

Universidade de Évora – Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Mecatrónica

Relatório de Estágio

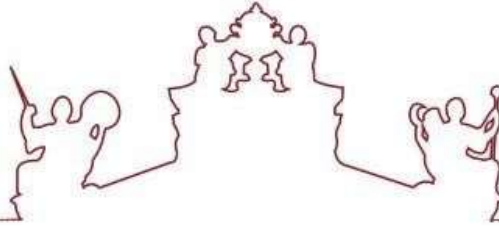
**Aumento da Vida útil de Ferramentas de Corte com
minimização dos custos de não qualidade**

Duarte Manuel Vidazinha Guerreiro

Orientador(es) | João Manuel Figueiredo
José Miguel Candeias Mareco

Évora 2022





Universidade de Évora – Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Mecatrónica

Relatório de Estágio

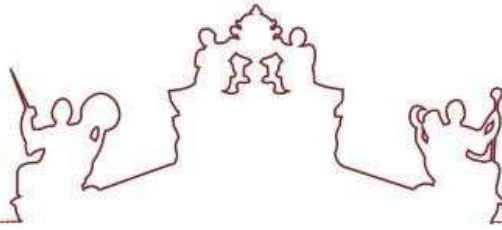
**Aumento da Vida útil de Ferramentas de Corte com
minimização dos custos de não qualidade**

Duarte Manuel Vidazinha Guerreiro

Orientador(es) | João Manuel Figueiredo
José Miguel Candeias Mareco

Évora 2022





O relatório de estágio foi objeto de apreciação e discussão pública pelo seguinte júri nomeado pelo Diretor da Escola de Ciências e Tecnologia:

Presidente | Fernando Manuel Janeiro (Universidade de Évora)

Vogais | Frederico José Lapa Grilo (Instituto Politécnico de Setúbal) (Arguente)
João Manuel Figueiredo (Universidade de Évora) (Orientador)

Agradecimentos

O presente relatório de estágio, finda o meu percurso académico no mestrado em engenharia mecatrónica. Tendo sido marcado inicialmente pelos motivos pandémicos conhecidos, mas também pela oportunidade de realizar o estudo numa grande empresa de aeronáutica. Deste modo, gostaria de expressar a minha sincera gratidão a todos os que fizeram parte deste percurso.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor João Figueiredo por toda a disponibilidade e apoio dado na realização do relatório de estágio. Agradecer também aos professores Carlos Braumman, Russell Alpízar e Gonçalo Jacinto pela disponibilidade na procura de um modelo estatístico que se enquadrasse no problema em estudo.

De sublinhar todo o apoio e disponibilidade prestada pelo meu orientador externo, Engenheiro José Mareco, sendo ele o representante da empresa, estando sempre disponível para ajudar.

Um especial obrigado à minha namorada, por ter sido um verdadeiro pilar em todos os momentos.

Por fim, gostaria de agradecer aos meus pais, irmão e avós, pois foram eles os grandes impulsionadores do meu percurso académico. Quero agradecer também todos os valores transmitidos, sem eles não seria possível chegar aqui.

Aumento da Vida útil de Ferramentas de Corte com minimização dos custos de não qualidade

Tendo em vista a importância da cooperação entre as Universidades e o tecido empresarial, este projeto de relatório de estágio, enquadra-se num estudo em parceria com a empresa de aeronáutica - Embraer.

Resumo

A empresa, na sua fase inicial de implementação em Évora (2012), desenvolveu e qualificou processos de furação em material composto e metal para robôs automáticos, que funcionam em linhas de montagem de vários componentes fabricados e montados pela mesma nas suas instalações. Estes processos de furação foram criados de forma a maximizar a vida útil das ferramentas de corte (nº total de milímetros de material perfurado). Posteriormente à qualificação destes processos na Embraer, uma série de inovações tecnológicas surgiram na indústria das ferramentas de corte, fazendo com que estas tenham uma vida útil maior. No entanto, internamente, o processo de descarte de ferramentas não foi alterado, levando a que muitas ferramentas, ainda em perfeitas condições de funcionamento acabassem por ser descartadas, gerando um elevado desperdício. Como tal, foi necessário recorrer a um estudo que vise aumentar a vida útil das ferramentas de corte sem gerar custos de não qualidade. Para a sua realização, efetuou-se uma análise estatística baseada nos valores fornecidos pelo Robot. Com base na análise desses dados, tentou-se perceber se existe algum parâmetro que nos indique ou alerte para o fim de vida das ferramentas de corte.

Palavras-Chave: Robótica, Indústria, Automação, Ferramentas de Corte, Custos de Não-Qualidade.

A informação contida neste documento é propriedade da Aernnova e do seu autor, não podendo ser usada, copiada ou reproduzida sem a autorização do mesmo.

Improved lifetime of cutting machines by minimizing the non-quality cost

Abstract

The company, during the early implementation phase in Évora (2012), developed and qualified drilling processes in composite and metal material for automatic robots that work out on assembly lines of several components manufactured and assembly in the company's own facilities. These drilling processes were designed in order to maximize longer cutting tools' life (total number of millimeters of drilled material). Right after to the qualification of these processes in Embraer, a series of innovative features came out in the cutting tools industry, making possible for them a longer operating life. However, internally, the process of disposing tools hasn't been changed, which makes that many of them, still in good conditions, end up discarded, resulting in a huge waste. Therefore, it turned out of most importance research, whose aim is to extend cutting tools' life without generating costs of non-quality. To accomplish this goal, a statistical analysis, based on the data provided by the robot, was carried out. Based on the analysis of these data, one tried to figure out if there is any parameter that may show or alert us for the cutting tools' end of life.

Keywords: Robotics, Industry, Automation, Cutting tools, Non-Quality Costs

The information contained in this document is property of Aernnova and its authors and can not be used, copied, or reproduced without a written Authorization.

Índice geral

Agradecimentos	5
Resumo	6
Abstract.....	7
Índice de Tabelas.....	9
Índice de Figuras	10
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	11
Lista de Símbolos.....	11
1. Introdução.....	13
1.1 Materiais compósitos.....	15
1.2 Reforço	18
1.3 Matriz.....	18
1.4 Processo de furação.....	19
1.5 Furação em material compósito.....	21
1.6 Furação de material compósito-metal.....	26
1.7 Geometria da ferramenta de corte.....	27
1.8 Alargadores de Alta precisão	31
1.9 Influência dos parâmetros de corte no processo de furação.....	32
1.9.1 Thrust Force.....	33
1.10 Vida das ferramentas de corte	34
1.11 Furação com sistemas robóticos.....	36
1.11.1 Probe.....	40
2. Enquadramento do problema	41
3. Análise de resultados.....	42
3.1 UAB130-05-CF	42
3.2 HST315-06-KL	49
3.3 UAB130-06.....	54
3.4 HST13-10	60
4. Dificuldades Encontradas.....	66
4.1 Machine Learning	66
4.2 Equações Diferenciais Estocásticas.....	67
5. Trabalhos Futuros.....	67
6. Conclusões.....	68



Índice de Tabelas

Tabela 1. Parâmetros de furação 21
Tabela 2. Influências da geometria da ferramenta de corte no processo de furação 31

Índice de Figuras

Figura 1. Utilização de material composto numa aeronave de passageiros.....	16
Figura 2. Sobreposição de lâminas.....	17
Figura 3. Movimento da ferramenta durante a furação [12].....	20
Figura 4. Furo delaminado [13]	22
Figura 5. Delaminação à entrada (a) e à saída do furo (b) (DeFu Liu et al. 2012)	23
Figura 6. Orientação das fibras relativamente á direção de corte.....	24
Figura 7. Thrust force e torque na furação de carbono/alumínio. Diâmetro $d = 8\text{mm}$, Velocidade de corte $N = 1050$ e avanço de $f=0.10\text{ mm/rot}$ [26].....	27
Figura 8. Geometria da ferramenta de corte.	28
Figura 9. Características da ferramenta de corte	30
Figura 10. Variáveis de corte (a) e decomposição de forças (b).....	32
Figura 11. Curva-padrão da vida da ferramenta [18].....	35
Figura 12. Força axial em função do nº de furos realizados	36
Figura 13. Componentes de um sistema robótico	38
Figura 14. Sistema robótico Eletroimpact	39
Figura 15. Estabilizador horizontal – Praetor 550 - EMBRAER	39
Figura 16. Probe – Ogiva de medição.....	40
Figura 17. Características da ferramenta UAB130-05-CF	42
Figura 18. Valor médio de Thrust máximo em função do número de furos.	43
Figura 19. Desvio-Padrão em função do número de furos	44
Figura 20. Variância em função do número de furos.....	45
Figura 21. Histograma de valores de Thrust máximo.....	46
Figura 22. Diâmetro dos vários furos no primeiro bloco de material.	46
Figura 23. Diâmetro dos vários furos no segundo bloco de material.	47
Figura 24. Desvio-padrão referente aos diâmetros de furos no primeiro bloco de material	48
Figura 25. Desvio-padrão referente aos diâmetros de furos no segundo bloco de material	48
Figura 26. Geometria da ferramenta HST315-06-KL	49
Figura 27. Ciclos de vida de várias ferramentas, variação do Thrust ao longo do tempo.....	50
Figura 28. Representação média de um ciclo de vida da ferramenta HST315-06-KL	50
Figura 29. Desvio-Padrão em função do número de furos.	51
Figura 30. Variância em função do número de furos.....	52
Figura 31. Histograma de valores de Thrust máximo.....	52
Figura 32. Diâmetro dos vários furos no primeiro bloco de material.	53
Figura 33. Diâmetro dos vários furos no segundo bloco de material.	54
Figura 34. Ciclos de vida de várias ferramentas, variação do Thrust ao longo do tempo.....	55
Figura 35. Ciclos de vida de várias ferramentas, variação do Thrust ao longo do tempo.....	55
Figura 36. Diâmetro dos vários furos no primeiro bloco de material.	56
Figura 37. Diâmetro dos vários furos no segundo bloco de material.	56
Figura 38. Diâmetro dos vários furos no primeiro bloco de material.	57
Figura 39. Diâmetro dos vários furos no segundo bloco de material.	58
Figura 40. Ciclos de vida de várias ferramentas, variação do Thrust ao longo do tempo.....	58
Figura 41. Valores de diâmetros dos furos das várias brocas utilizadas.	59
Figura 42. Geometria da ferramenta HST13-10	60

Figura 43. Ciclos de vida de várias ferramentas, variação do Thrust ao longo do tempo.....	61
Figura 44. Representação média de um ciclo de vida da ferramenta HST13-10	61
Figura 45. Histograma de valores de Thrust máximo.....	62
Figura 46. Desvio-Padrão em função do número de furos.	63
Figura 47. Variância em função do número de furos.....	63
Figura 48. Diâmetro dos vários furos no primeiro bloco de material.	64
Figura 49. Diâmetro dos vários furos no segundo bloco de material.	64
Figura 50. Representação média de diâmetros durante um ciclo de vida no primeiro bloco de material	65
Figura 51. Representação média de diâmetros durante um ciclo de vida no segundo bloco de material	65

Lista de Abreviaturas e Siglas

CFRP - *Carbon Fiber Reinforced Polymers.*

GFRP - *Glass Fiber Reinforced Polymers.*

ANOVA – *Analysis of Variance.*

DOE – *Design of Experiments.*

ISO - *International Organization for Standardization.*

PLC – *Programmable Logic Controllers.*

Lista de Símbolos

P_c – Propriedades de interesse a determinar do compósito.

P_r – Propriedades de interesse do reforço.

P_m – Propriedades de interesse da matriz.

V_m – Fração volumétrica do reforço.

V_r – Fração volumétrica da matriz.

N – Newton; unidade de força do Sistema Internacional de Unidades.

V_c - Velocidade de corte.

n – Velocidade do fuso.

V_f - Taxa de Penetração.

f_n - Avanço por rotação.



Q - Taxa de remoção de material.

P_c - Potência Líquida.

T - Torque.

F_f - Força de avanço.

F_d - Fator de delaminação.

D_d - Diâmetro da zona delaminada.

D_f - Diâmetro do furo.

F_c - Força axial Crítica.

E - Módulo de Young (GPa).

ν - Coeficiente de Poisson.

h - Espessura não cortada.

G_{IC} - Tenacidade à fratura em Modo I do material ($\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{mm}}$).

k - Rácio de elipsidade.

a - Eixo maior da elipse.

b - Eixo menor da elipse.

dA_c - Área do cavaco.

db - Comprimento diferencial da aresta de corte.

t_c - Espessura do cavaco.

\vec{K}_e - Desgaste da aresta de corte.

1. Introdução

Ao longo dos anos a indústria aeronáutica tem sofrido enormes avanços a nível tecnológico e de manufatura, exigindo a necessidade de procura por materiais mais resistentes e leves, de modo a melhorar as características dinâmicas das aeronaves. Deste modo, optou-se pela seleção de materiais de menor densidade, como é o caso dos CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*) e GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymers*), devido ao facto de possuírem propriedades mecânicas que satisfazem as suas necessidades, tais como: possuir um coeficiente térmico zero, elevada força, rigidez e baixo peso. Estas características fazem com que seja possível para a aeronave atingir maiores velocidades e ter um consumo de combustível mais eficiente.

Este tipo de compósito é normalmente utilizado em placas fabricadas a partir de pré-impregnados, sendo as suas camadas empilhadas numa sequência de acordo com uma determinada configuração. Cada camada possui a sua orientação relativa de modo a permitir a obtenção de determinadas características para a peça, como é o caso da resistência e rigidez [1].

Para efetuar uma montagem de peças de material compósito em estruturas é necessário um método de ligação, em que os mais usuais são os rebites e ligações aparafusadas, sendo para isso necessária uma furação.

A furação é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria. Esta caracteriza-se pela existência de mecanismos de extrusão e corte, onde o primeiro é efetuado pela ponta da broca, onde a velocidade de rotação é quase nula, e o segundo pelas arestas em movimento.

Uma vez que nos referimos a ligações entre compósitos na indústria aeronáutica, a qualidade do furo é bastante importante. Sendo que o material composto apresenta um comportamento não homogéneo e anisotrópico, não é possível obter a mesma qualidade que a furação em metal, onde a sua qualidade pode vir a ter efeito na resistência do material, quer a solicitações estáticas quer à fadiga.

Um dos principais defeitos quando falamos em furação de materiais compostos é a delaminação. Este tipo de defeito verifica-se tendencialmente em regiões intra-laminares, podendo, no entanto, ocorrer na zona de entrada/saída da broca na peça, por efeito de descascamento ou de punção da ponta da broca nas primeiras/últimas camadas da peça. Estes defeitos podem ser originados pelo desgaste da ferramenta, uma vez que desgastada, já não realiza corte de forma eficiente, danificando desta forma o produto.

O desgaste das ferramentas é consequência da natureza abrasiva destes materiais e da sua baixa condutividade térmica, causando um maior aquecimento da ferramenta [2], que por sua vez, origina uma redução do seu tempo de vida útil, levando ao seu descarte.

Na bibliografia consultada relativamente à furação convencional, podemos observar por *Sardinas et al.* [3] a seleção dos parâmetros de corte para a furação de material compósito, com recurso à otimização multiobjectivo, de modo a melhorar a taxa de remoção de material e a delaminação. Analisando os resultados do processo de otimização, estes mostram que tanto o avanço como a velocidade da ferramenta de corte têm influência no dano, ou seja, maiores taxas de remoção de material implicam maior delaminação.

Shyha et al. [4] realizaram um estudo relativo à vida útil da ferramenta baseado na influência dos parâmetros de furação (velocidade de corte e avanço) e na geometria da broca. Para análise dos dados utilizaram o método de Taguchi com análise de variância (ANOVA). Neste estudo verificaram que a geometria da broca e o avanço foram as variáveis com maior influência na vida útil da ferramenta.

Sedlacek e Slany [5] com base no método de Planeamento de experiências (DOE), estudaram o efeito dos parâmetros de processo da furação sobre a delaminação. Os autores utilizaram um planeamento fatorial completo com quatro fatores de dois níveis. Os fatores utilizados foram o avanço, a velocidade de corte, a geometria da ferramenta e o seu desgaste. Da análise destes fatores resultou, por ordem de significância, qual o parâmetro que mais está relacionado com a origem de uma delaminação, obtendo a seguinte sucessão: avanço, desgaste da ferramenta, geometria da ferramenta e velocidade de corte, que se verificaram significativos neste processo.

Lin e Chen [6][7] estudaram qual o comportamento da força axial, binário, desgaste da ferramenta e a qualidade dos furos obtidos com o aumento da velocidade de rotação. Utilizaram duas geometrias de ferramentas diferentes, mas com o mesmo diâmetro,

concluindo que o desgaste da ferramenta aumenta significativamente com o aumento da velocidade de rotação. Relativamente à qualidade dos furos, esta foi bastante razoável uma vez que utilizaram avanços relativamente pequenos.

Rawat e Attia [8] e [9] realizaram um estudo acerca dos mecanismos de desgaste das brocas de carboneto de tungstênio durante a furação a alta velocidade de materiais compósitos. Estabeleceram qual o efeito da velocidade e do avanço sobre os mecanismos de dano através de mapas de maquinabilidade. Esta investigação mostrou que o efeito da força axial é significativo sobre o desgaste da ferramenta e a qualidade do furo final, uma vez que a delaminação aumenta com o aumento do desgaste da ferramenta. Com os resultados dos mapas de maquinabilidade obtiveram as condições de corte ideais para o mínimo dano e máxima produtividade.

Iliescu et al. [10] desenvolveu um modelo que relaciona a força axial, os parâmetros de corte e o desgaste da ferramenta. Observou que a força axial aumenta com o seu desgaste e que a velocidade de rotação tem pouca influência nesta resposta. Concluiu então quais os parâmetros de corte ideais para aumentar a vida útil da ferramenta sem que ocorram danos importantes.

