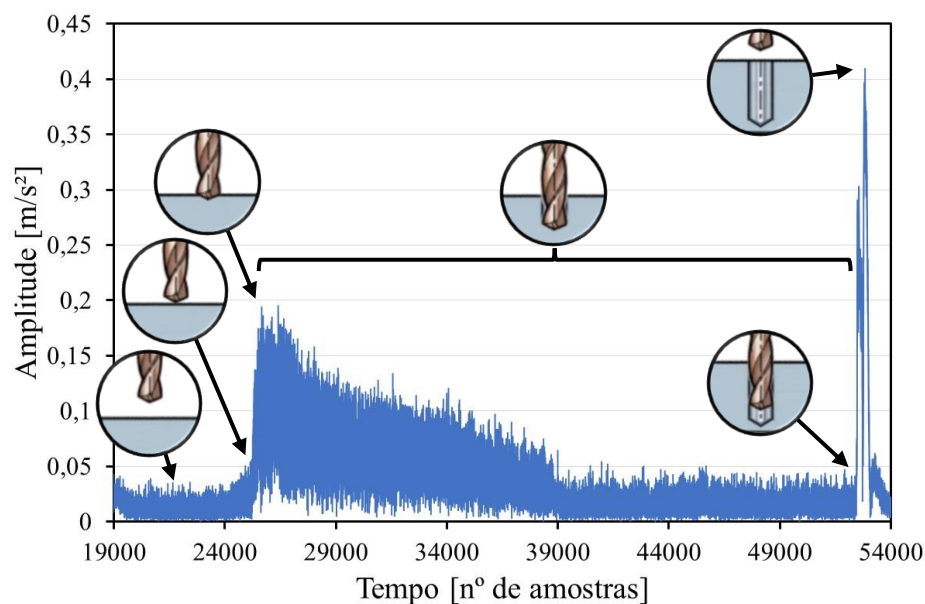


Figura 52. Gráfico típico do domínio de tempo durante a operação de furação.

Na fase inicial da operação, as únicas vibrações detetadas devem-se ao funcionamento do equipamento e à velocidade de rotação da ferramenta. O momento de maior exigência para a ferramenta corresponde à fase inicial, quando ocorre o primeiro contacto da broca com a peça. Após a totalidade da aresta principal de corte entrar em contacto com o material, ocorre um decréscimo gradual da amplitude até estabilizar para um valor constante até ao fim da furação. No instante em que a profundidade máxima do furo é atingida, é efetuado um movimento repentino de recuo da broca, o qual é registado no gráfico na forma de um pico de amplitude muito maior do que o registado até aquele momento. Após a estabilização do equipamento, o

o sinal de vibração regressa a um ponto estável de baixa amplitude, onde o sinal é apenas caracterizado pelas frequências de vibração geradas pelo funcionamento do equipamento. Na fase final do processo de furação, a amplitude do sinal é muito próxima da amplitude registada nos momentos iniciais, o que indica que a exigência sobre a ferramenta é substancialmente inferior e muito menos perigosa para a estabilidade e vida útil da ferramenta. A amplitude máxima detetada na fase inicial é o instante mais crítico, durante o qual a ferramenta estabelece o ponto de contacto em relação à peça. Quanto maior o desfasamento entre o eixo central da broca e do furo, maior será esta amplitude da vibração, pelo que devido à falta da capacidade de autocentragem das brocas de dois gumes face às de três gumes, as amplitudes de vibração registadas tendem a ser superiores. É neste caso que o *run-out* da ferramenta têm maior influência. A existência de valores elevados de *run-out* provoca amplitudes de vibração exageradas, pondo em causa a estabilidade da broca, sendo por este motivo assegurado que os valores de *run-out* se encontravam dentro do intervalo especificado pelo fabricante.

A análise dos dados em domínio de tempo demonstrou ser inconclusiva, pois devido à natureza deste tipo de ensaio existem muitos distúrbios externos ao processo que são impossíveis de controlar. A análise do sinal é necessária para se poder distinguir a informação desejada do ruído, no entanto os filtros aplicados não mostraram resultados satisfatórios ao ponto de se poder assegurar a sua fiabilidade. Os resultados apresentados na figura 53 dizem respeito à média dos valores de RMS e pico para a duração de cada teste, sem aplicação de qualquer tipo de filtro no sinal captado.

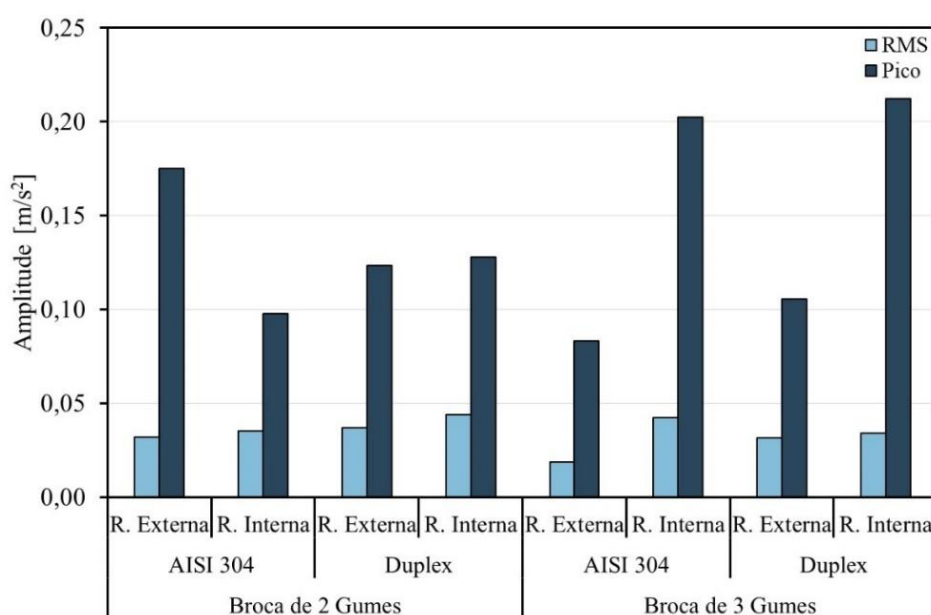


Figura 53. Valores de RMS e pico para os diferentes testes em domínio de tempo.

Tanto os valores de RMS como de pico, que representam o valor máximo absoluto da amplitude captada, são bastante superiores aos valores apresentados nos gráficos em domínio de frequência. Sugerindo que existe uma distorção do sinal, não sendo possível estabelecer uma relação entre os dois domínios. Além disso, os valores apresentados não seguem o mesmo padrão dos resultados apresentados nos outros métodos de avaliação ou mesmo com os gráficos

de deterioração. Assim os dados da figura 53, foram desconsiderados dado não ser possível estabelecer uma relação de causa efeito face à distorção do sinal.

Face à dificuldade de encontrar coerência nos resultados de vibração, optou-se por transformar o sinal para o domínio da frequência. A vantagem de analisar os resultados em domínio de frequência prende-se com a possibilidade de identificar de forma clara as frequências de maior amplitude, as quais correspondem aos principais fenómenos detetados. Na figura 54 é mostrado o sinal de vibrações em domínio de frequência para o equipamento em funcionamento com o sistema de refrigeração ativo, mas sem ser efetuado qualquer corte de material. O sinal captado nesta situação servirá como padrão para comparação com o sinal registado nas diversas situações de furação. Neste gráfico é possível identificar um conjunto de frequências de elevada amplitude abaixo dos 2 Hz.