Poulachon et al. [15] realizou um estudo relativamente ao efeito das fibras de carbono no desgaste das ferramentas de corte. A elevada dureza das fibras faz com que estas sejam extremamente abrasivas, fazendo com que as ferramentas se desgastem rapidamente. Verificou que ao fim de 22 furos, estes começam a ficar fora de tolerância, sendo necessário o uso de materiais adequados para o revestimento da broca.

1.1 Materiais compósitos

Designa-se de material compósito, a combinação de dois ou mais materiais, que quando combinados à escala macroscópica resultam num único material.

Este tipo de material, tem vindo a ser bastante utilizado na indústria aeronáutica, devido às suas excelentes propriedades mecânicas, como a redução de peso que possui em relação às estruturas metálicas e flexibilidade de propriedades mecânicas, o que favorece a fabricação de peças com geometria complexa. No entanto, a utilização de material compósito também possui determinadas desvantagens uma vez que se trata de

uma matéria-prima com um custo extremamente elevado e que necessita de mão de obra altamente qualificada, possuindo ainda uma usinabilidade limitada. Na figura 1., apresenta-se a utilização de material composto na construção de uma aeronave de passageiros.

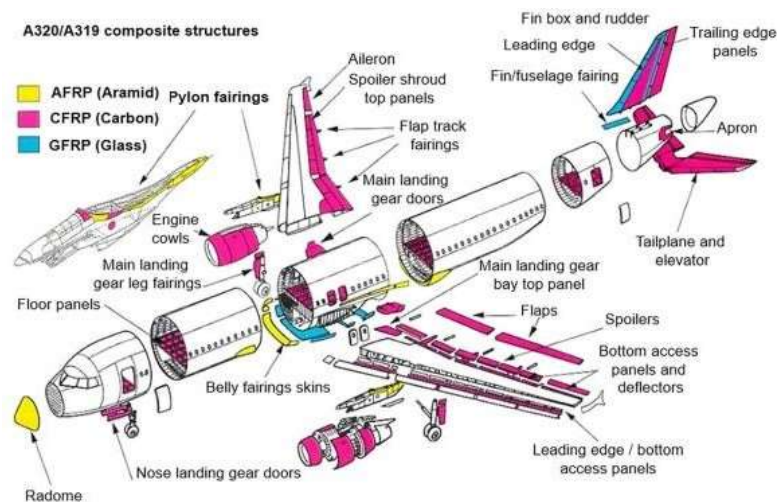


Figura 1. Utilização de material composto numa aeronave de passageiros.

Conforme referido anteriormente, o material composto é a junção de dois ou mais materiais, que quando combinados tem como objetivo criar um material com melhores propriedades que cada um deles. Normalmente são compostos por dois componentes, a matriz (resina), responsável pela transferência de esforços entre as fibras, para além de ser essencial na sua proteção contra a abrasão, e o reforço (fibra), tendo esta como principal função aferir a resistência mecânica e a rigidez da peça. À junção da matriz com o reforço, dá-se o nome de lâmina. Esta possui um comportamento anisotrópico, uma vez que apenas resiste a esforços no sentido das fibras. De modo a combater a anisotropia deste material, recorre-se a uma sequência de empilhamento das lâminas, permitindo a obtenção de produtos com várias geometrias e propriedades mecânicas.

À sobreposição das lâminas dá-se o nome de laminado, podendo este ser unidirecional (anisotrópico) ou bidirecional (Quase-Isotrópico), como podemos observar na Figura 2.

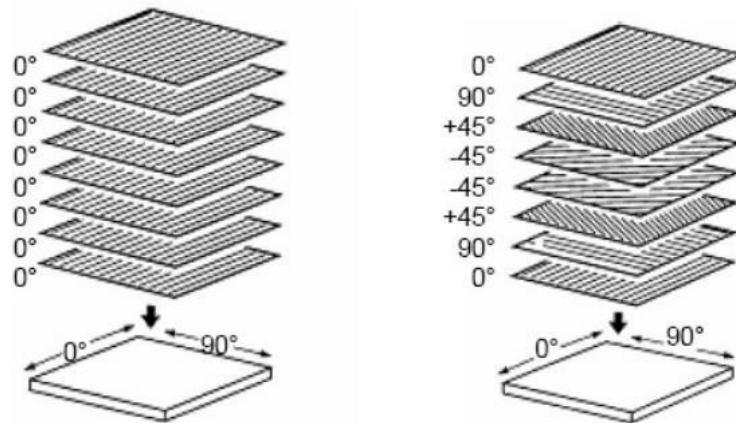


Figura 2. Sobreposição de lâminas

Sendo o material composto resultado da junção de dois ou mais materiais, podem-se prever as propriedades mecânicas de cada constituinte, através da regra das misturas. Esta regra indica as propriedades do material composto, em função da percentagem existente de cada um, assim como a afinidade entre a matriz e o reforço. Este método tem a forma apresentada pelas seguintes expressões:

$$P_c = P_r V_r + P_m V_m \quad (1)$$

$$P_c = \frac{P_r V_m}{P_r V_m + P_m V_r} \quad (1.1)$$

Sendo:

P_c – Propriedades de interesse a determinar do composto

P_r – Propriedades de interesse do reforço

P_m – Propriedades de interesse da matriz

V_m – Fração volumétrica do reforço

V_r – Fração volumétrica da matriz

Segundo a primeira expressão, pode-se obter uma estimativa das propriedades do material composto na sua direção principal, já a segunda expressão, permite obter uma estimativa das propriedades na direção perpendicular ao material. Estas expressões não

passam de estimativas, não sendo possível ter grande precisão nos resultados obtidos, pelo que é sempre aconselhável a realização de ensaios para uma determinação mais precisa.

1.2 Reforço

O reforço é o principal responsável por conferir resistência mecânica e rigidez à peça, sendo este quem suporta os esforços aplicados ao material compósito. Os reforços mais utilizados na indústria são as fibras de vidro, aramídicas e carbono. As fibras de vidro são as mais utilizadas, uma vez que possuem um custo mais reduzido. No entanto, quando é necessária uma poupança de peso, ganho de resistência e rigidez, opta-se pelas fibras aramídicas e de carbono.

Devido à elevada exigência da indústria aeronáutica, o uso de reforço em fibra de carbono tornou-se o mais utilizado na construção dos seus componentes (asas, estabilizadores e fuselagem). Este para além de possuir excelentes propriedades mecânicas, também possui um coeficiente de expansão negativo, boa condutividade térmica e são quimicamente inertes, salvo raras exceções. Contudo, este material possui algumas desvantagens, uma vez que se trata de um material muito frágil, tendo pouca resistência ao impacto, baixa extensão de rotura, baixa resistência à compressão, aliados ao custo bastante elevado do mesmo.

1.3 Matriz

A matriz é a principal responsável pela proteção do reforço contra a corrosão, uma vez que é ela quem está diretamente em contacto com o ambiente. É também a fase sujeita à transmissão de cargas entre as fibras, acrescentando resistência à compressão e a esforços de corte. Neste caso, em que o reforço é constituído através de fibras, este apresenta apenas propriedades elevadas na sua direção principal, diminuindo conforme o ângulo, devido à natureza da sua estrutura molecular organizada. Assim a matriz torna-se responsável por oferecer resistência na sua direção transversal.

Quanto melhor for a interface entre o reforço e a matriz, melhor será a transferência das forças entre eles, originando um compósito com um desempenho bastante superior.

Atualmente, o uso de resinas termo-endurecíveis como matriz polimérica, tem vindo a ser mais recorrente, nomeadamente as resinas de epóxico. O método de utilização destas resinas no fabrico de um material compósito, acontece através da impregnação das fibras com a resina e um catalisador ou empilhando pré-impregnados que irão sofrer posteriormente um processo de cura.

Determinados valores de pressão e temperatura, dão origem a reações moleculares na resina, criando ligações covalentes entre si, dando origem a uma cadeia molecular mais longa, denominadas de polímeros, fazendo com que este solidifique [12].

1.4 Processo de furação

Atualmente a furação é dos processos de maquinação mais utilizados na manufatura, uma vez que torna possível a construção de peças ou componentes de construção mecânica. Devido à importância deste processo e ao facto de ter uma grande utilização na indústria, têm sido realizadas várias pesquisas de modo a reduzir os custos de produção e a aumentar a sua qualidade [11].

Existem parâmetros, tais como, a velocidade do avanço, a velocidade e profundidade de corte, normalmente fornecidos pelos fabricantes das próprias ferramentas que indicam os parâmetros exatos para cada broca. Estes fatores têm influência na vida útil da ferramenta, assim como na qualidade do produto, fazendo com que sejam realizados estudos de modo a otimizar tais parâmetros para poder dar resposta às necessidades produtivas e assegurando uma maior durabilidade da mesma.

Movimento de avanço



Figura 3-Movimento da ferramenta durante a furação [12]

Para realizar a furação a broca realiza um movimento de corte e um movimento de avanço, segundo o seu eixo, tal como mostra a figura 3. O seu movimento principal é a velocidade de corte [m/min], calculada em função da velocidade de furação da broca e do seu diâmetro. Os movimentos referidos representam os principais esforços desta operação, sendo o esforço axial a força necessária para manter a velocidade de avanço constante e o torque necessário para manter também a velocidade de rotação constante [12].

Para que seja possível realizar o processo de furação, é necessário ter conhecimento de como calcular a sua velocidade e avanço. Na tabela abaixo, é possível observar os parâmetros necessários para efetuar o processo de furação, como velocidade de corte, avanço por rotação e força de corte específica.

Tabela 1. Parâmetros de furação

Parâmetros	Fórmulas
Velocidade de corte, (v_c) m/min	$v_c = \frac{D_c \times \pi \times n}{1000}$
Velocidade do fuso, (n) rpm	$n = \frac{v_c \times 1000}{D_c \times \pi}$
Taxa de penetração, (v_f) m/min	$v_f = f_n \times n$
Avanço por rotação, (f_n) mm/rot	$f_n = \frac{v_f}{n}$
Taxa de remoção de material, (Q) cm ³ /min	$Q = \frac{D_c \times f_n \times v_c}{4}$
Potencia líquida, (P_c) kW	$P_c = \frac{f_n \times v_c \times D_c \times k_c}{24 \times 10^3}$
Torque, lbf Nm	$T = \frac{P_c \times 30 \times 10^3}{\pi \times n}$
Força de avanço, (F_f) N	$F_f = 0.5 \times k_c \times \frac{D_c}{2} \times f_n \times \sin k_r$

1.5 Furação em material compósito

A furação de material compósito possui dificuldades que não se verificam, por exemplo, nos metais. A maior dificuldade consiste na realização de um furo sem que ocorra delaminação das fibras envolventes, ou seja, a separação entre duas camadas do material laminado, Figura 4. Uma vez que se trata de um defeito que ocorre quando duas ou mais camadas de material composto que se separam, irá ocorrer uma redução das propriedades mecânicas da peça, muitas vezes dando origem a retrabalho, aumentando significativamente os seus custos ou até mesmo ao descarte da mesma.

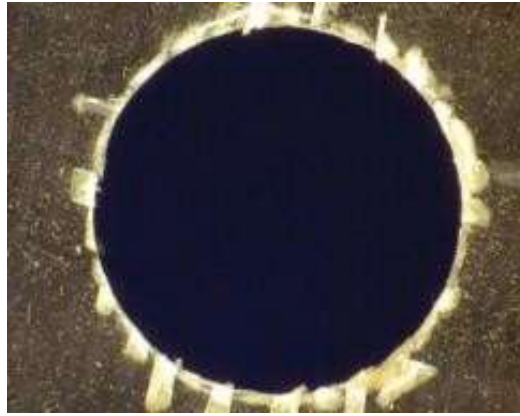


Figura 4-Furo delaminado [13]

Durante o processo de furação, verifica-se que a ferramenta realiza uma força de avanço. Esta força faz com que o material imediatamente em contacto com a broca, se afaste do material que já foi furado. Este efeito agrava-se tendencialmente quando o furo está quase terminado, uma vez que a espessura do material é muito menor, dando origem a uma menor resistência à deformação. A maior parte das vezes, a delaminação acontece nas camadas exteriores do material devido à não existência de suporte num dos lados.

Existem então dois tipos de delaminação consoante o lado em que ocorre: na região da entrada da ferramenta, que se dá o nome de *peel-up* e no momento da saída de *- push-out*.

A delaminação *peel-up* ocorre na região da entrada do furo - figura 5a). Quando as arestas da ferramenta entram em contacto com as camadas mais superficiais do composto, e devido ao avanço da ferramenta, o material é puxado pelas espiras da broca, separando as camadas superficiais das restantes [14]. Este tipo de delaminação possui um menor impacto nas propriedades mecânicas da peça devido à sua menor extensão. Outra forma de ocorrência deste tipo de delaminação, verifica-se nas paredes do furo, quando a ferramenta ainda não está inserida na totalidade dentro do material e as arestas da broca ainda estão a atuar nas suas primeiras camadas, ocorrendo assim a delaminação na entrada do furo [20].

O *push-out* ocorre na região da saída do furo - figura 5b) -, e este deve-se à força compressiva exercida pela ferramenta de corte no material, fazendo com que as camadas inferiores sejam empurradas e conseqüentemente separadas das superiores, ocorrendo a fratura intralaminar à volta do furo. Quanto mais a broca se aproximar das camadas inferiores da peça, mais a sua espessura vai diminuindo, sendo a resistência à deformação

menor. Quando a força exercida pela ferramenta de corte exceder a resistência interlaminar do material, sem que a broca o tenha penetrado completamente, ocorre este tipo de delaminação [21].

Este problema pode ser prevenido com a utilização de parâmetros de corte corretos e com a geometria de ponta da broca adequada [14].

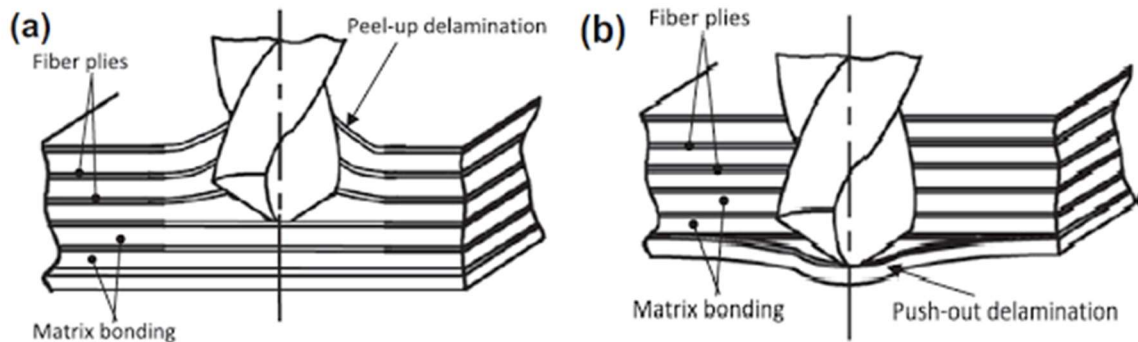


Figura 5 - Delaminação à entrada (a) e à saída do furo (b) (DeFu Liu et al. 2012)

A previsão deste tipo de defeitos tem se vindo a revelar um tema bastante estudado na literatura, quer por métodos numéricos quer por métodos analíticos [21].

Sabe-se que que a força axial acarreta uma serie de variáveis, tais como, a geometria e vida da ferramenta, parâmetros de corte, entre outros. No entanto, são verificados alguns entraves na previsão das forças de corte em material compósito, como é exemplo a variação da velocidade de corte ao longo do raio da broca e á sua aresta transversal, onde se verifica a extrusão do material, que irá ser cortado posteriormente pelas arestas de corte. Pode-se verificar, que as forças de corte são maiores junto ao centro da broca, e menores nas laterais.

Para alem deste entrave, outro bastante importante deve-se à orientação das fibras relativamente á direção de corte. Consoante o angulo de corte, ocorrem diferentes mecanismos de remoção de apara [20].

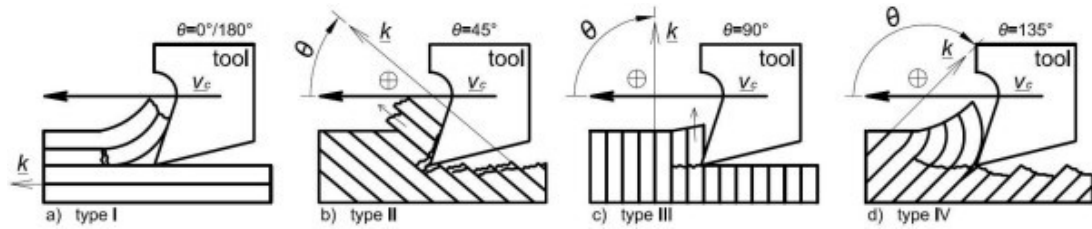


Figura 6. Orientação das fibras relativamente à direção de corte.

Quando o corte das fibras tem orientação de $\Theta = 0^\circ/180^\circ$, conforme a figura 6a) (*type I*), a ferramenta avança na direção das fibras, verificando-se uma fenda ao longo da interface matriz-reforço. Neste caso, uma vez que as fibras são fraturadas na perpendicular, ocorre a furação de apara. Os compósitos maquinados desta forma possuem um bom acabamento na superfície.

Para ângulos até $\Theta=45^\circ$ (*type II*), verificam-se duas formas de remoção de apara: por compressão e por cisalhamento interlaminar. Na fase de compressão, são geradas microfissuras acima e abaixo do plano de corte, gerando maiores danos na superfície trabalhada, como mostra a figura 6b) (*type II*). Neste cenário, a remoção de material é inferior que na operação *type I*. De uma forma mais simples, a fibra inicialmente é carregada perpendicularmente ao eixo da ferramenta, fraturando devido a esforços de compressão, posteriormente, estas são empurradas paralelamente à sua orientação, onde ocorre a fratura da matriz e se verifica a remoção de apara.

Na figura 6c) *type III* ($\Theta=90^\circ$), verifica-se que as fibras do material estão na perpendicular em relação à direção do corte. Neste tipo de remoção de apara, a aresta de corte da ferramenta exerce uma força de compressão contra as fibras do material, levando à sua fratura devido a essa alta pressão. Do resultado deste tipo de maquinação advêm bons acabamentos, uma vez que o plano de corte é perpendicular ao eixo das fibras, como podemos observar na figura 6c) *type III*.

Por fim, com ângulos até $\Theta=135^\circ$, ocorre a remoção de apara – Figura 6d) *type IV* -, durante este mecanismo predominam as macro fraturas. Durante o processo de furação, a aresta da ferramenta, devido ao seu avanço, empurra e dobra as fibras, resultando grandes deformações elásticas e forças de corte na sua interface elevada, originando um acabamento da superfície de menor qualidade [22].

O fator de delaminação, é uma forma bastante simples de averiguar a sua severidade, relacionando o diâmetro nominal do furo com o diâmetro da zona delaminada, considerando-se o diâmetro uma vez que esta expressão trata a zona delaminada como sendo circular.

$$F_d = \frac{D_d}{D_f} \quad (1.2)$$

Sendo D_d o diâmetro da zona delaminada e D_f o diâmetro do furo.

Destes dois fatores, o diâmetro do furo é o que possui maior importância, dado que se deve à força axial que a ferramenta exerce no produto.

O modelo mais citado para a análise da delaminação é o de Hocheng-Dharan [23].

Sabe-se que existe uma determinada força axial crítica, que, abaixo desta, não se verifica delaminação. Uma das soluções analíticas encontradas pelos autores foi a seguinte equação:

$$F_c = \pi \left[\frac{8G_{IC}Eh^3}{3(1-\nu^2)} \right]^{\frac{1}{2}} [N] \quad (1.3)$$

Onde E é o Módulo de Young (GPa), ν o Coeficiente de Poisson, h a espessura não cortada e G_{IC} a Tenacidade à fratura em Modo I do material (MPa. \sqrt{mm}).

Para evitar uma delaminação, a força axial aplicada no material não deve exceder este valor, ou seja, a força axial não pode exceder a tenacidade à fratura do material. Sendo este o princípio fundamental da equação acima, salientando que é válida para brocas helicoidais.

Este modelo considera o material como sendo isotrópico, no entanto, sabe-se que o material composto tem características anisotrópicas. Deste modo, um segundo modelo surgiu para completar o anteriormente referido.

Jain e Yang [23] verificaram que a zona delaminada possui uma geometria elíptica para laminados multidirecionais enquanto Hocheng e Dharan, tratavam a delaminação como tendo uma geométrica circular. Resultando o seguinte rácio de elipsidade:

$$k = \frac{a}{b} \quad (1.4)$$

Onde a representa o eixo maior da elipse e b o eixo menor. Verificando-se uma evolução na equação.

$$F = \frac{3\pi}{c} \sqrt{2G} \frac{D^*}{IC} [N] \quad (1.5)$$

Com:

$$D^* = D_{11} + \frac{2}{3}(D_{12} + 2D_{66})k^2 + D_{22} k^4 [\text{GPa}] \quad (1.6)$$

Sendo D_{11} , D_{12} , D_{22} e D_{66} a rigidez à flexão segundo várias direções.

Quanto maior for o rácio de elipsidade, maior será a diferença entre a força axial crítica obtida pelos modelos matemáticos. Estas abordagens analíticas, por vezes, são bastante difíceis de realizar devido à complexidade do processo.

1.6 Furação de material compósito-metal

Apesar de grande parte do material maquinado neste estudo ser compósito, determinadas regiões do produto necessitam de outro tipo de material, como é o caso do alumínio e do titânio. Podemos observar que a furação de material compósito é, por si só, bastante complexa, quando combinada com um metal o seu processo de maquinação ainda se torna mais desafiante. Uma das formas de realização da furação em compósito-metal, seria a utilização de duas ferramentas, uma com características adequadas a cada material. No entanto, isso levaria a uma enorme perda de tempo em troca de ferramentas. Foram então desenvolvidos estudos, de modo que com uma única broca, se realize a furação destes dois materiais, garantindo a qualidade na furação. Foram então criadas as ferramentas de *single shot drilling*.

Quando se combina carbono com o titânio, a maior dificuldade vem da baixa condutividade térmica que o titânio possui, fazendo com que grande parte da dissipação de calor se realize através das limalhas. Estas ao estarem a temperaturas elevadas, no

momento que passam pelo interior do furo podem gerar a degradação da matriz. Outro entrave na furação de carbono/titânio, deve-se ao facto deste último possuir uma apara contínua, devido ao seu módulo de elasticidade ser bastante baixo, podendo originar danos na sua passagem pelo carbono.

Relativamente ao processo de furação de Carbono/alumínio, as dificuldades são bastante idênticas, no entanto, a sua maquinação é menos desafiante. Esta diferença deve-se às propriedades mecânicas do material, principalmente no que toca à sua condutividade térmica ser bastante mais elevada [25].

Na figura abaixo, podemos observar o comportamento da ferramenta de corte quando realizada a furação em carbono e posteriormente em alumínio.

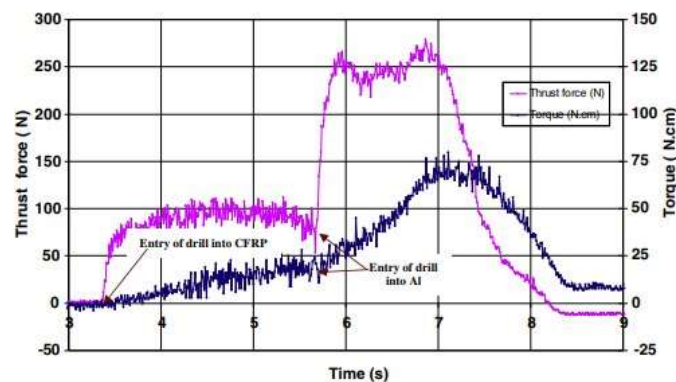


Figura 7 - Thrust force e torque na furação de carbono/alumínio. Diâmetro $d = 8\text{mm}$, Velocidade de corte $N = 1050$ e avanço de $f = 0.10\text{ mm/rot}$ [26].

Zitoune et al. [26], realizaram um estudo acerca dos efeitos dos parâmetros de corte durante a furação de carbono/alumínio. Verificaram que após o início do contacto com o alumínio, o *Thrust* (força axial) e o torque aumentaram significativamente os seus valores, vindo a comprovar a análise anteriormente referida. Concluíram também, que a qualidade do acabamento do furo, está relacionada com a geometria da apara. Esta ao ser de maiores dimensões, realiza fricção com as paredes do furo, dando origem a pequenas marcas [26].

1.7 Geometria da ferramenta de corte

Para atender ao processo de furação podemos encontrar uma vasta gama de brocas, por exemplo: brocas escalonadas, brocas chatas, brocas de centro e brocas

helicoidais. Estas são utilizadas de acordo com as condições de furação e o material a ser trabalhado.

Esforços como a força axial e o torque, são afetados por vários parâmetros de corte. São exemplos, a velocidade de corte, o avanço, a vida útil da ferramenta e a geometria da ferramenta. Devido às suas características a broca helicoidal tornou-se uma ferramenta de corte bastante versátil, sendo esta utilizada em diversos processos. Conforme mostra a figura 8., a ferramenta de corte é composta por duas partes fundamentais, o corpo (parte ativa) e um cabo ou haste, sendo esta última a região de fixação da broca à ferramenta. A ponta da broca, é das regiões mais importantes no que toca ao seu processo de furação, pois é ela a primeira zona de contacto com o material.

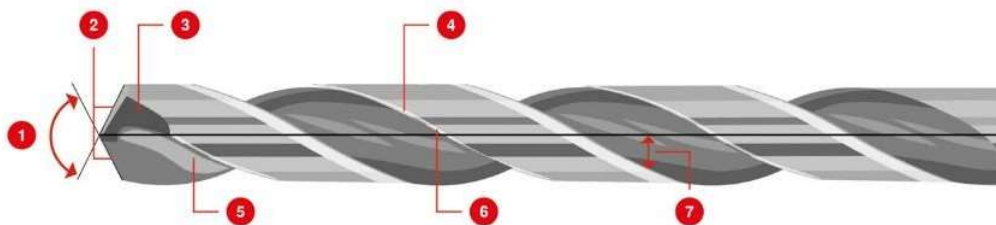


Figura 8. Geometria da ferramenta de corte.

- 1- Ângulo de ponta
- 2- Arestas de corte principais
- 3- Flanco principal
- 4- Arestas de corte secundárias
- 5- Canais de cavacos
- 6- Chanfro-guia
- 7- Ângulo de saída lateral

De modo a melhorar a vida e os mecanismos de furação, é fundamental que a ferramenta possua características na sua geometria que satisfaçam as necessidades dos clientes, em termos de durabilidade e qualidade. Como tal, fatores como o diâmetro da broca tem um papel fundamental. Verifica-se que ao diminuir o diâmetro externo da broca em direção à haste, ocorre uma diminuição do atrito da ferramenta com o furo, para além de melhorar

a saída de material através das suas arestas de escoamento. Quando a ferramenta entra em contacto com o material, o ângulo da ponta é quem possui o papel mais importante na furação. Verifica-se que quanto menor for o ângulo da ponta, mais fácil será centralizar a ponta da broca no material a furar. Quando se trata de materiais com baixa condutividade térmica e que formem cavacos reduzidos, ângulos de ponta de menores valores, permitem às arestas de corte realizarem uma dissipação de calor através do corpo da ferramenta, no entanto, realiza um desgaste maior nas arestas de corte. Por norma, as brocas helicoidais possuem um ângulo de ponta de 118° . Ângulos como 90° , 130° e 140° , são utilizados para plásticos duros, sujeitos a desgaste, materiais macios e para materiais leves com formação de cavacos longos, respetivamente.

Numa broca helicoidal, durante o processo de usinagem, as arestas de corte possuem um papel crucial. A ferramenta possui duas arestas de corte principais, conectadas a uma aresta de corte transversal. Verificam-se que arestas de corte curtas, possuem maior desempenho de corte que as longas. Da mesma forma, as arestas de corte transversais curtas também possuem melhor desempenho durante o processo de usinagem. Estas arestas estão localizadas no centro da ponta da broca, não possuindo nenhum efeito de corte. A sua única função é exercer pressão e atrito na peça, sendo uma desvantagem para a mesma. Ao realizar um processo de afiação da ferramenta, verifica-se uma redução no comprimento das arestas de corte transversal, reduzindo significativamente as forças de atrito exercidas pelo material na ferramenta. Ao reduzir estas forças, conseqüentemente, a força de avanço necessária para a furação também diminui.

No que diz respeito à vida útil da ferramenta, o perfil do canal da broca helicoidal é um dos maiores responsáveis. A ferramenta de corte, possui dois canais helicoidais opostos que permitem que ocorra remoção de cavaco através do seu corpo, reduzindo assim o aquecimento da mesma. Desta forma, se a ferramenta possuir canais de remoção de cavaco mais estreitos, irá ocorrer uma maior geração de calor, levando ao desgaste acelerado e até à quebra da broca. Este fator também está associado à qualidade do furo, uma vez que, caso se verifique o entupimento destes canais com material que não foi escoado, este pode causar movimentos radiais da ponta, pondo em causa a qualidade do mesmo. Quanto mais largo for o perfil dos canais, melhor será o escoamento de cavacos.

O núcleo é o principal responsável pela estabilidade da broca helicoidal, sendo a sua espessura um fator decisivo. Brocas com diâmetro de núcleo mais espesso, são mais estáveis, sendo estas mais adequadas a torque mais altos e materiais mais duros.

Na figura abaixo, estão mencionadas as guias e as arestas de corte secundárias da broca helicoidal, responsáveis pela precisão da concentricidade e qualidade da parede do furo.

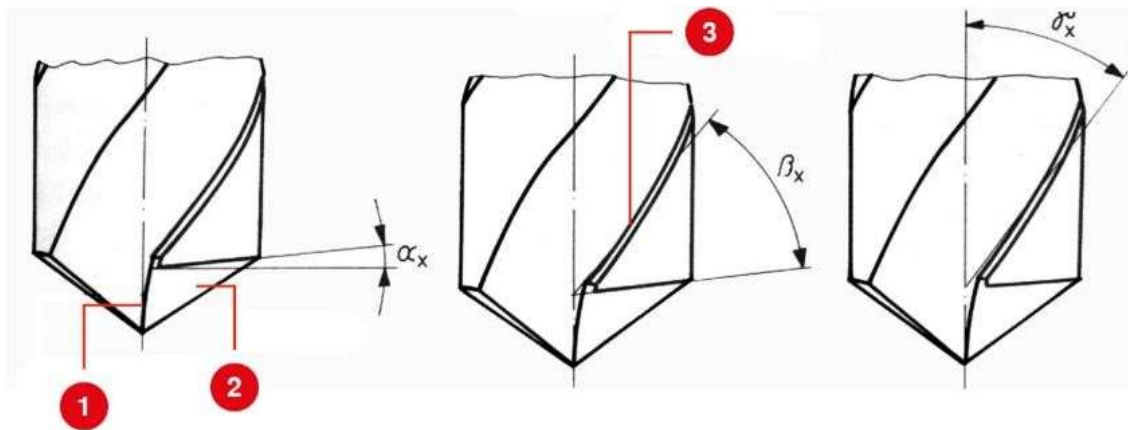


Figura 9. Características da ferramenta de corte

De entre várias características que a ferramenta de corte possui, as guias, dependendo do diâmetro da broca, ajudam a guiar a ferramenta no furo, fazendo com a qualidade das paredes do furo seja bastante melhor. A aresta de corte secundária, forma a transição da guia para o canal de cavacos, esta é responsável por cortar e eliminar os cavacos que ficam presos no material.

O comprimento das guias e das arestas de corte depende muito do ângulo da hélice, este é o principal responsável pela formação de cavacos, uma vez que determina o tamanho do ângulo de saída nas arestas de corte principais. Quando se trata de ângulos de hélice maiores, estes devem ser associados a materiais macios e de cavacos longos, pelo que ângulos menores, são utilizados preferencialmente em materiais duros com formação de cavacos curtos.

A geometria da ferramenta é a propriedade que mais influencia nas delaminações. Verificou-se que estes foram reduzidos por um ângulo de ponta menor, pelo contrário, maiores arestas transversais aumentam a deformação e conseqüentemente os danos. Estes acontecimentos verificam-se na entrada dos furos. Na saída, um menor raio de aresta, promove um melhor cisalhamento, reduzindo os danos no material. Em contrário, um maior ângulo de ponta, origina a uma maior separação interlaminar [29].

Na tabela seguinte, pode-se encontrar resumidamente as influências da geometria da ferramenta de corte no processo de furação.

Tabela 2. Influências da geometria da ferramenta de corte no processo de furação.

Geometria	Fator	Vantagens	Desvantagens
Diâmetro da broca	-Diminuição de diâmetro	- Menos atrito. -Melhora o escoamento de cavaco	
Angulo da ponta	-Menor angulo	- Maior facilidade em centralizar a ponta da broca. - Reduz o risco de escorregamento em superficies curvas. - Melhor dissipação de calor através das arestas da ferramenta.	- Possibilidade de bloqueio do canal do cavaco. - Aumenta o desgaste da broca.
Arestas de corte principais	-Maior comprimento de arestas	- Melhor desempenho de corte.	
Arestas de corte transversais	-Redução do comprimento da aresta	- Redução da força de atrito - Redução da força de avanço - Melhora a centralização da ponta na peça	- Elevada fricção e pressão na peça
Canal da broca	-Mais largo os perfis dos canais	- Melhor escoamento de cavacos	- Entupimento dos canais
Núcleo	-Diâmetro de núcleo maior	- Maior estabilidade da ferramenta	

1.8 Alargadores de Alta precisão

De um modo superficial, um alargador de precisão, é uma ferramenta desenhada para aumentar levemente o diâmetro de um furo pré-usinado com alto grau de precisão. Apresentando uma sequência de arestas cortantes, que podem ser paralelas ao eixo da ferramenta ou então helicoidais, sendo estas últimas as que produzem um melhor acabamento superficial.

Tal como nas brocas de furação, vários são os parâmetros que se deve ter em conta no que toca à vida útil do alargador, tais como:

- Profundidade de corte.
- Velocidade e avanço.

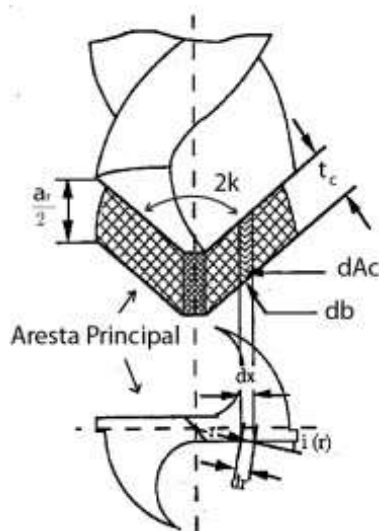
- *Offset.*
- Refrigeração, pressão e concentração.
- Fixação da peça.
- Comprimento da ferramenta.

1.9 Influência dos parâmetros de corte no processo de furação

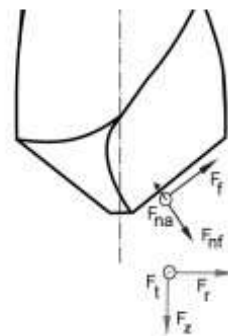
Observámos anteriormente, que a geometria da ferramenta de corte, possui bastante influência no processo de furação.