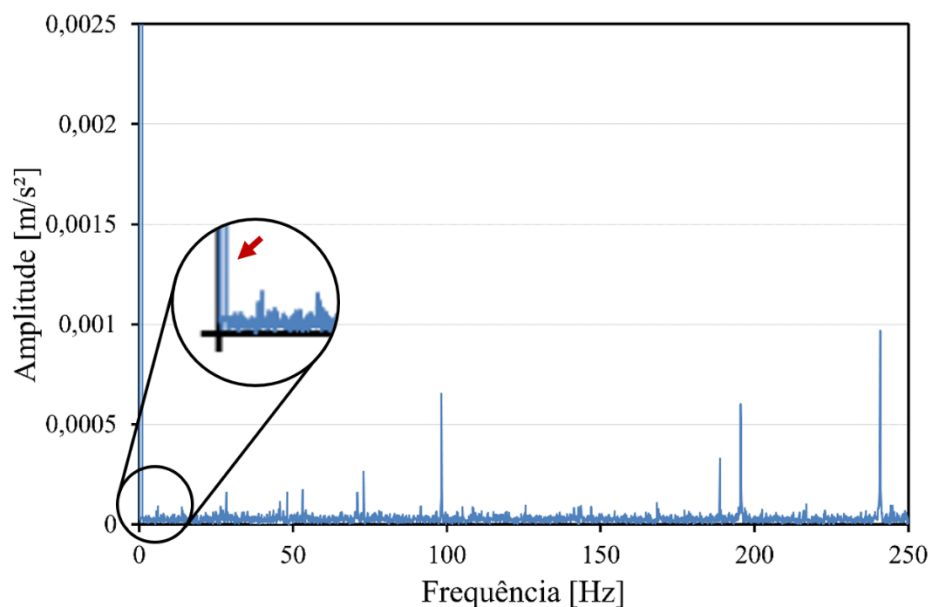


Figura 54. Frequências naturais e harmónicas do equipamento, na ausência de corte.

Os picos presentes a frequências abaixo de 2 Hz não correspondem a vibrações, embora sejam frequentemente confundidas como tal. Estas frequências são o resultado de desvios provocados pelo efeito de *Drift* (McGinty, 2012). Segundo a norma ISO 10816-3 (2009), estas frequências devem ser desprezadas por não representarem o processo de furação ou o funcionamento do equipamento. Por este motivo, para os restantes gráficos em domínio de frequência, os valores inferiores a 2 Hz foram removidos.

No gráfico anterior é possível identificar algumas das frequências naturais e respetivos harmónicos associadas ao funcionamento do equipamento e sistema de refrigeração. Os principais picos ocorrem aproximadamente a 72, 98, 189, 195 e 241 Hz, com alguns picos de menor amplitude a 27, 48, 52 e 70 Hz. A identificação destas frequências é relevante para o reconhecimento das frequências caracterizadoras do processo de furação e identificação de eventuais sobreposições com as frequências associadas ao fenómeno de furação.

Segundo esta linha de pensamento, é importante entender os fenómenos que cada pico representa. Embora se pretenda identificar os fenómenos de deterioração e falha da ferramenta

durante o processo de furação, nos gráficos em domínio de frequência também são detetados outros fenómenos para além das vibrações induzidas pelo corte. O movimento das várias partes da máquina (rolamentos, engrenagens, acionamentos por correia, etc.) e de outros equipamentos próximos em funcionamento também se refletem com diferentes frequências de valor significativo. O pico correspondente à frequência de 50 Hz é um caso peculiar, que está associado à frequência do ruído elétrico, embora outros efeitos não identificados se possam sobrepor.

Conforme referido no artigo escrito por Wang, et al. (2015), os fenômenos associados ao corte são expressos pela frequência da árvore (f_s) e pela frequência de engrenamento dos gumes de corte da ferramenta no material (f_m), cujas frequências correspondem aos valores calculados pelas equações 4.1 e 4.2 e observadas na figura 55 e figura 56, onde n corresponde à velocidade de rotação e z ao número de gumes de corte da ferramenta. Também é observado um pico corresponde ao segundo harmónica da frequência de engrenamento (f_{2h}), dado pela equação 4.3.

- Frequência da árvore:

$$f_s = \frac{n}{60} \quad (4.1)$$

- Frequência de engrenamento:

$$f_m = \frac{n \cdot z}{60} \quad (4.2)$$

- 2º harmónico da frequência de engrenamento:

$$f_{2h} = 2 \cdot f_m \quad (4.3)$$

Apesar da amplitude dos picos variar constantemente durante os testes, as diferenças em amplitude seguem um padrão comum, com um ligeiro aumento até ao último furo provocado pelo desgaste uniforme. Porém o aumento gradual da amplitude não demonstrou ser afetado pela perda de material na aresta de corte devido ao lascamento. À exceção do teste C4, os gráficos apresentaram uma evolução uniforme, daí optou-se por apresentar os gráficos de domínio de frequência apenas para o último furo de cada teste, onde os indícios de alteração na geometria são mais perceptíveis. A perda de eficiência da ferramenta manifestou-se principalmente na forma de bandas laterais junto aos picos de maior amplitude e num aumento generalizado do ruído ao longo do espectro.

Para os testes realizados com brocas de 2 gumes, as frequências associadas ao processo de furação correspondem a $f_s = 26,53 \text{ Hz}$, $f_m = 53,07 \text{ Hz}$ e $f_{2h} = 106,13 \text{ Hz}$ e podem ser observadas na figura 55. Devido aos valores dos parâmetros de corte utilizados, a frequência de engrenamento ficou sobreposta com o ruído elétrico. Ao comparar os resultados é perceptível uma diferença entre as duas geometrias de ferramenta utilizadas nas brocas de 2 gumes. Na segunda geometria (testes B1 e B2), as frequências associadas ao engrenamento da ferramenta tendem a apresentar amplitudes superiores às da primeira geometria (testes A1 e A2). Apesar

disto, não foram observadas diferenças significativas entre os testes que atingiram os 60 furos (testes B1, A2 e B2).

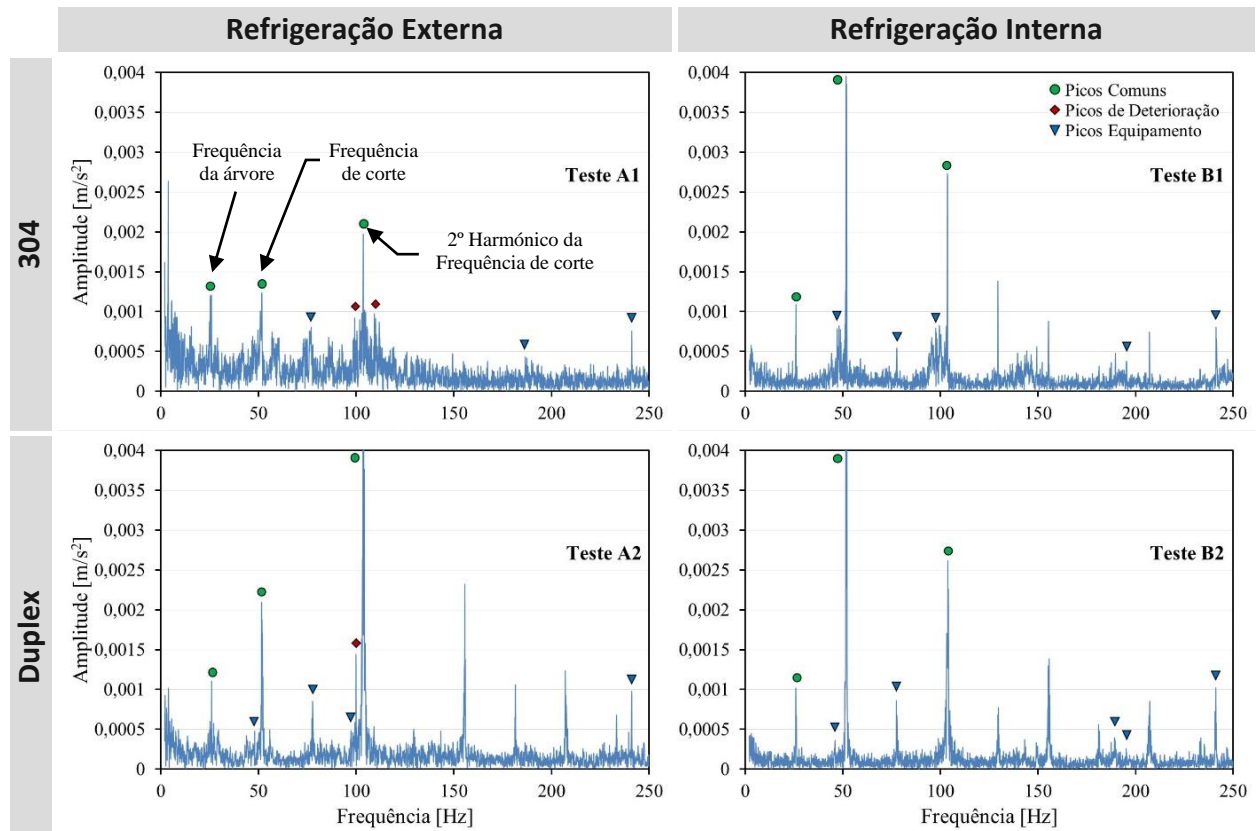


Figura 55. Vibração induzida nas brocas com 2 gumes de corte com diferentes níveis de deterioração: teste A1 (32° furo), teste B1 (60° furo), teste A2 (60° furo) e teste B2 (60° furo).

O teste A1 foi o único a manifestar indícios de que a aresta de corte da ferramenta sofreu alterações, como de facto é comprovado pelos gráficos da evolução da deterioração. Estas manifestaram-se na forma de bandas laterais junto ao 2º harmónico da frequência de engrenamento e na forma de ruído, mais perceptível na primeira metade do espectro. No teste A2 foi observado um pico ocasional ligeiramente acima dos 100 Hz para o último furo, no entanto não existe uma ligação direta com a deterioração. Os restantes testes não apresentaram alterações consideráveis ao longo do tempo, pois nestes casos a aresta de corte manteve-se praticamente inalterada. A amplitude dos picos registados demonstrou ser mais representativa dos parâmetros calculados pelas equações 4.1, 4.2 e 4.3 do que propriamente sensíveis à evolução da deterioração da ferramenta. No entanto, é de notar que a deterioração da ferramenta nos testes B1, A2 e B2 nunca atingiram níveis comprometedores, sendo por isso natural que as alterações registadas não sejam evidentes.

Na literatura é bastante realçado que a estabilidade adicional das brocas de 3 gumes é uma das principais vantagens deste tipo de ferramenta. De facto, nos resultados obtidos, foi observada uma redução para cerca de metade das amplitudes de vibração, como demonstrado na figura 56. É de salientar que os dados apresentados para as brocas de dois e três gumes se encontram em diferentes escalas de forma a ser possível identificar os picos de menor

amplitude. As frequências associadas ao processo de furação para as brocas de 3 gumes são as seguintes: $f_s = 26,53 \text{ Hz}$, $f_m = 79,60 \text{ Hz}$ e $f_{2h} = 159,20 \text{ Hz}$.

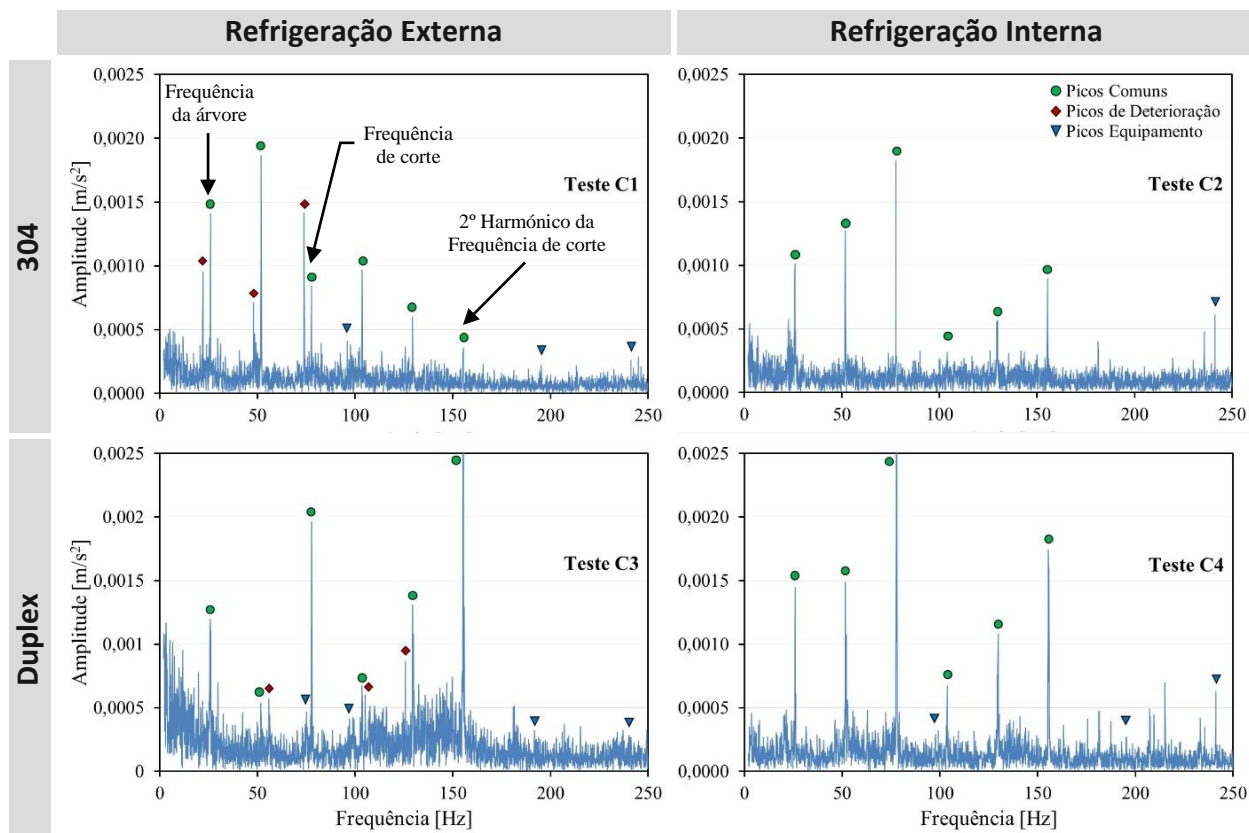


Figura 56. Vibração induzida nas brocas com 3 gumes de corte com diferentes níveis de deterioração: teste C1 (3º furo), teste C2 (60º furo), teste C3 (30º furo) e teste C4 (60º furo).