Um dos principais esforços que a ferramenta acarreta ao realizar o seu processo, é a força de usinagem. Esta força ocorre a partir do momento em que a ponta da broca entra em contato com o material e começa a remoção de cavaco.

Na figura 10., observa-se o ângulo da ponta $2K$. Este ângulo orienta a posição da aresta de corte em relação à aresta usinada. Relativamente à quantidade de material removido na direção do avanço por cada aresta, está identificado por $\frac{a_r}{2}$, em função do avanço por rotação a_r .



(a) Variáveis de corte



(b) Decomposição de forças

Figura 10. Variáveis de corte (a) e decomposição de forças (b)

Através do produto da área do cavaco, dA_c , com a pressão específica de um ponto P pertencente à aresta de corte $\vec{K}_c(P)$, com o desgaste da aresta de corte $\vec{K}_e(P)$ e o seu comprimento db , conforme a equação:

$$dF = \vec{K}_c(P) \times dA_c + \vec{K}_e(P) \times db \quad (1.6)$$

A área do cavaco pode ser expressa por:

$$dA_c = t_c \times db \quad (1.6.1)$$

Sendo db o comprimento diferencial da aresta de corte f e t_c a espessura do cavaco formado perpendicular à aresta de corte, calculados por:

$$t_c = \frac{a_r \sin k}{2} \quad (1.6.2)$$

$$db = \frac{d_z}{\cos k} = \frac{d_r}{\sin k} \quad (1.6.3)$$

d_z faz referência à decomposição da aresta de corte na vertical, enquanto d_r , na direção radial.

Para o cálculo da força de avanço, será desprezado o efeito de aresta, bem como o efeito de corte da aresta transversal.

1.9.1 Thrust Force

Thrust force representa a força axial, ou seja, a força no sentido do movimento de corte. Esta força, exerce uma compressão sobre a ferramenta ao longo do seu eixo, sendo as forças de corte perpendiculares à força axial.

Vários estudos relatam que a força durante o processo de furação é um dos principais fatores no que toca á ocorrência de delaminações, acredita-se ainda que existe um valor de *thrust* para o qual a ocorrência de delaminações é nula [19].

Para que ocorra uma redução na força é necessário ter em conta fatores como: a geometria e material que constitui a ferramenta de corte, material a ser trabalhado e os parâmetros de corte.

1.10 Vida das ferramentas de corte

A vida das ferramentas de corte é um aspeto que todas as empresas procuram otimizar, principalmente no ramo aeronáutico, já que as brocas de furação possuem preços extremamente elevados, tendo como maior objetivo a realização do maior número de furos com a maior qualidade possível. No entanto, isso nem sempre acontece. Fatores como a sua utilização contínua ou intermitente, os parâmetros de corte estarem devidamente ajustados, se a ferramenta é a indicada para determinado material a maquinar ou até se a ferramenta está acoplada de forma correta, influenciam a sua vida útil. A vida útil da ferramenta é definida como o tempo em que as suas arestas de corte se encontram em condições de realizar a remoção do material, antes que seja necessário afiá-la ou substituí-la [17].

Uma das formas de saber que a ferramenta está em fim de vida é quando esta começa a realizar furos com acabamento indesejável, ou então, pode ser definido um nível de desgaste que nos indique que esta necessita de ser trocada pois está próxima do seu fim de vida [16].

Existem dois grandes grupos no que toca a degradação de ferramentas [17]:

- Avarias, que originam o colapso da ferramenta de corte de uma forma abrupta, não possuindo tenacidade suficiente. (Ex: deformações plásticas, fissuras, fraturas, lascamentos e quebras.)
- Desgastes, conduzem á remoção gradual e progressiva de material nas zonas de contacto, na face de saída e no flanco da ferramenta. (Ex: Desgaste de flanco e desgaste de cratera.)

Uma das formas dos fabricantes de diversas marcas de ferramentas de corte anteciparem o fim de vida é estimando condições ideais de funcionamento das mesmas, tais como, utilizar a ferramenta para o material que é desenvolvida e seguindo os parâmetros de corte fornecidos pelo fornecedor. Assim é possível obter um melhor desempenho, com um desgaste progressivo, no entanto, muito longe do seu fim de vida real.

As ferramentas de corte possuem normalmente três estágios durante a sua vida útil [18], como se encontra representado na figura 11.:

- Estágio I, verifica-se um aumento bastante significativo no desgaste da ferramenta a partir do momento em que esta inicia o corte.
- Estágio II, o desgaste estabiliza, aumentando progressivamente até chegar perto do seu fim de vida, neste estágio a ferramenta está totalmente apta para realizar o seu processo de furação e os mecanismos de desgaste operam constantemente.
- Estágio III, verifica-se um aumento exponencial do desgaste da ferramenta num curto espaço de tempo, isto acontece devido às arestas de corte da ferramenta estarem de tal forma desgastadas que tem dificuldade na remoção de material, originando um aumento de temperatura e tensão na ferramenta, podendo originar a sua fratura rapidamente.

Podemos concluir que a troca da ferramenta momentos antes da entrada no estágio III, permite usufruir do máximo rendimento e evitar que esta quebre.

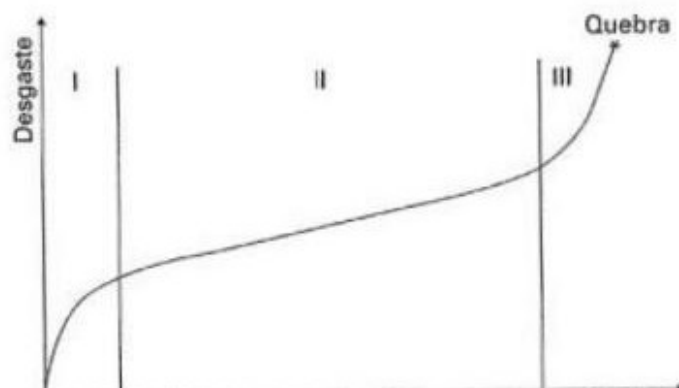


Figura 11 - Curva-padrão da vida da ferramenta [18]

Com base nos dados fornecidos pelo *Robot*, foi possível analisar a variação do *Thrust* ao longo da vida estipulada pelo fornecedor, neste caso a broca realizou 3881 furos em revestimentos de carbono.

Podemos observar que inicialmente no estágio I, se verifica uma rápida acentuação na curvatura e de seguida ao entrar no 2º estágio esta começa a comportar-se de forma linear. Visto que não se verifica a entrada no estágio III, não nos é possível concluir quando ocorre o final de vida da ferramenta. Também não será possível realizar furação no produto até que esta fracture uma vez que isso ao acontecer iria comprometer a qualidade do produto. Estando ainda a falar do ramo aeronáutico, em que a qualidade é muito minuciosa, será necessário recorrer a modelos estatísticos de previsão para obter o valor para o qual a ferramenta entra no estágio III, ficando assim estabelecido o seu fim de vida.

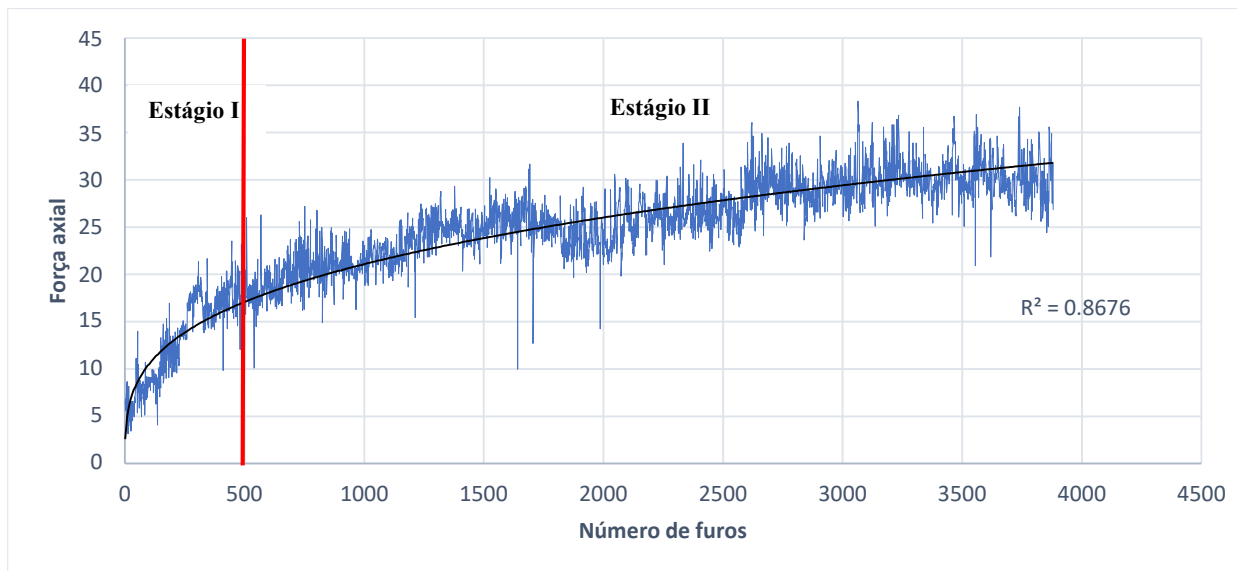


Figura 12- Força axial em função do nº de furos realizados

1.11 Furação com sistemas robóticos

Segundo a norma ISO (*International Organization for Standardization*) 10218, define-se sistema robótico, uma máquina manipuladora com vários graus de liberdade controlada de forma automática, sendo esta, reprogramável, multifuncional e que pode possuir uma base fixa ou amovível, de acordo com as necessidades da sua aplicação industrial.

Um sistema robótico é formado pela junção de vários componentes, sendo eles:

- Manipulador mecânico: trata-se da estrutura e do aspeto mecânico do robot. É constituído pela combinação de elementos estruturais rígidos (elos) conectados entre si através das articulações (juntas). O primeiro corpo do robot é denominado de base e o último de extremidade terminal, onde se encontra o atuador (garra ou ferramenta).
- Atuadores: estes componentes do sistema robótico são responsáveis pela conversão da energia elétrica, hidráulica ou pneumática, em potência mecânica. Essa potência é gerada pelos atuadores através dos sistemas de transmissão, sendo posteriormente enviada aos elos para que os mesmos realizem movimento.
- Sensores: são dos componentes mais importantes para o sistema robótico, pois são eles que fornecem os parâmetros sobre o comportamento do manipulador, relativamente à posição e velocidade dos elos em função do tempo, mas também à sua interação com o meio operativo (força, torque, sistemas de visão...) e o sistema de controlo. Também as juntas possuem sensores, de modo a fornecer informação para o movimento dos elos.
- Sistema de controlo: é aqui que ocorre toda a monitorização dos parâmetros operacionais do sistema robótico. Os comandos de movimentação enviados aos atuadores são originados através de controladores de movimento (computador industrial, PLC, ...) e de informações obtidas pelos seus sensores.
- Unidade de potência: é responsável pelo fornecimento de potência necessária para a movimentação dos atuadores. De modo a realizar movimentação dos atuadores hidráulicos, pneumáticos e eletromagnéticos, são necessárias unidade de potência como como a bomba hidráulica, compressor e uma fonte elétrica, respetivamente.
- Atuador: é o responsável pela ligação do sistema robótico com o seu meio envolvente. Este pode ser uma garra ou uma ferramenta, sendo a primeira utilizada na manipulação de objetos, assim como a realização o seu transporte de uma posição pré-definida para outra, já a ferramenta tem como função realizar um trabalho sobre uma peça de forma automática [31].

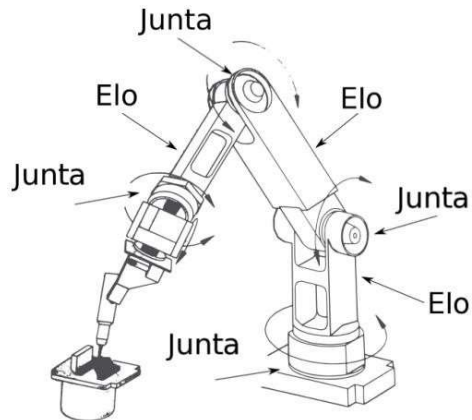


Figura 13. Componentes de um sistema robótico.

O sistema robótico utilizado em Évora, trata-se de um robot articulado. Este tipo de sistema possui pelo menos três juntas de rotação, em que o eixo de movimento da junta de rotação da base é ortogonal às outras duas juntas de rotação, estas simétricas entre si. Esta espécie de sistemas tem como vantagem possuir uma grande mobilidade, devido à quantidade de graus de liberdade que auferem, no entanto, o seu volume de trabalho apresenta uma geometria mais complexa em relação a outras configurações.

Tendo em conta as características anteriormente descritas, várias são as empresas que começaram a utilizar este tipo de sistemas. O objetivo primordial é o de retirar a maior rentabilidade possível de um processo, ganhando tempo e não perdendo qualidade.

Na aeronáutica tem sido muito recorrente o uso de sistemas robóticos para a furação dos seus componentes devido às suas grandes dimensões. Por exemplo, para a furação de uma asa ou uma fuselagem de um avião seriam necessários vários operadores e muitas horas de trabalho, em que o risco de ocorrência de uma não conformidade seria bastante elevada. Deste modo, a maioria das empresas neste ramo recorreram à aquisição de sistemas robóticos, conseguindo realizar a furação e cravação de grandes componentes com elevada qualidade e rapidez no seu processo.

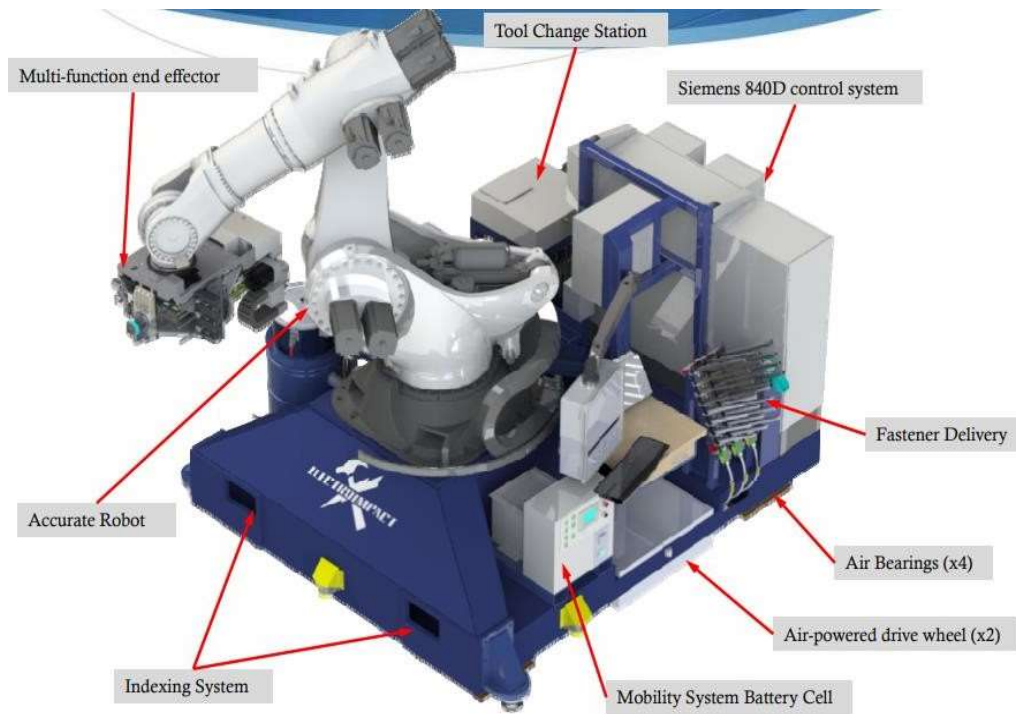


Figura 14. Sistema robótico Eletroimpact

Atualmente, a empresa apenas realiza a furação com auxílio de sistemas robóticos nos painéis dos estabilizadores horizontais e verticais devido às suas dimensões e quantidade de furos necessários para realizar o seu fabrico.

O sistema robótico que realiza a furação destes componentes, possui liberdade de movimentação horizontal, através de carris, podendo assim deslocar-se ao longo dos estabilizadores.



Figura 15. Estabilizador horizontal – Praetor 550 - EMBRAER

Antes de iniciar qualquer furação, o robot utiliza um sistema para se ‘encontrar’ com o produto, as *tacks*. Estas são uns prendedores que se encontram cravados no painel, que o robot ao realizar a sua leitura, enquadra-se com o produto.

O segundo passo é a furação e escareado. Durante este processo, o operador de robot pode controlar o avanço do mesmo e observar a força que está a ser exercida pela ferramenta. Tem ainda acesso à percentagem de vida útil que a ferramenta aufere.

Após cada furação, o robot utiliza um sistema de medição, denominado *Probe*. Esta nada mais é que uma ogiva que nos informa da qualidade do furo. É com base nos dados recolhidos por ela que é permitido realizar uma análise do processo.

1.11.1 *Probe*

Aquando de uma furação, o *robot* utiliza um sistema de medição, que de forma automática realiza a troca da broca para a *probe*. Deste modo é possível analisar se o furo realizado está ou não dentro da tolerância estipulada.

A *probe* é uma ogiva de medição que realiza medições a 0 e 90 graus no interior do furo. De estrutura cilíndrica, possui 2 esferas que se ajustam ao diâmetro do furo, sendo possível obter os valores do seu diâmetro, profundidade do escareado e profundidade do material. Com recurso a esses valores o operador do robot consegue controlar quer o desgaste da broca, quer a qualidade do furo realizado.