Os picos observados a aproximadamente 100 Hz e 130 Hz, são comuns a todos os testes e podem estar associados a movimentos de várias partes da máquina. Nos testes C2 e C4 os picos identificados são os mesmos, no entanto as suas amplitudes tendem a ser superiores para o teste C4. Nos testes C1 e C3 onde foram observados valores de deterioração significativos, surgiram bandas laterais junto dos picos. Devido ao efeito destes novos picos, as amplitudes tendem a mudar, pois outros fenômenos são acrescentados e registados simultaneamente. Além disso, diferentes fenômenos podem-se sobrepor, como mostrado no teste C1 para 100 Hz. No teste C3, juntamente com o aparecimento de bandas laterais, é visível um aumento da amplitude geral para todas as frequências de baixa amplitude, as quais poderão estar associadas a um ruído com potencial origem no fenómeno de deterioração. No caso da vibração registada para o furo número 60 do teste C2 e C4, nenhum pico identificado parece estar relacionado à deterioração da ferramenta, pois neste caso a ferramenta não apresenta deterioração apreciável.

Por outro lado, no caso do ensaio C1, além dos picos já mencionados (picos comuns), são observados novos picos, que são atribuídos à forte deterioração da ferramenta que ocorre no furo número 3 (lascamento não uniforme). O aumento da deterioração causa uma perturbação nos picos já existentes, resultando num aumento da amplitude das bandas laterais, que é proporcional ao dano (Sawalhi, 2016; Tan & Jiang, 2019). As bandas laterais tendem a aparecer

junto das frequências fundamentais e respetivos harmónicos. Um aumento considerável nestas frequências sugere que a geometria da broca está a sofrer alterações que põem em causa o seu desempenho. A deterioração da aresta principal de corte, na forma de lascamento, provoca um recuo da zona de contacto, passando a existir dois momentos distintos de contacto com a peça. Um contacto inicial da aresta, seguido da zona com falta de material. Este contacto desfasado provocou uma modificação na frequência com que o fenómeno de corte ocorre, dando origem às bandas laterais e adição de ruído ao longo de todo o espectro.

O gráfico em cascata para o teste C4 apresentado na figura 57, ilustra um caso peculiar apenas detetado para este teste. A partir do furo 28 foi observado um aumento das amplitudes e do ruído presente no sinal, sem estes estarem diretamente ligados com a deterioração que é praticamente impercetível para este teste. De facto, o gráfico demonstra que durante todos os furos realizados neste teste não surgem novos picos, apesar de ter sido registado um aumento da amplitude.

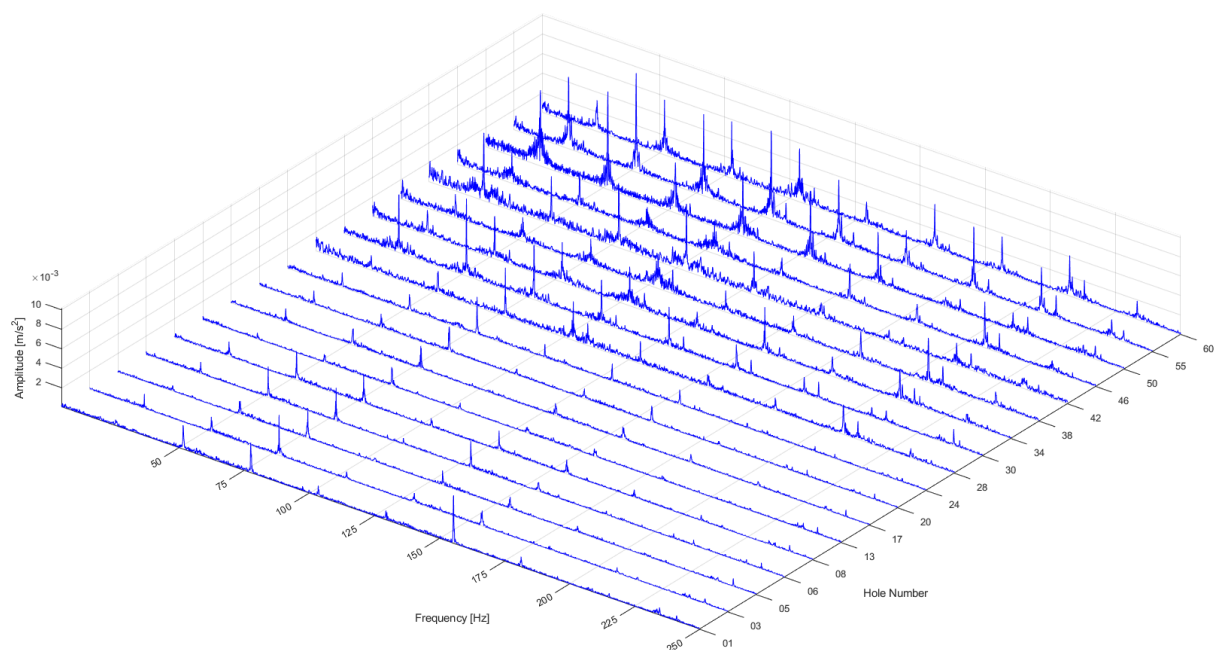


Figura 57. Gráfico em cascata da vibração induzida para os furos realizados no teste C4.

4.3.4 – Formação de aparas

O sucesso da operação de furação depende da capacidade para formar aparas que possam ser facilmente removidas do interior do furo. A formação de aparas longas é indesejada, devido à sua tendência para enrolar em torno da ferramenta dificultando a extração das aparas seguintes, podendo levar à sua aglomeração no interior dos furos. Durante o processo é pretendido que as aparas se possam partir em pedaços de menores dimensões, tornando a sua extração mais fácil. No entanto, a maioria dos materiais dúcteis, como os aços inoxidáveis austeníticos e duplex, usualmente não quebram durante a furação resultando em aparas longas (Sultana, et al., 2015).

O processo de formação das aparas foi semelhante para os vários testes. As primeiras aparas, formadas no exterior do furo, apresentaram um comprimento superior em relação as seguintes, que por serem formadas no interior dos furos foram obrigadas a quebrar ao exercer contacto com as paredes do furo e canal de extração. A compressão destas contra a parede do furo por períodos de tempo sucessivamente maiores, à medida que a profundidade aumentou, juntamente com o atrito gerado, deu origem a aparas cada vez mais curtas. Em geral, o aspeto das aparas manteve-se constante do início até ao fim, tendo as únicas alterações ocorrido no momento em que a degradação da aresta de corte atingiu valores consideráveis, dando origem a aparas semelhantes às da figura 58.



Figura 58. Formação de aparas irregulares na fase final de vida da broca, no furo 30 do teste C3.

Ocasionalmente surgiram alguns casos de aparas que facilmente se diferenciavam das restantes, apresentando uma geometria irregular e compactado. A sua origem deve-se essencialmente à formação de aparas aderentes, responsáveis por conceder uma forma arredondada à aresta de corte, a qual afeta a formação das aparas seguintes.

Os resultados para as brocas de 2 gumes são apresentados na figura 59. Nos testes com refrigeração interna foi observada uma maior tendência das aparas para se fragmentarem, uma vez que a passagem do fluido de corte a alta pressão pelo interior dos canais de extração ajuda a partir as aparas, ao mesmo tempo que diminui o atrito, graças as suas características lubrificantes. Nas imagens é visível o efeito de impulsionamento, pois devido ao efeito do fluido de corte, as espirais apresentam-se mais compactadas. Em geral, as aparas formadas pelas brocas de 2 gumes exibem uma forma helicoidal bem definida com alguns segmentos de

menores dimensões. Para as brocas de 2 gumes não foram observadas diferenças consideráveis entre materiais.

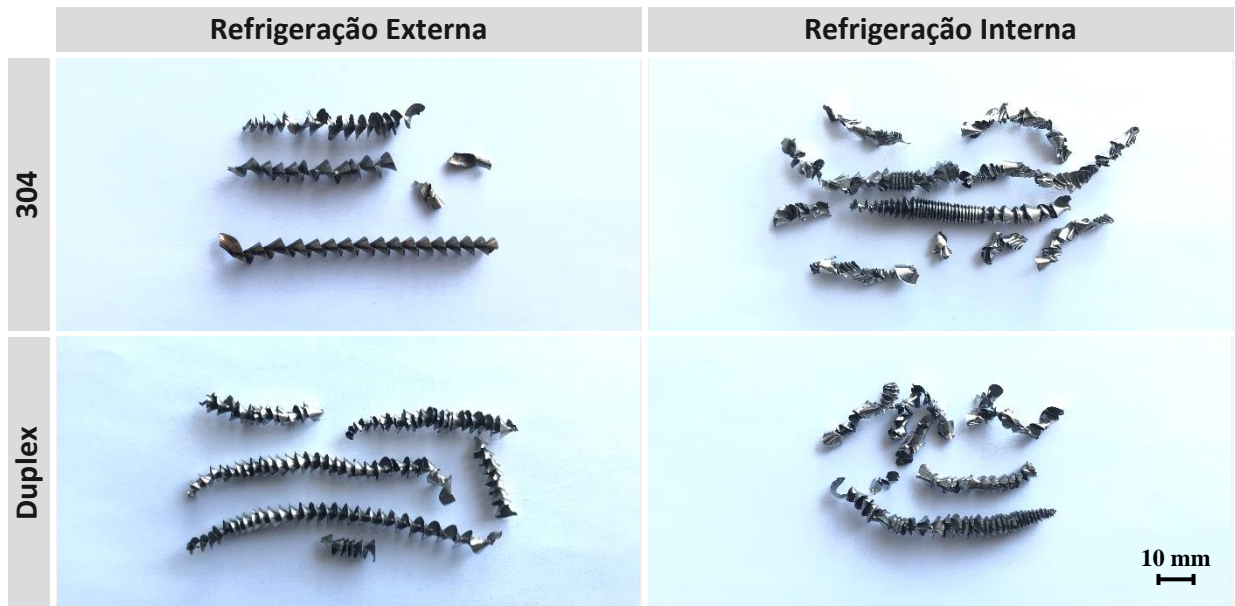


Figura 59. Forma típica das aparas com brocas de 2 gumes para os respectivos testes

Apesar dos parâmetros de corte serem os mesmos para as brocas de 2 e 3 gumes de corte, a morfologia das aparas é distinta. A adição de mais um gume de corte permite às brocas de 3 gumes criar aparas de menor espessura, uma vez que o avanço por gume é inferior. Estas aparas possuem dois terços da espessura das aparas formadas pelas brocas de 2 gumes, e por isso exibem um comportamento mais flexível, tornando-as mais suscetíveis para deformar sem partir, dando-lhes o aspeto ondulado presente na figura 60.

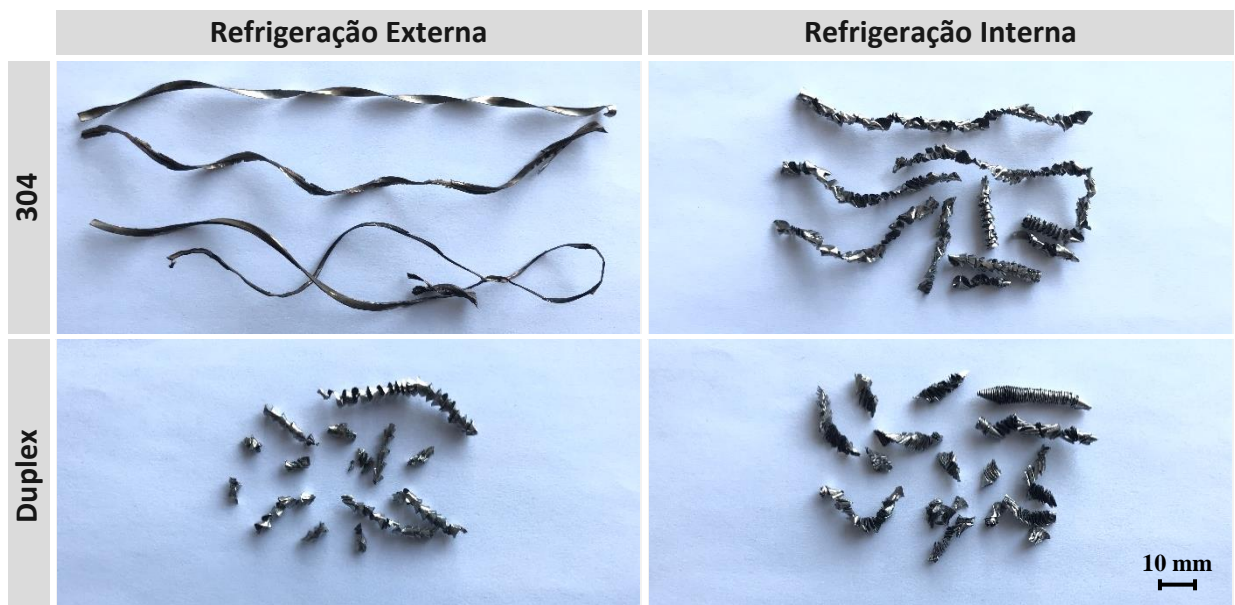


Figura 60. Forma típica das aparas com brocas de 3 gumes para os respectivos testes.

O teste C1 foi caracterizado por aparas longas e ligeiramente enroladas, devendo-se às modificações da aresta de corte logo nos primeiros furos, com perdas de material consideráveis que dificultaram a formação e evacuação das mesmas, é de relembrar que para este teste apenas foi possível efetuar três furos. A forma destas aparas é indesejável e deve ser evitada a todo o custo, face à dificuldade acrescida para as transportar pelos canais de extração e a sua tendência para enrolar em torno da ferramenta. Em casos excecionais, este tipo de apara pode provocar um bloqueio da ferramenta ao compactar no interior do furo, levando à rotura da broca.

Nos testes C2 e C4, onde foi usada refrigeração interna, as aparas ficaram com um aspeto mais compactado, em consequência do comprimento das aparas em conjunto com as forças exercidas pelo fluido de corte que agravaram o efeito de ondulação devido à maior flexibilidade para curvarem sem partir.

Face à maior dureza do aço inoxidável duplex, foi observada uma maior tendência das aparas para partir, tanto na refrigeração via externa como interna, diminuindo o risco de entupimentos graças ao escoamento superior.