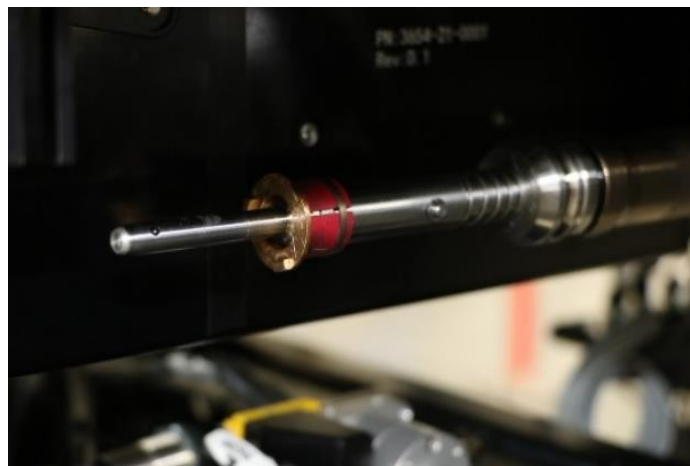


Figura 16. *Probe* – Ogiva de medição.

2. Enquadramento do problema

A empresa tem vindo a desenvolver projetos de melhoria em várias áreas, uma delas foi o processo de montagem, que cada vez tem sido mais automatizado e otimizado. No entanto, o processo de furação com auxílio de sistema robótico não sofreu alteração relativamente ao processo de descarte das suas ferramentas de corte.

Uma vez que os custos associados a este processo são extremamente elevados, a empresa propôs a realização de um estudo que vise a melhoria deste processo, tentando otimizar as suas ferramentas de corte que se encontram a ser descartadas em fim de vida, mas que ainda se encontram a realizar o seu processo de furação sem indícios de desgaste. Recorreu se então aos dados fornecidos pelo robot, que após ser analisado o seu *Thrust* podemos observar o comportamento dos ciclos de vida da ferramenta.

Um dos maiores entraves à realização deste estudo foi o facto de não se possuírem dados reais do comportamento da ferramenta quando esta se aproxima do seu fim de vida, uma vez que a ferramenta quando realiza um determinado número de milímetros de furação é substituída (condição imposta pelo fabricante).

Uma grande vantagem deveu-se ao facto de, por lapso, a mesma ferramenta ter realizado dois ciclos de vida. Deste modo foi possível observar o seu comportamento ao longo de um maior período de tempo, como mostra a figura 12. Este gráfico permitiu dar a conhecer à posteriori, um possível comportamento da ferramenta em análise.

3. Análise de resultados

De seguida, serão analisadas ferramentas de corte nos três diferentes blocos de materiais utilizados aquando da furação com o sistema robótico, sendo eles, Carbono – Carbono, Carbono – Alumínio e Carbono – Titânio. Devido à enorme quantidade de ferramentas utilizadas na furação, optou-se por analisar as ferramentas que aparentavam maior indício de aumento de vida útil.

3.1 UAB130-05-CF

A ferramenta de corte UAB130-05-CF é das mais utilizadas na furação dos revestimentos do avião Praetor, realizando em média 1800 furos durante o seu ciclo de vida. Relativamente às suas características, é uma broca helicoidal que realiza furação e um escareado de 130 graus. Esta realiza apenas furação em carbono, podendo furar de um a quatro materiais. Apresenta ainda um ângulo de ponta de 90 graus e um diâmetro nominal de 4.205mm, como mostra a figura 17.

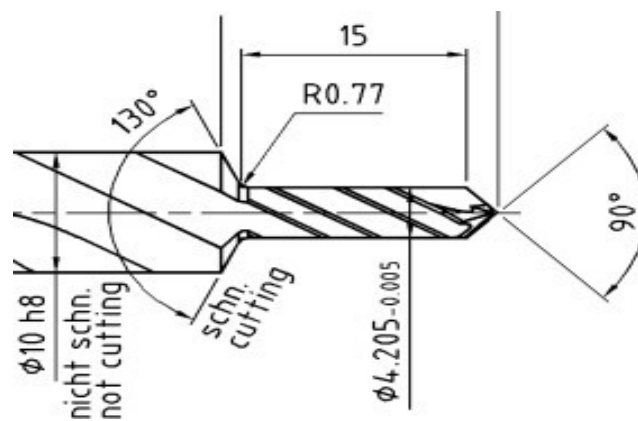


Figura 17. Características da ferramenta UAB130-05-CF

Pelos dados fornecidos pelo robot não serem suficientes para realizar uma previsão estatística do comportamento da ferramenta ao longo do número de furos realizados, e uma vez que esta ao atingir os milímetros de furação definidos pelo fornecedor é substituída por uma ferramenta nova, não realizando o seu verdadeiro ciclo de vida completo. Deste modo, não se tem conhecimento do seu real comportamento. Assim, o único meio estatístico possível para estudar o seu comportamento foi através da análise dos seguintes métodos.

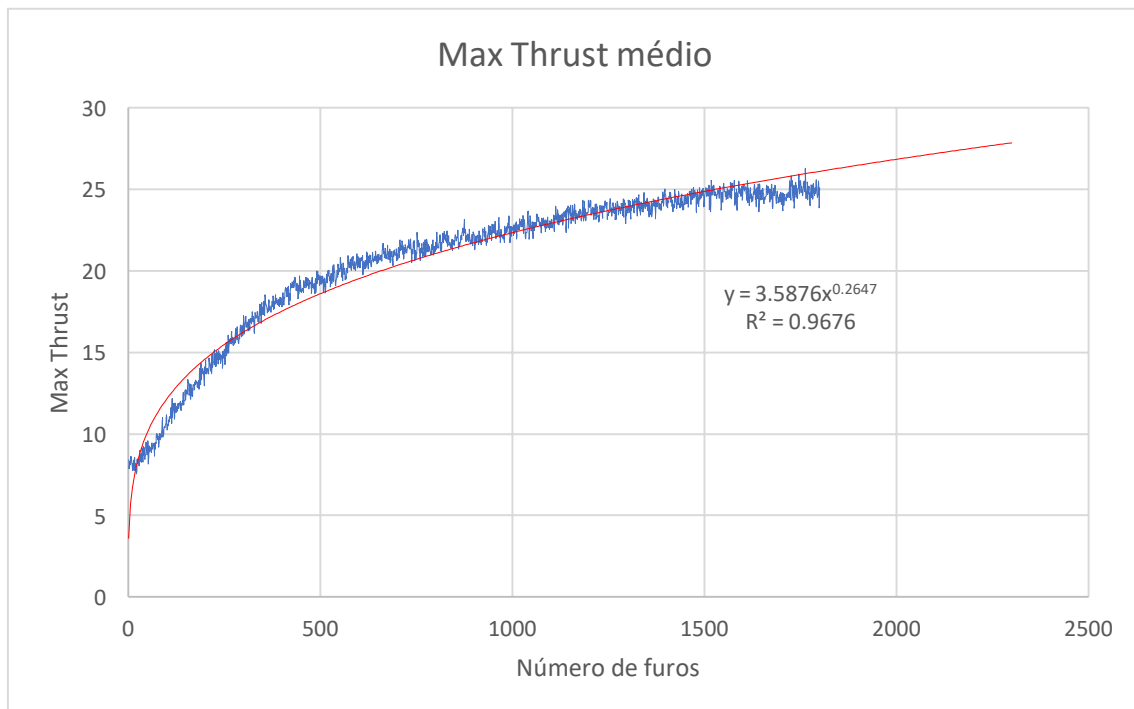


Figura 18. Valor médio de Thrust máximo em função do número de furos.

Para elaboração do gráfico acima, foram analisados 25 ciclos de vida correspondentes a 25 brocas. Calculou-se a média dos respetivos furos realizados por cada uma, e assim foi possível obter uma amostra mais fidedigna e representativa da realidade. O resultado foi um gráfico com um comportamento exponencial, que possui um R^2 bastante próximo de 1, que nos indica que a linha de tendência se ajusta muito bem aos dados reais. No entanto, a equação originária da reta não representa o comportamento futuro da ferramenta, pelo que não nos dá indicação com grande certeza se é fiável ou não proceder ao aumento da sua vida útil.

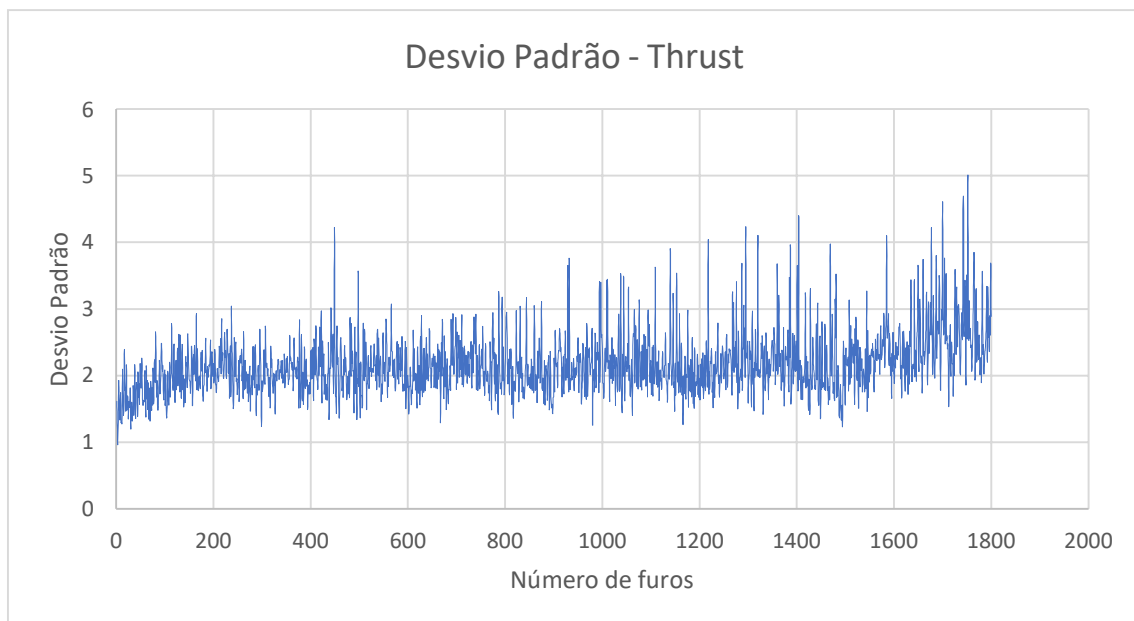


Figura 19. Desvio-Padrão em função do número de furos

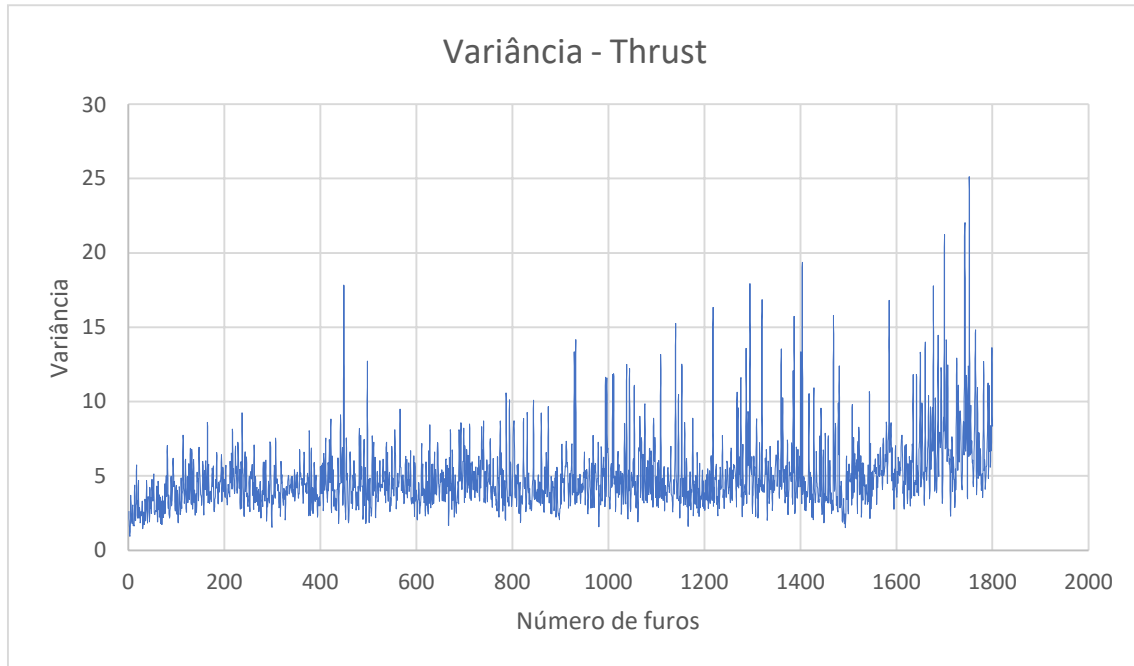


Figura 20. Variância em função do número de furos

Os gráficos 19 e 20 representam o desvio padrão e a variância dos dados referentes às 25 brocas utilizadas durante o estudo, conforme descrito anteriormente. Estes dois métodos são medidas de dispersão que nos indicam a regularidade de um conjunto de dados em função da sua média aritmética, indicando o quanto os dados estão distantes do seu valor médio.

Ao analisar os gráficos verifica-se que existe uma maior discrepância nos valores com o aumento do número de furos realizados, indicando possivelmente que a ferramenta começa a sofrer desgaste, no entanto pouco significativo.

Figura 21. Histograma de valores de Thrust máximo.

Ao analisar o histograma referente aos valores de thrust obtidos através da média dos furos das várias ferramentas, identificamos que este possui um pico na sua extremidade, representando os seus valores de força axial mais comuns, variando entre os 20 e 25 N. A ocorrência de assimetria à direita, indica que os dados podem não ser normalmente distribuídos.

Neste histograma, a distribuição normal ajustada não parece ser um bom ajuste, pois existem mais dados do que o esperado à direita do pico e na cauda esquerda.

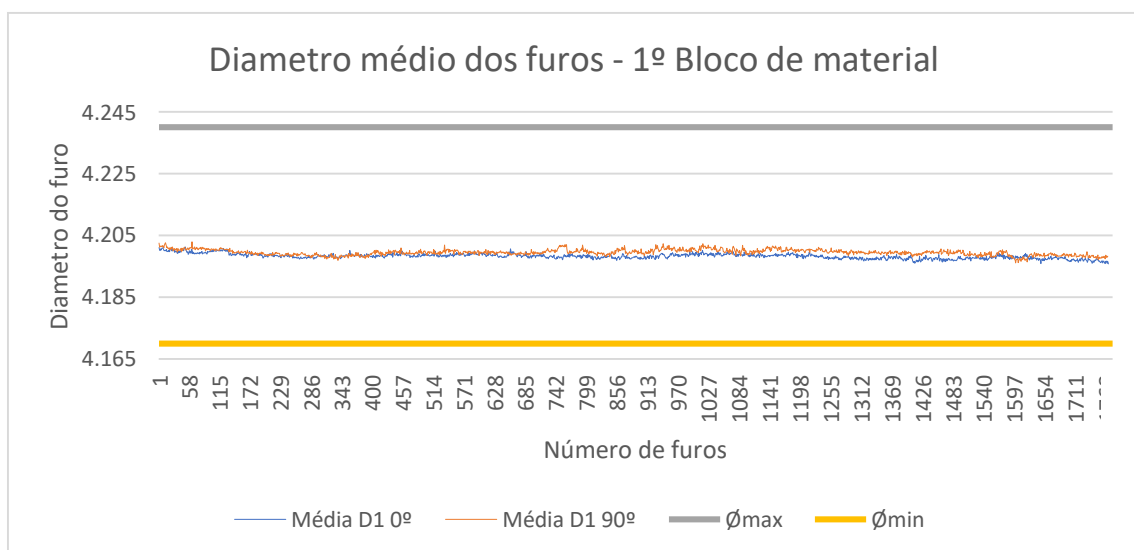


Figura 22. Diâmetro dos vários furos no primeiro bloco de material.

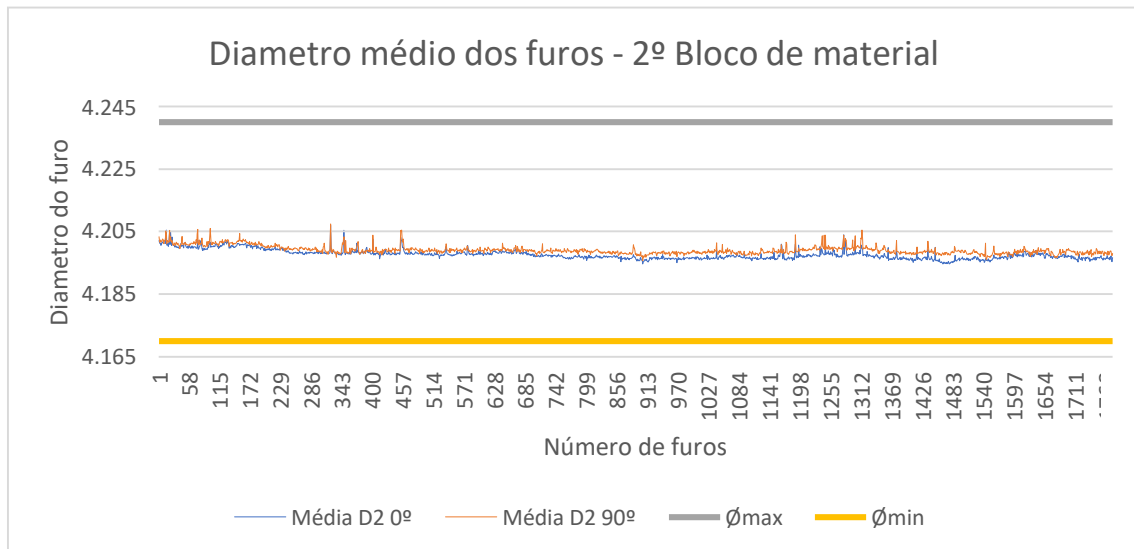


Figura 23. Diâmetro dos vários furos no segundo bloco de material.