Para ambos os tipos de brocas, nos quatro testes onde foi utilizada refrigeração externa, foram identificados segmentos com uma coloração amarelada, indiciando um défice de fluido na zona de corte, o que permite às aparas atingir temperaturas superiores. Aproximadamente 98% da energia consumida no processo de furação é convertida em calor, que se traduz em elevadas temperaturas na interface da ferramenta com as aparas. Habitualmente, 80% do calor produzido é dissipado através das aparas, permitindo reduzir a temperatura da peça e ferramenta responsáveis por absorver cerca de 10% do calor, cada uma (Sandvik Coromant, 1994). Na realidade, se não fosse a energia libertada através das aparas e do fluido de corte, seria observado um desgaste muito superior da ferramenta em relação ao encontrado.

Ocasionalmente foi observada a formação de aparas longas para os vários testes, com possível origem na formação de apara aderente. Em consequência do comprimento, este tipo de aparas enrolou-se em volta da ferramenta, obrigando à sua remoção para evitar entupimentos nos ciclos de furação seguintes, como é mostrado na Figura 61.



Figura 61. Enrolamento de aparas à volta da ferramenta.

Após análise dos resultados é possível afirmar que as mudanças no formato das aparas são principalmente afetadas pela geometria da ferramenta. A adição de mais um gume de corte e a inclinação dos canais de extração alteraram a forma das aparas helicoidais, as quais são bem definidas nas brocas de 2 gumes, para um aspeto ondulado com segmentos menores para as brocas de 3 gumes. A utilização de refrigeração via interna tornou as aparas mais fragmentadas e compactadas para ambas as geometrias. O tipo de material apenas apresentou diferença para as brocas de 3 gumes ao tornar as aparas ligeiramente mais curtas.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS

5.1 – Síntese do trabalho e conclusões gerais

O estudo apresentado foi realizado com o intuito de avaliar o desempenho das brocas de três gumes comparativamente às de dois gumes, ao mesmo tempo que foram analisadas as diferentes exigências impostas pela maquinagem dos aços inoxidáveis AISI 304 e duplex, conhecidos pela sua pobre maquinabilidade. Adicionalmente, foi avaliada a importância do fluido de corte para estes materiais, referido na literatura como imprescindível. O desempenho das ferramentas foi avaliado pela observação do desgaste da ferramenta, rugosidade superficial, variações no tamanho dos furos, análise de vibração e formação de apra.

A deterioração da broca é um processo progressivo que ocorre ao longo das arestas de corte devido às elevadas pressões desenvolvidas na zona de contacto com a peça que geram temperaturas elevadas. A respeito da vida útil da ferramenta, foi possível concluir que o fator mais importante para aumentar o número de furos realizados é a utilização de refrigeração interna de alta pressão, uma vez que é o sistema mais eficiente para reduzir a temperatura e o atrito. Quando utilizada refrigeração via externa, o aço inoxidável AISI 304 teve uma prestação inferior ao do aço inoxidável duplex, relativamente à sua maquinabilidade, devido à maior suscetibilidade à formação de apra aderente e encruamento. Os principais tipos de deterioração observados são o lascamento não uniforme para refrigeração externa e desgaste uniforme de flanco para refrigeração interna. Para condições semelhantes (material e refrigeração), as brocas de três gumes apresentaram piores resultados no que diz respeito ao desgaste da ferramenta, sendo este resultado causado pela sua geometria mais compactada, a qual obriga a geometria da ferramenta a ter os furos para o fluido de refrigeração posicionados de forma mais próxima da aresta principal de corte, criando um ponto frágil pelo qual a ferramenta acaba por colapsar.

Independentemente do tipo de refrigeração, a rugosidade superficial é sempre menor para o aço inoxidável duplex do que para o AISI 304, mostrando que a rugosidade da superfície está mais relacionada com o material utilizado. Contudo, também foi observada uma melhoria significativa dos resultados quando utilizada refrigeração interna.

Os resultados demonstraram que uma aresta sem capacidade de corte e alterada geometricamente tem influência direta na tolerância dos furos. Isto é evidenciado pelo fato de que nos testes onde o valor da deterioração escalou rapidamente os furos tendem a ficar mais ovalizados e o valor do diâmetro à medida que aumenta o número de furos tende a ser mais inconsistente. Uma vez que o nível de deterioração está diretamente ligado ao tipo de refrigeração implementado, foram observados melhores resultados quando utilizada refrigeração interna. Relativamente à comparação da tolerância dos furos para os diferentes materiais, os resultados foram mais consistentes para o aço inoxidável AISI 304. Contudo, em oposição, os valores da linearidade foram melhores para o aço inoxidável duplex. Apesar dos fatores anteriormente analisados, a principal influência na tolerância e linearidade dos furos está relacionada com a

geometria das ferramentas, com as brocas de três gumes a produzir furos menos ovalizados, por um fator de 2,4 vezes, graças às suas características autocentrantes que permitem a redução dos movimentos laterais.

A análise de vibrações através da transformada de Fourier demonstrou ser uma ferramenta eficaz para detetar as frequências associadas ao processo de corte. Nos resultados obtidos não foi possível detetar por intermédio do registo da vibração o desgaste uniforme observado nos estágios iniciais das curvas de vida. No entanto, quando a deterioração transitou para lascamento não uniforme, foi possível relacionar com o espectro de vibração o aparecimento deste efeito ao longo da aresta de corte. Para os testes onde ocorreu perda de material foi observado o aparecimento de bandas laterais no espectro de vibração, junto dos picos com frequências associadas ao processo de corte e respetivos harmónicos. Em conjunto com o fenómeno descrito, também foi identificado um aumento da amplitude de todas as frequências ao longo do espectro, correspondendo este efeito ao ruído, sugerindo que a eficiência do processo de furação foi afetada de forma negativa. Como esperado, foi observada uma redução na amplitude das vibrações para cerca de metade, quando utilizadas brocas de três gumes, indo de encontro às afirmações encontradas na literatura sobre a redução da tendência para oscilar, que também se comprovaram para as circunstâncias e materiais ensaiados.

Face à ductilidade dos aços inoxidáveis, em geral foram obtidas aparas longas de forma helicoidal para os vários testes. Nas brocas de 3 gumes a adição de mais um gume de corte para os mesmos parâmetros de furação, resultou em aparas de menor espessura e conseqüentemente com maior tendência a sofrer compactação por deformação. A utilização de refrigeração interna melhorou o escoamento das aparas, ao impulsioná-las ao longo dos canais de extração e ao ajudar na sua fragmentação. Para estes testes, também foi observada uma maior compactação das aparas devido às forças exercidas pelo fluido de corte. Na perspetiva dos materiais, as aparas de aço inoxidável duplex fragmentaram com maior facilidade, graças à sua maior dureza.