Os gráficos 22 e 23 representam os valores do diâmetro médio medidos pelo robot no primeiro e segundo pacote de material, respetivamente. Pode observar-se que os valores medidos possuem uma grande margem de tolerância, quer para o limite superior, quer para o limite inferior. Esta observação demonstra que a ferramenta realiza furação em perfeitas condições, não apresentando nenhum nível de desgaste significativo nem uma tendência de aproximação aos limites. Conclui-se que em termos de qualidade de furos, a ferramenta tem capacidade para aumentar o seu ciclo de vida de uma forma considerável.

De modo a reforçar os acontecimentos anteriormente descritos, verifica-se que os dados não apresentam uma irregularidade relativamente à sua média aritmética, não se verificando nenhum tipo de discrepância significativa no seu comportamento.

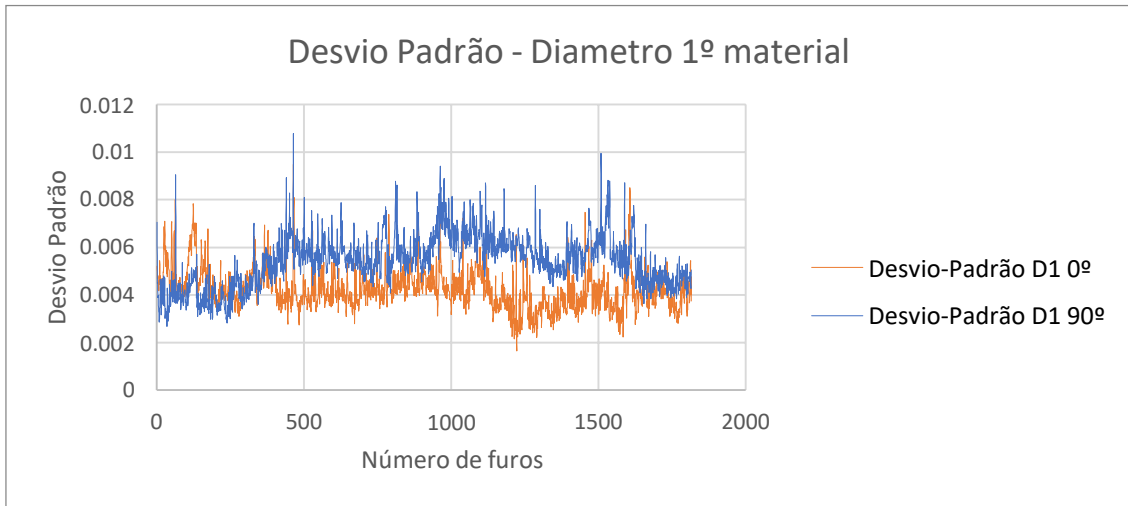


Figura 24. Desvio-padrão referente aos diâmetros de furos no primeiro bloco de material.

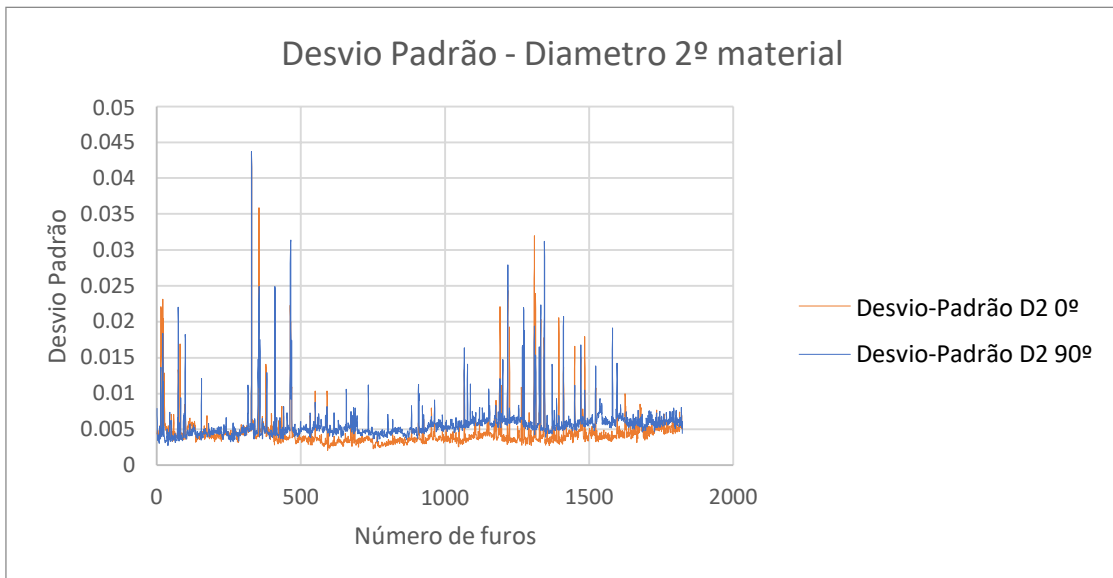


Figura 25. Desvio-padrão referente aos diâmetros de furos no segundo bloco de material.

Podemos então concluir, que a ferramenta UAB130-05-CF possui claramente margem de progressão no que toca ao seu aumento de vida útil.

Em ternos experimentais apenas existem duas ocorrências que nos indicam que possivelmente a ferramenta tem perfeitas condições de realizar um maior ciclo de vida. Este acontecimento ocorreu devido a um erro do operador, onde este utilizou a mesma ferramenta duas vezes. Assim, foi realizado o dobro do seu ciclo de vida útil pré-definido

pelo fornecedor, sendo verificado que tem capacidade para se aumentar o seu tempo útil de vida sem gerar custos de não qualidade.

3.2 HST315-06-KL

De seguida, será analisada uma ferramenta que realiza a sua furação e escareado em carbono-alumínio, principalmente na remoção de *tacks* (prendedores utilizados como referência para o sistema robótico), prevendo-se um maior desgaste que uma furação de carbono-carbono.

Como se trata de uma ferramenta para perfurar material mais duro, como é o caso do alumínio, verifica-se um ângulo de ponta de 130 graus de modo a permitir o menor desgaste da mesma, sendo este diferente do encontrado aquando da furação de carbono-carbono em que o ângulo seria de 90 graus na maioria dos casos.

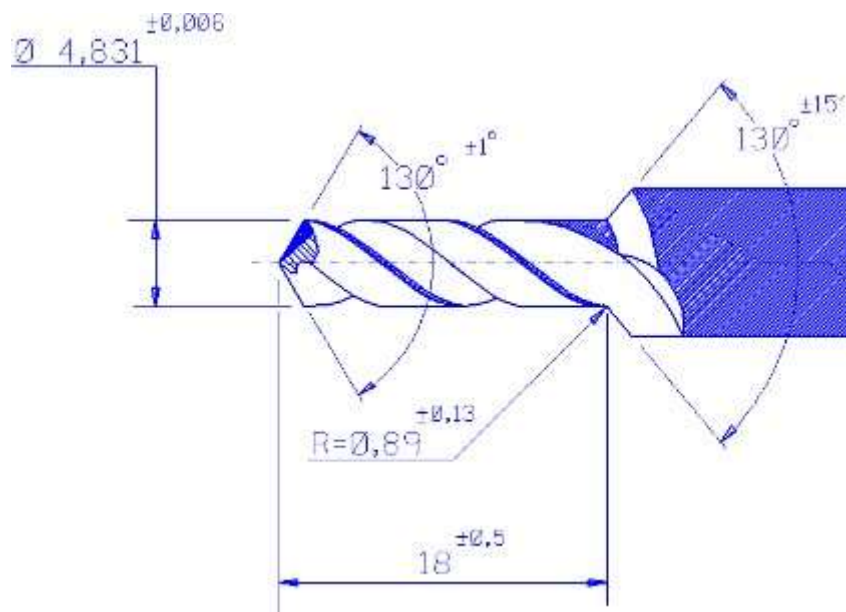


Figura 26. Geometria da ferramenta HST315-06-KL

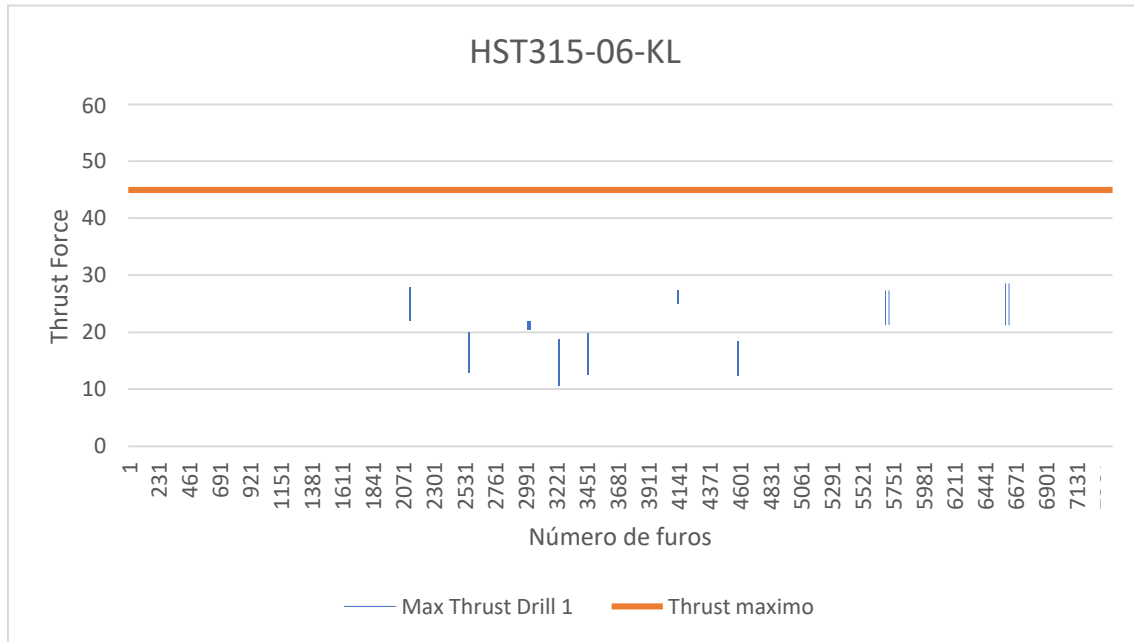


Figura 27. Ciclos de vida de várias ferramentas, variação do Thrust ao longo do tempo.

O gráfico 27 representa o ciclo de 9 brocas HST315-06-KL. É possível observar que em todos os ciclos, a ferramenta é trocada perto do seu valor limite de *Thrust*, sendo uma possível hipótese de aumento de vida da ferramenta caso esta realize a furação dentro das tolerâncias admissíveis, preferencialmente com margem para os limites superior e inferior. Esta hipótese é também possível se for assegurado um aumento de *Thrust* sem danificar a ferramenta

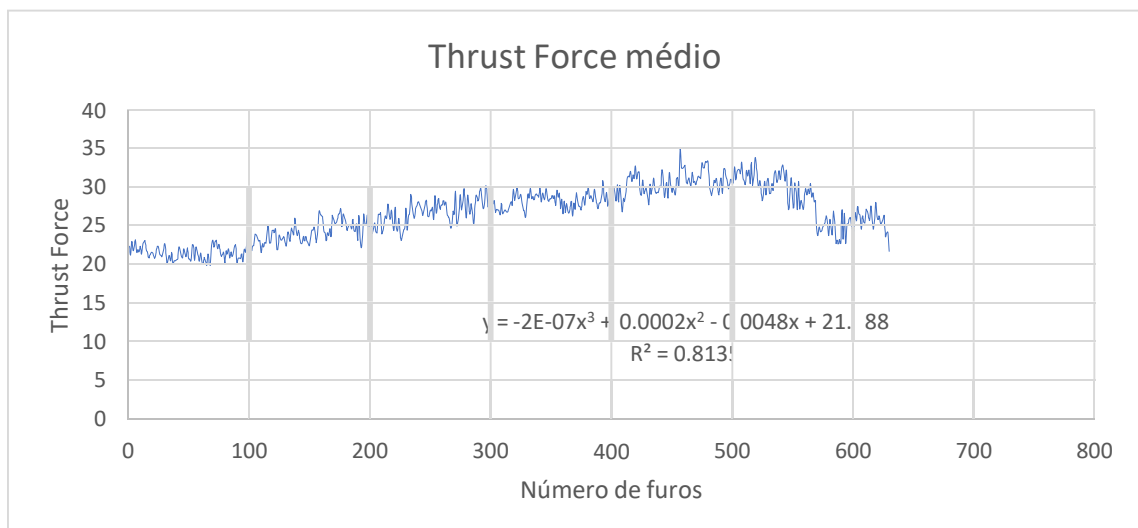


Figura 28. Representação média de um ciclo de vida da ferramenta HST315-06-KL.

O gráfico 28 contempla as médias dos furos das várias brocas representadas no gráfico 27, originando uma curva mais realista do que é o comportamento desta ferramenta, ao longo do seu processo de furação.

Desde já, é bastante nítida uma diferença no seu comportamento, sendo esta o facto de a força aparentemente atingir o seu auge e de seguida verificar-se um decréscimo do seu valor da força axial. Ao traçar uma linha de tendência polinomial, obtém-se a expressão $y = -2E-07x^3 + 0.0002x^2 - 0.0048x + 21.588$ com um R^2 de 0.8135, que apesar de não ser ideal, ajusta-se aos dados reais. No entanto, não se pode concluir que este será o comportamento futuro da ferramenta devido à falta de dados que permitam realizar observações do comportamento futuro da mesma. Este comportamento não demonstra a curva teórica de aumento da força axial, sendo que o previsto seria ocorrer um aumento da força ao longo do número de furos realizados. Este fenómeno deve-se ao facto da ferramenta, ao sofrer desgaste, perder a afiação das suas lâminas de corte, sendo necessário realizar mais força para remoção de material. Contudo, presumindo que a curva se encontra numa fase inicial, é possível que ao realizar um maior número de furos, esta adquira um comportamento crescente.

Em conclusão, não é possível levar em conta este gráfico para a análise da ferramenta, pelo que será necessário realizar experiências com um maior número de furos para futura análise do seu comportamento.

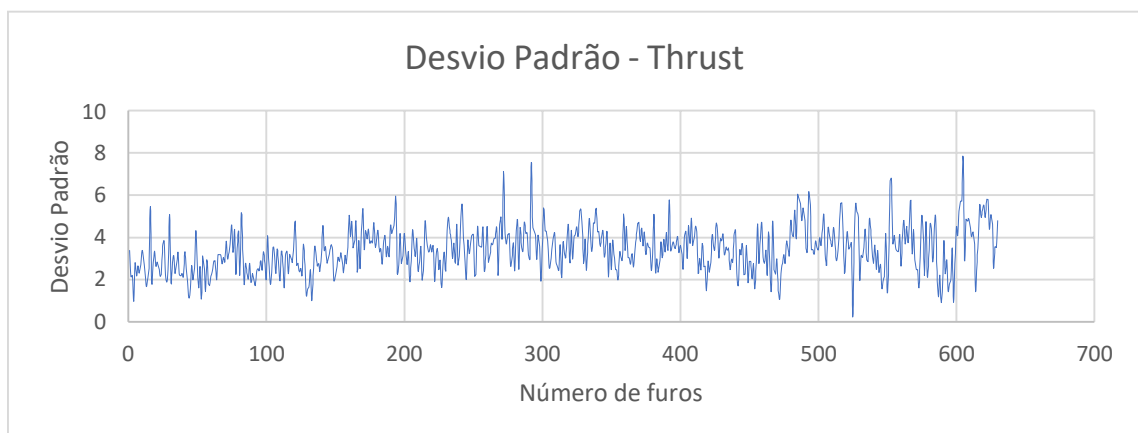


Figura 29. Desvio-Padrão em função do número de furos.

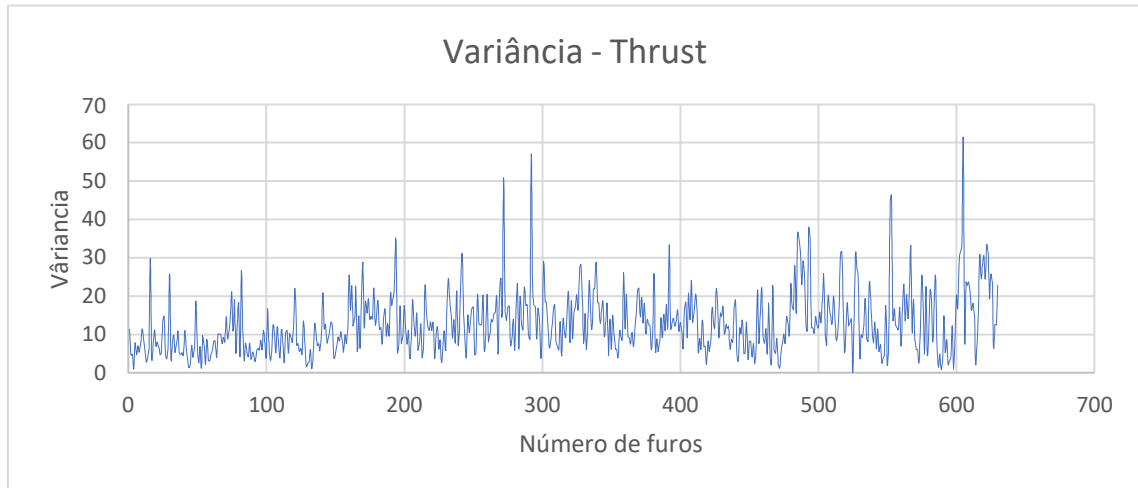


Figura 30. Variância em função do número de furos.

Com a análise do desvio padrão e da variância, observamos uma maior dispersão dos valores reais em relação à média que nas restantes brocas analisadas, não se verificando estabilidade no processo de furação desta ferramenta. Esta instabilidade pode ser comprovada através do histograma abaixo, denominado de “*platô*”. Este tipo de formato ocorre geralmente quando se verifica uma anomalia nos dados, decorrentes de falhas, tendo as barras praticamente todas o mesmo tamanho.

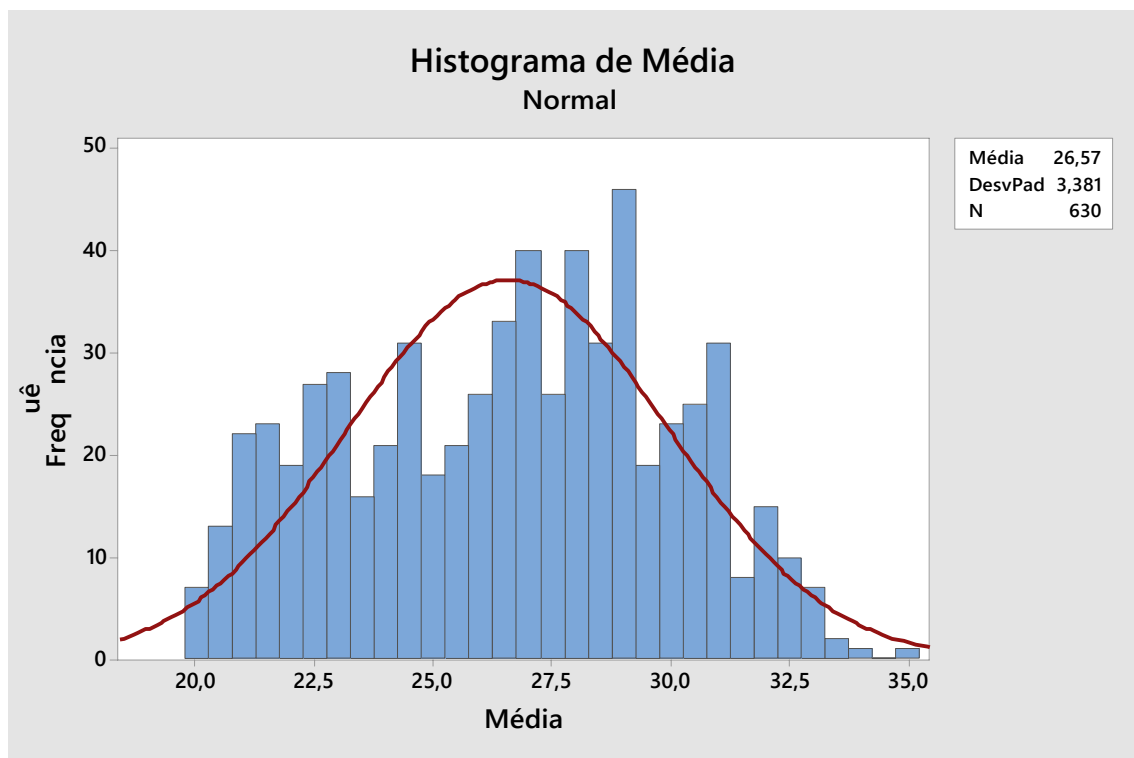


Figura 31. Histograma de valores de Thrust máximo.

De forma a analisar a qualidade dos furos realizados pela ferramenta, traçaram-se os gráficos 32 e 33, onde está representado o valor médios dos diâmetros medidos em cada furo realizado pelas diferentes brocas, estimando assim, a qualidade dos furos ao longo do tempo de vida da ferramenta. Podemos observar que se verificam alguns pontos fora dos limites de tolerância, no entanto, o que me leva a reprovar o possível aumento de vida da ferramenta, é o facto dos valores se aproximarem muito do valor mínimo permitido, ou seja, caso se verifique a ocorrência de mais furos, maior será o desgaste das lâminas de corte e menor será o diâmetro medido, dando origem a problemas de qualidade.

Com base nos fatores acima mencionados, concluo que não é viável o aumento da vida útil da ferramenta HST315-06-KL com base nos dados disponíveis para análise.

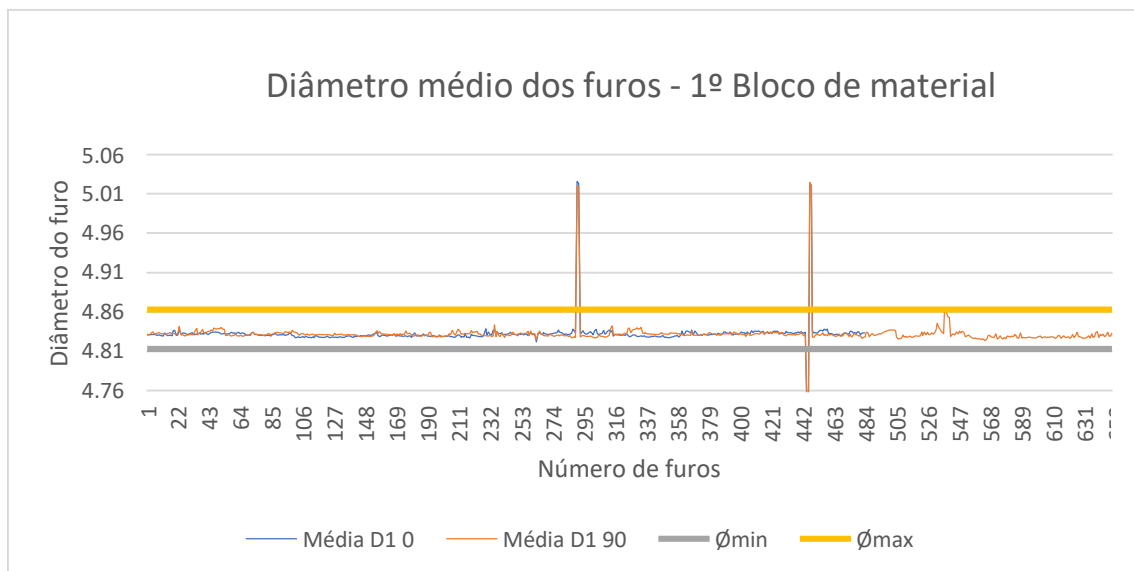


Figura 32. Diâmetro dos vários furos no primeiro bloco de material.

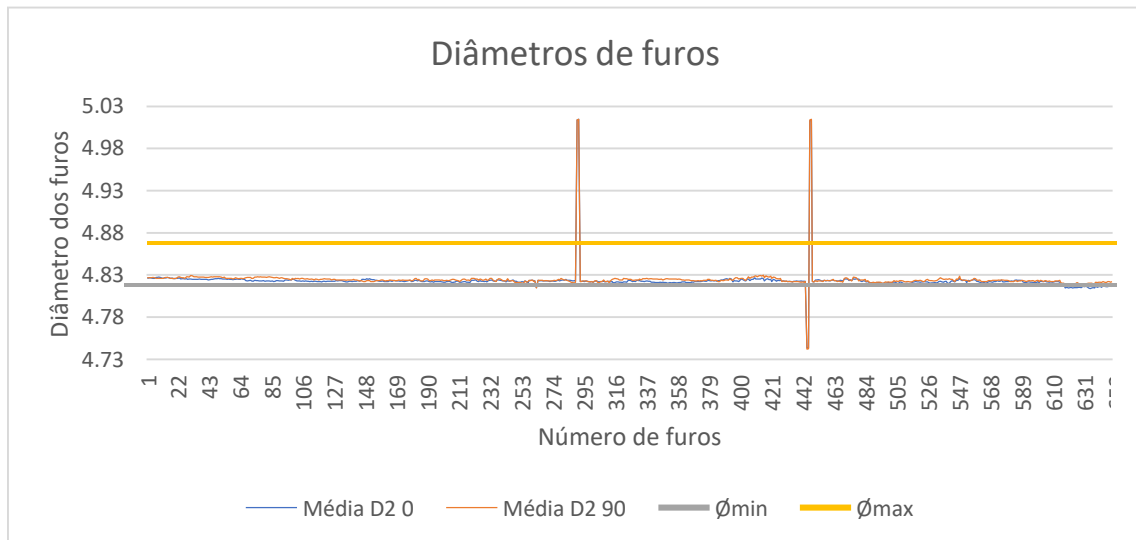


Figura 33. Diâmetro dos vários furos no segundo bloco de material.

3.3 UAB130-06

Nos três gráficos abaixo mencionados, encontramos o ciclo de vida de várias ferramentas de corte, referentes a três tipos de brocas com diferentes características relativas à sua geometria, no entanto, possuindo o mesmo diâmetro.

A broca 1 e 2 realizam a furação no avião militar KC-390, já a broca 3 realiza furação no avião executivo PRAETOR. Estas ferramentas foram alvo de estudo por serem das mais utilizadas e também devido às variabilidades que apresentam entre elas, sendo utilizadas para o mesmo objetivo.

Inicialmente a broca 1 era a única ferramenta utilizada no KC390. Foi possível verificar que esta, ao realizar a furação, deixava o interior do furo com um acabamento de baixa qualidade para os requisitos de *one-up*. Este acabamento pode significar que, devido ao seu rápido desgaste, esta já não realizava o corte nas devidas condições ou simplesmente a qualidade da ferramenta de corte não seria o ideal para atender as necessidades produtivas.

Optou-se então por utilizar uma outra broca, com algumas alterações nas suas características, onde foi possível verificar que a qualidade do furo, em termos de aspeto visual, melhorou significativamente.

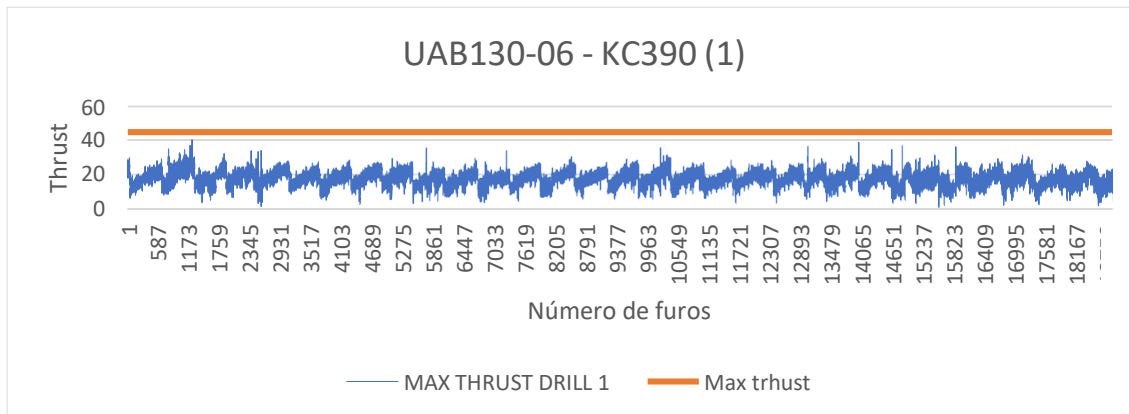


Figura 34. Ciclos de vida de várias ferramentas, variação do Thrust ao longo do tempo

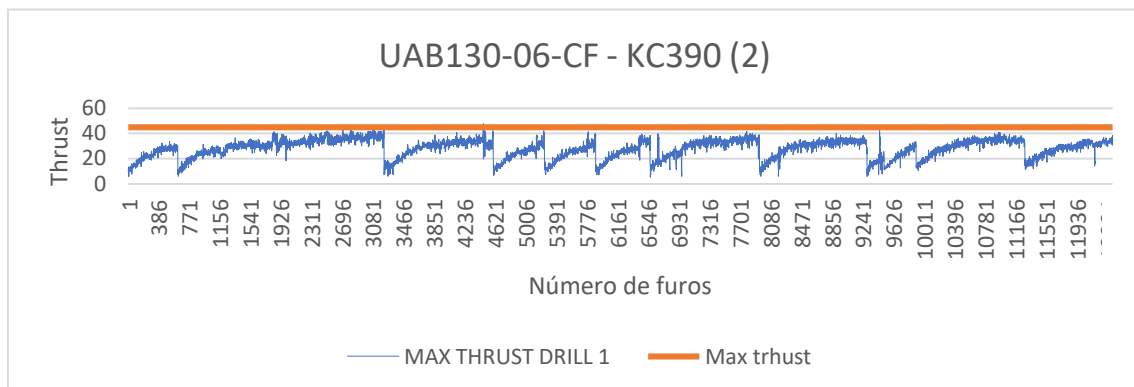


Figura 35. Ciclos de vida de várias ferramentas, variação do Thrust ao longo do tempo

A discrepância no número de ferramentas usadas foi por se verificar um aumento muito maior e mais rápido ao nível de *Thrust* na broca 2, representativo de um maior desgaste na ferramenta. Ambas tem o mesmo limite de *Max Thrust*, valor definido pelo fornecedor de modo que a ferramenta cumpra com os requisitos estabelecidos sem gerar não conformidades no produto.

A broca 2, em aproximadamente o mesmo número de furos atinge o *Max Thrust* permitido, enquanto a broca 1, ainda se encontra em perfeitas condições de utilização. Este acontecimento, deve-se em grande parte pela ferramenta UAB130-06 possuir um ângulo de ponta de 130°, enquanto na UAB130-06-CF o ângulo é de 90°. Como anteriormente descrito, o desgaste da ferramenta de corte está diretamente relacionado com o ângulo da ponta da broca. Quanto menor for o ângulo de ponta, maior será o

desgaste da ferramenta, o que vem apoiar o facto da ferramenta UAB130-06 realizar maior número de furos sem necessidade de exercer uma força axial tão grande.

Como é a ferramenta 1 a que possui maior probabilidade de poder ser aumentado o seu *tip life* (mm de furação realizados), será analisada a possibilidade de, durante os seus vários ciclos de vida, a broca possuir um comportamento estável a nível estatístico, comparando o seu desgaste com a variação dos diâmetros dos furos realizados. Este fator é bastante importante para a análise, pois caso se verifique que com o aumento do número de furos realizados o diâmetro dos furos se aproxime dos seus limites de tolerância, isto significa que a ferramenta já não possui as condições de trabalho impostas.

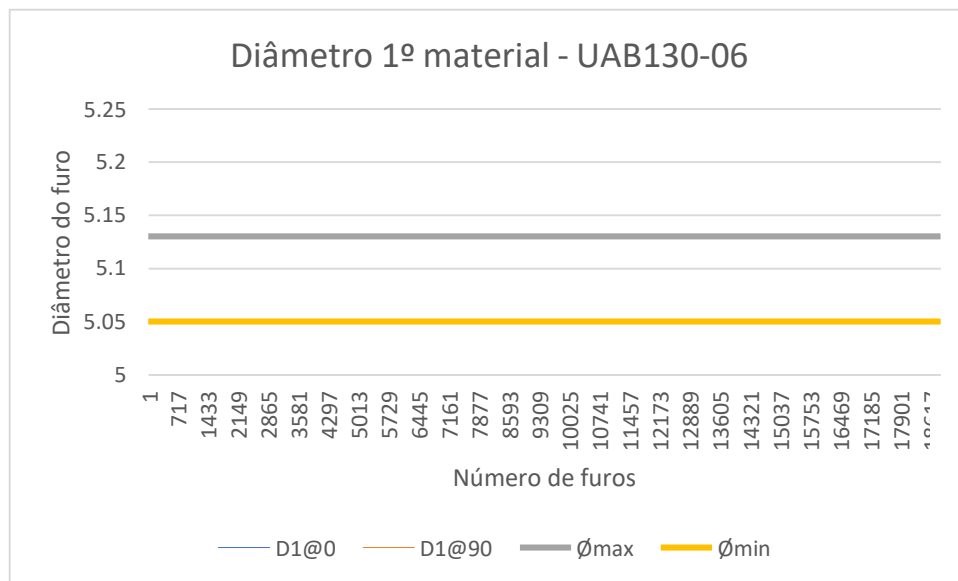


Figura 36. Diâmetro dos vários furos no primeiro bloco de material.

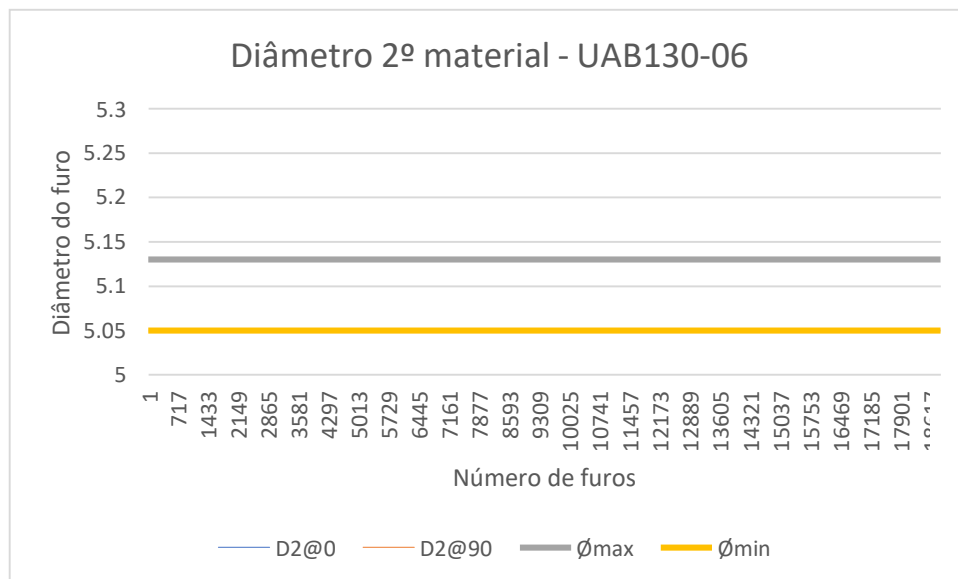


Figura 37. Diâmetro dos vários furos no segundo bloco de material.