Com a realização do trabalho, foi comprovado que as brocas de 3 gumes apresentam resultados superiores face às brocas de 2 gumes a nível da rugosidade e tolerância dimensional dos furos. Estes resultados são alcançados graças à sua capacidade superior para manter a trajetória, permitindo obter vibrações substancialmente menores. Porém, as brocas de 3 gumes demonstraram ser mais frágeis e mais sensíveis aos parâmetros de corte, sendo o seu uso recomendado para situações em que a qualidade dos furos é mais importante que a produtividade. Além disso, verificou-se que a refrigeração interna a alta pressão tem um grande impacto nos resultados alcançados ao permitir uma redução das temperaturas de corte (também visível na cor das aparas) de forma mais eficaz, em conjunto com uma redução do atrito que permite estender a vida útil da ferramenta por um período de tempo considerável face aos outros tipos de refrigeração. Ao contrário do que seria de esperar, a furação do aço inoxidável AISI 304 demonstrou ser a mais difícil quando utilizada refrigeração via externa, contudo esta análise apenas pode ser retirada para a duração de 60 furos. Para ensaios de maior duração, é possível que os papéis invertam, com o aço inoxidável duplex a apresentar piores resultados devido às suas propriedades mecânicas superiores. Considerando, que as brocas de 3 gumes se encontram em desenvolvimento no momento em que este trabalho foi desenvolvido, podem ser realizadas algumas alterações na sua geometria para melhorar a sua vida útil. Isto diz respeito a

modificações tais como, a localização dos canais de refrigeração, ângulo de hélice e de ponta, geometria das arestas principais e secundárias de corte, geometria da aresta transversal (geometria de ponta especial) e revestimentos.

5.2 – Desenvolvimentos futuros

Relativamente a trabalhos futuros que se consideram pertinentes desenvolver no seguimento deste trabalho, indicam-se os seguintes:

- Implementação do método de Taguchi no estudo de diferentes variáveis;
- Comparação entre brocas de 2 e 3 gumes através da medição de forças;
- Estudar a formação e dissipação de calor para os diferentes tipos de refrigeração;
- Implementar a estratégia de furação por incrementos ou furo passante;
- Estender o estudo a outras ligas metálicas exigentes como o titânio;
- Análise de vibrações em velocidade, de modo a estudar as baixas frequências;
- Otimizar os parâmetros de corte para as brocas de 3 gumes;
- Encontrar os melhores parâmetros de corte para cada geometria e realizar um estudo de rentabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AAVOS, 2014. *Fourier transform*. [Online]
Available at: <https://aavos.eu/glossary/fourier-transform/>
[Acedido em Novembro 2020].
- Agapiou, J., 1993. Design Characteristics of New Types of Drill and Evaluation of Their Performance Drilling Cast Iron - II. Drills with Three Major Cutting Edges. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 33(3), pp. 343-365.
- Batzer, S. et al., 1998. Chip Morphology and Hole Surface Texture in the Drilling of Cast Aluminum Alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 79, pp. 72-78.
- Bertelli, R., Cristel, R., Melotti, G. & Ceccon, T., 2005. Stainless Steels Machinability Assessment Model. *Advanced Manufacturing Systems and Technology*, Volume 486, pp. 577-588.
- Britannica, 2021. *Britannica*. [Online]
Available at: <https://www.britannica.com/technology/stainless-steel>
[Acedido em Fevereiro 2021].
- Burnett, C., 2014. *ThermoFisher Scientific*. [Online]
Available at: <https://www.thermofisher.com/blog/metals/what-is-stainless-steel-part-i/>
[Acedido em Fevereiro 2021].
- Carbó, H., *Aços Inoxidáveis: Aplicações e Especificações*. Brasil: ArcelorMittal. 2008.
- Carvalho, J., 2019. *Abinox*. [Online]
Available at: <https://www.abinox.org.br/site/capacitacao-aprenda-com-especialista-detahes.php?cod=396&codSerie=395>
[Acedido em 2021].
- Çaydaş, U., Haşçalık, A., Buytoz, Ö. & Meyveci, A., 2011. Performance Evaluation of Different Twist Drills in Dry Drilling of AISI 304 Austenitic Stainless Steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 26(8), pp. 951-960.
- Cerna, M. & Harvey, A., *The Fundamentals of FFT-Based Signal Analysis*. s.l.:National Instruments. 2000.
- Dewesoft, *FFT Spectral Analysis*. s.l.:Dewesoft d.o.o.. 2020.
- Diniz, A., Marcondes, F. & Coppini, N., *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. 9º ed. São Paulo: Artliber. 2014.
- Dolinsek, S., 2003. Work-Hardening in the Drilling of Austenitic Stainless Steels. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 133, pp. 63-70.

- El-Wardany, T., Gao, D. & Elbestawi, M., 1996. Tool Condition Monitoring in Drilling Using Vibration Signature Analysis. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 36(6), pp. 687-711.
- Ema, S., Fujii, H. & Marui, E., 1991. Cutting Performance of Drills with Three Cutting Edges (Effects of Chisel Edge Shapes on the Cutting Performance). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 31(3), pp. 361-369.
- Ema, S., Fujii, H., Marui, E. & Kato, S., 1988. New Type Drill with Three Major Cutting Edges. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 28(4), pp. 461-473.
- Gandarias, A., Lacalle, L., Aizpitarte, X. & Lamikiz, A., 2008. Study of the Performance of the Turning and Drilling of Austenitic Stainless Steels Using Two Coolant Techniques. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 3(1/2), pp. 1-17.
- Gomes, U., 2013. *Análise da Maquinabilidade do Aço Inoxidável AISI 316*, Aveiro: Universidade de Aveiro.
- Groover, M. P., *Fundamentals of Modern Manufacturing..* 4º ed. Estados Unidos da América: John Wiley & Sons, Inc.. 2010.
- Gwinnett, A. & Gorelick, L., 1998. A Brief History of Drills and Drilling. *BEADS: Journal of the Society of Bead Researchers*, 10(8), pp. 49-56.
- Haas, 2018. *Aspetos básicos da seleção de perfuração - Haas University*. [Online] Available at: <https://www.haascnc.com/pt/video.html> [Acedido em Dezembro 2020].
- Haas, 2020. *Haas Automation Inc..* [Online] Available at: <https://www.haascnc.com/machines/vertical-mills/universal-machine/models/umc-750ss.html> [Acedido em Setembro 2020].
- Hendley, N., 2017. *Reducing Runout in Drilling Operations*. [Online] Available at: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/article/cuttingtools/reducing-runout-in-drilling-operations> [Acedido em Maio 2021].
- IMO, *Practical Guidelines for Fabrication of Duplex Stainless Steels*. 3º ed. London: Internacional Molybdenum Association (IMO). 2014.
- Infomet, 2020. *Infomet*. [Online] Available at: <https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=208> [Acedido em Fevereiro 2021].
- ISO 10816-3, *Mechanical Vibration — Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts — Part 3: Industrial Machines With Nominal Power Above 15 kW*

- and Nominal Speeds Between 120 r/min and 15 000 r/min When Measured in Situ*. 2 ed. s.l.:International Organization for Standardization. 2009.
- ISO 4288, *Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface Texture: Profile Method — Rules and Procedures for the Assessment of Surface Texture*. 2 ed. s.l.:International Organization for Standardization. 1996.
- ISO 5419, *Twist Drills — Terms, Definitions and Types*. 1 ed. s.l.:International Organization for Standardization. 1982.
- ISO 8688-1, *Tool Life Testing in Milling — Part 1: Face Milling*. 1 ed. s.l.:International Organization for Standardization. 1989.
- ISSF, 2020. *International Stainless Steel Forum*. [Online]
Available at: <https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/TheStainlessSteelFamily.pdf>
[Acedido em 2021].
- Jantunen, E., 2002. A Summary of Methods Applied to Tool Condition Monitoring in Drilling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Volume 42, pp. 997-1010.
- Jantunen, E., 2002. A Summary of Methods Applied to Tool Condition Monitoring in Drilling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42(9), pp. 997-1010.
- Jindal, A., 2012. Analysis of Tool Wear Rate in Drilling Operation using Scanning Electron Microscope (SEM). *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 11(1), pp. 43-54.
- Kulkarni, A., Joshi, G. & Sargade, V., 2013. Design Optimization of Cutting Parameters for Turning of AISI 304 Austenitic. *Indian Journal of Engineering & Material Science*, Volume 20, pp. 252-258.
- Manufacturing News, 2019. *Three-Flute Drills*. [Online]
Available at: <https://www.mfgnewsweb.com/archives/4/54219/Drilling-Tapping-Threading-apr19/Three-Flute-Drills.aspx>
[Acedido em Abril 2021].
- McGinty, B., 2012. *Continuum Mechanics*. [Online]
Available at: <http://www.continuummechanics.org/fourierxforms.html>
[Acedido em Novembro 2020].
- Mitsubishi Materials, 2020. *Drill Terminology and Cutting Characteristics*. [Online]
Available at:
http://www.mitsubishicarbide.com/en/technical_information/tec_rotating_tools/drills/tec_drills_technical_top/tec_drilling_terminology
[Acedido em Agosto 2020].
- Nakandhrakumar, R., Dinakaran, D., Gopal, M. & Pattabiraman, J., 2016. A Novel Normalisation Procedure for the Sensor Positioning Problem in Vibration Monitoring of

Drilling Using Artificial Neural Networks. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 58(10), pp. 556-563.

Nijen, G. et al., *Noise and Vibration in Bearing Systems*. 1º ed. s.l.:SKF Group. 2016.

Nomani, J., Pramanik, A., Hilditch, T. & Littlefair, G., 2013. Machinability Study of First Generation Duplex (2205), Second Generation Duplex (2507) and Austenite Stainless Steel During Drilling Process. *Wear*, Volume 304, pp. 20-28.

Nomani, J., Pramanik, A., Hilditch, T. & Littlefair, G., 2015. Chip Formation Mechanism and Machinability of Wrought Duplex Stainless Steel Alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 80, pp. 1127-1135.

Orłowska, J., 2015. How Did They Drill That? – A Few Observations on the Possible Methods for Making Large-sized Holes in Antler. *EXARC Journal*, Issue 2.

OSG, 2021. *3-Flute Carbide Drill with Oil Hole*. [Online]
Available at: <https://www.osg.co.jp/en/products/drill/spec/ado-trs.html>
[Acedido em Maio 2021].

Palbit, 2021. *Drilling*. [Online]
Available at: <https://www.palbit.pt/uploads/Downloads%20Cat%C3%A1logos/B%20-%20Drilling.pdf>
[Acedido em Maio 2021].

Paro, J., Hänninen, H. & Kauppinen, V., 2001. Tool Wear and Machinability of HIPed P/M and Conventional Cast Duplex Stainless Steels. *Wear*, Volume 249, pp. 279-284.

PCB Piezotronics, *General Operating Guide for Use with Piezoelectric ICP® Accelerometers*. 2º ed. New York: PCB Group. 2002.

Pérez, E. T., 2015. *Study of Vibration Severity Assessment for Machine Tool Spindles within Condition Monitoring*, Suécia: KTH Royal Institute of Technology.

Pessoa, R., 2008. *Estudo da Resistência à Corrosão em Juntas Soldadas de Aço Inoxidável Ferrítico UNS S43932*, Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Pivkin, P., Ershov, A. & Nadykto, A., 2020. Mathematical Modelling of the Cutting Edge of a Tri-Flute Drill. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, pp. 1-5.

Ribeiro, V. M. d. C., 2019. *Determinação dos Parâmetros Ótimos na Operação de Acabamento Superficial do Alumínio EN AW-6082*, Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Roberson, 2017. *The 3 Things You Need to Know about Stainless Steel Machining*. [Online]
Available at: <https://robersontool.com/the-3-things-you-need-to-know-about-stainless-steel-machining/>
[Acedido em Abril 2021].

- Ruko, 2018. *8 Features of a Twist Drill and its Functions*. [Online]
Available at: <https://ruko.de/en/blog/eight-characteristics-of-a-twist-drill>
[Acedido em Agosto 2020].
- Saeid, T., Abdollah-zadeh, A., Assadi, H. & Ghaini, F., 2008. Effect of Friction Stir Welding Speed on the Microstructure and Mechanical Properties of a Duplex Stainless Steel. *Materials Science and Engineering A*, Volume 496, pp. 262-268.
- Sandvik Coromant, *Modern Metal Cutting: A Practical Handbook Hardcover*. 1º ed. Sweden: Sandvik Coromant. 1994.
- Sandvik, 2013. *How to get the best machining results*. [Online]
Available at: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/pages/how-to-use-solid-carbide-drills.aspx?termstoreid=0593d5c1-ee4d-4d1b-a5dd-7abe8cc879e4&termsetid=c8a89a87-0395-4f7d-922a-ce4284a15300&termid=4f13d21d-116d-4fca-877c-1273f00747a4&newsarchiveyearfilter=20>
[Acedido em Maio 2021].
- Sandvik, 2015. *Drilling formulas and definitions*. [Online]
Available at: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/drilling.aspx>
[Acedido em Maio 2021].
- Sandvik, 2015. *Drilling wear and troubleshooting*. [Online]
Available at: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/drilling/pages/drilling-wear-and-troubleshooting.aspx>
[Acedido em Junho 2020].
- Sandvik, 2018. *Tips film #41 - Analyze tool wear in solid carbide drilling*. [Online]
Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=3jqyOrqvyCA>
[Acedido em Agosto 2020].
- Sawalhi, N., 2016. Vibration Sideband Modulations and Harmonics Separation of a Planetary Helicopter Gearbox with Two Different Configurations. *Hindawi Publishing Corporation*, 10 Novembro, Volume 2016, p. 9.
- Silva, F., Pereira, J., Ferreira, C. & Silva, M., 2007. *Análise do Torneamento do Aço Inoxidável ABNT 304 Através da Temperatura do Cavaco*, Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia.
- Simon, G. D. & Deivanathan, R., 2019. Early Detection of Drilling Tool Wear by Vibration Data Acquisition and Classification. *Manufacturing Letters*, Volume 21, pp. 60-65.
- Soares, R., 2016. *Estudos de Maquinabilidade da Liga AlSi9Cu3 Recorrendo a Ferramentas PCD com Quebra-Aparas*, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Souza, A., 2011. *Processos de Fabricação por Usinagem Parte 1*, Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- SSINA, 2019. *Alloying Elements: Stainless Steel Overview*, USA: Specialty Steel Industry of North America.
- StimZet, 2021. *Drill Glossary*. [Online]
Available at: https://www.stimzet.cz/endata/tech_drill_gb.html
[Acedido em 22 Abril 2021].
- Sultana, A. Z., Sharif, S. & Kurniawanb, D., 2015. Chip Formation When Drilling AISI 316L Stainless Steel Using Carbide Twist Drill. *Procedia Manufacturing*, Volume 2, pp. 224-229.
- Tan, L. & Jiang, J., *Discrete Fourier Transform and Signal Spectrum. Digital Signal Processing*. s.l.:s.n. 2019.
- Wang, C. et al., 2015. Wear and Breakage of TiAlN- and TiSiN-Coated Carbide Tools During High-Speed Milling of Hardened Steel. *Wear*, Volume 336-337, pp. 29-42.