Os gráficos acima mencionados, indicam os diâmetros medidos a 0 e 90° dos furos realizados pelas várias brocas, no 1º material e no 2º material.

Pode verificar-se que a maioria dos valores medidos se encontram dentro da tolerância definida, muitos deles com grande margem. No entanto também se verifica que há uma maior aproximação ao valor de tolerância mínimo, onde chega a sair fora de tolerância. Este efeito está relacionado com o desgaste da ferramenta, que ao desgastar as lâminas de corte torna o seu diâmetro menor, originando, furos de menores dimensões e de pior qualidade.

Relativamente à broca 2, pode observar-se que o segundo ciclo de vida é maior que os restantes. Isto acontece pelo operador utilizar duas vezes a mesma ferramenta, fazendo esta o dobro dos furos das restantes. Porém, para análise do seu comportamento foi bastante importante pois verifica-se que o seu valor de *Thrust* se aproxima do máximo estabelecido. Ao conjugar esta análise com o facto de o diâmetro dos furos apresentar uma tendência para o valor mínimo da sua tolerância, conclui-se que não haverá muita confiança no aumento de vida desta ferramenta na realização deste produto.

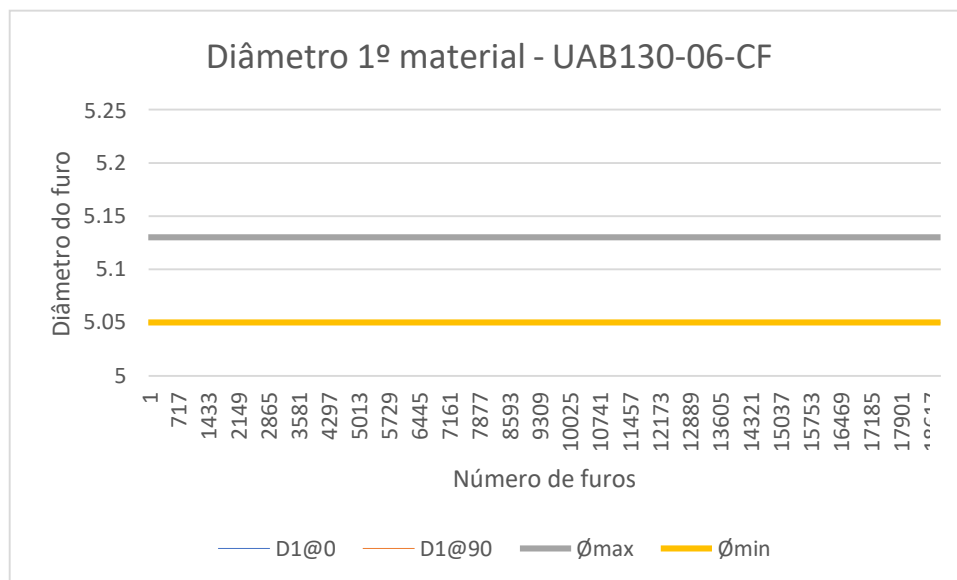


Figura 38. Diâmetro dos vários furos no primeiro bloco de material.

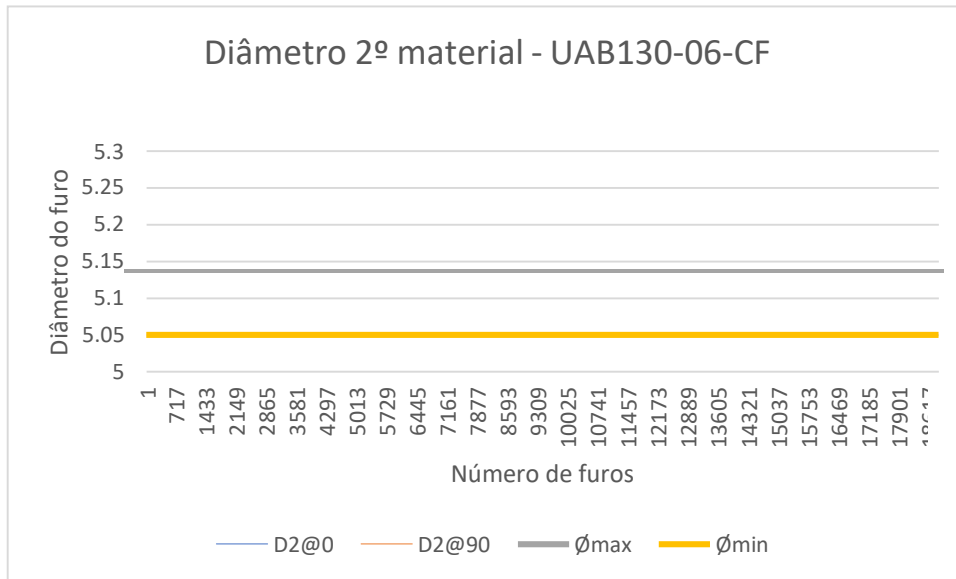


Figura 39. Diâmetro dos vários furos no segundo bloco de material.

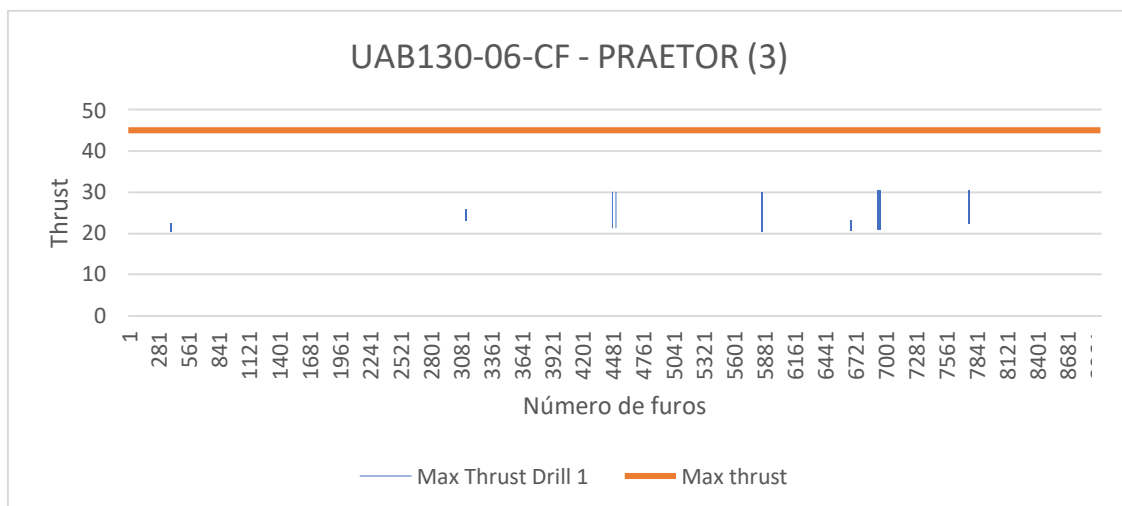


Figura 40. Ciclos de vida de várias ferramentas, variação do Thrust ao longo do tempo

Ao observar o comportamento da broca 3, pode observar-se que esta não apresenta tanto desgaste quanto as brocas 1 e 2, muito derivado da diferença que os revestimentos dos dois produtos apresentam.

Neste caso também é visível que durante o sexto ciclo de vida, a ferramenta duplicou o seu tempo de utilização, no entanto, o valor de *Thrust* atingido não está tão próximo do valor máximo, como é o caso das brocas 1 e 2.

Não sendo um indicador exato de aumento do seu ciclo de vida por apenas possuirmos uma amostra, pode indicar que possivelmente a ferramenta está a ser descartada ainda em perfeitas condições de utilização.

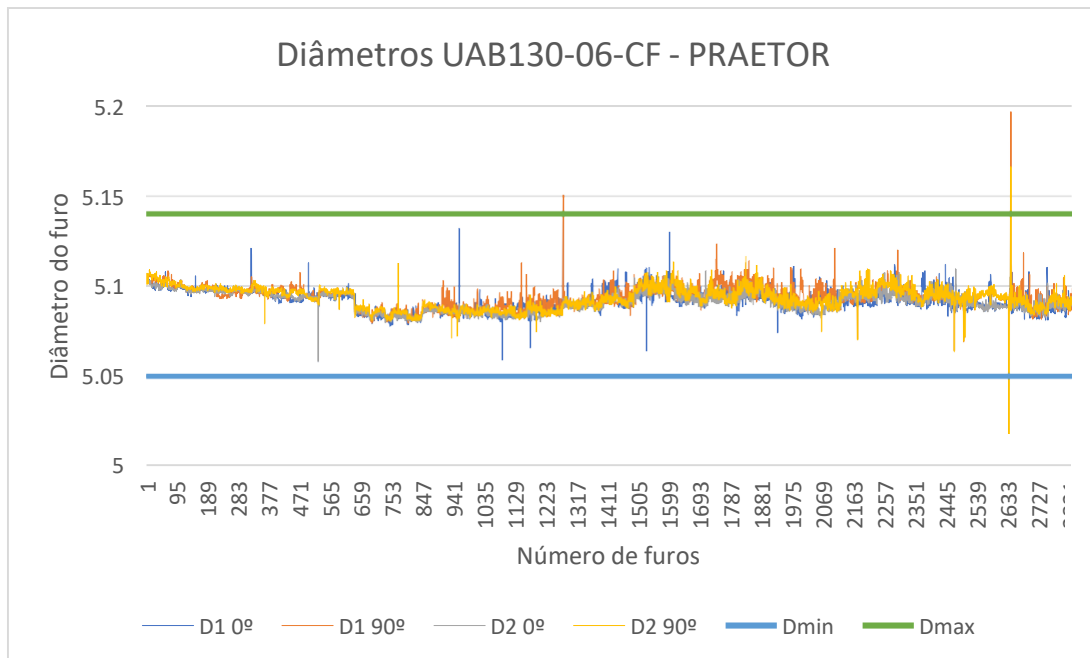


Figura 41. Valores de diâmetros dos furos das várias brocas utilizadas.

Como podemos observar no gráfico acima representado, durante o ciclo de vida em que a sua vida foi duplicada, verifica-se uma pequena variação do valor dos diâmetros, no entanto, possuindo ainda uma margem bastante elevada relativamente ao valor permitindo. Esta ferramenta, com base nos dados observados, pode ser alvo de um aumento da sua vida útil sem gerar custos de não qualidade. Sugeriria um aumento para o dobro do seu *tip life*. Uma vez que apenas possuimos uma amostra do seu comportamento, após a realização de mais ciclos de vida da ferramenta, esta possivelmente ao realizar mais 50% do número de furos ainda permite a realização de furação dentro dos parâmetros de tolerância.

3.4 HST13-10

A ferramenta representada, trata-se de um alargador que tem como função alargar um pré-furo anteriormente realizado por outra broca para o diâmetro solicitado.

Será feita uma análise deste alargador por dois motivos: o seu preço bastante elevado e a baixa quantidade de furos que o mesmo realiza. Esta ferramenta é descartada várias vezes, realizando aproximadamente 120 furos.

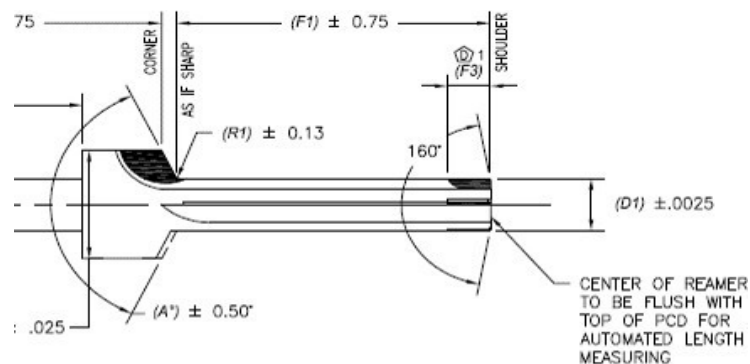


Figura 42. Geometria da ferramenta HST13-10

Como podemos observar no gráfico 43, é uma ferramenta substituída por contantemente atingir o seu valor de *Max Thrust*, mostrando que as suas lâminas de corte sofrem desgaste bastante rápido. Muitas vezes, esta substituição constante, deve-se às características do material onde executa a furação, sendo uma placa de carbono com uma espessura considerável e um bloco de titânio. Com base nos dados anteriormente fornecidos pelo robot, será analisado a possibilidade deste *Max Thrust* ser aumentado. Para tal o processo terá de estar em plenas condições de funcionamento e longe de originar uma não conformidade.

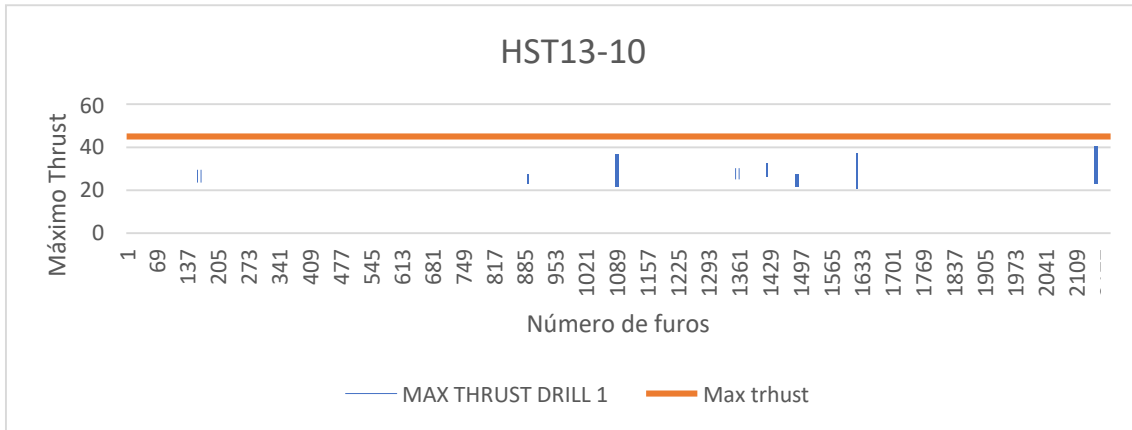


Figura 43. Ciclos de vida de várias ferramentas, variação do Thrust ao longo do tempo

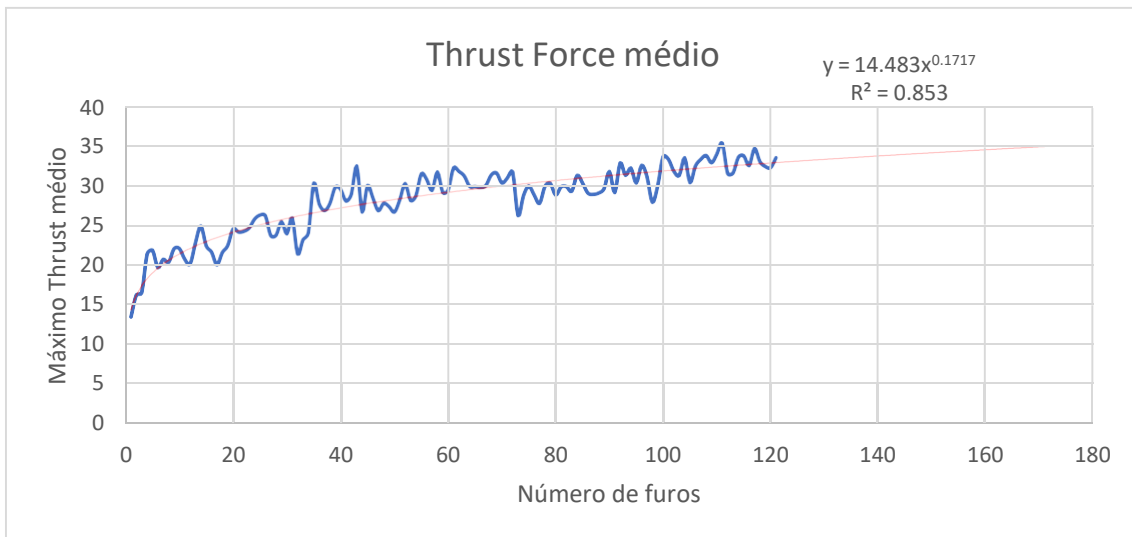


Figura 44. Representação média de um ciclo de vida da ferramenta HST13-10

Trata-se de uma ferramenta de corte que, em média, possui uma vida inferior às restantes ferramentas analisadas, muito por não realizar um processo de furação como as restantes, mas sim alargar um pré furo já existente.

Apesar de possuir poucos dados para análise, observa-se um aumento bastante rápido da sua força realizada durante o processo, indicando possivelmente um rápido desgaste das arestas de corte, no entanto, como se trata de um alargador que realiza o trabalho em titânio, é espectável esse desgaste. A sua linha de tendência apresenta o comportamento previsto, verificando-se a passagem do estado I para o estado II, ao fim de aproximadamente 30 furos. Possui um R^2 relativamente próximo de 1, indicando que a linha de tendência se ajusta aos dados reais, podendo deste modo gerar uma pequena

previsão da continuidade da função originada pela linha, em que atinge os 35N ao fim de 170 furos realizados.

Figura 45. Histograma de valores de Thrust máximo.

Um aspeto interessante, deve se ao facto do histograma referente aos valores médios dos furos alargados pelas várias ferramentas, possuir um bom ajuste, no entanto ligeiramente assimétrico, devido ao facto de os dados possuírem uma tolerância (*Max Thrust*), não podendo este ser ultrapassado.

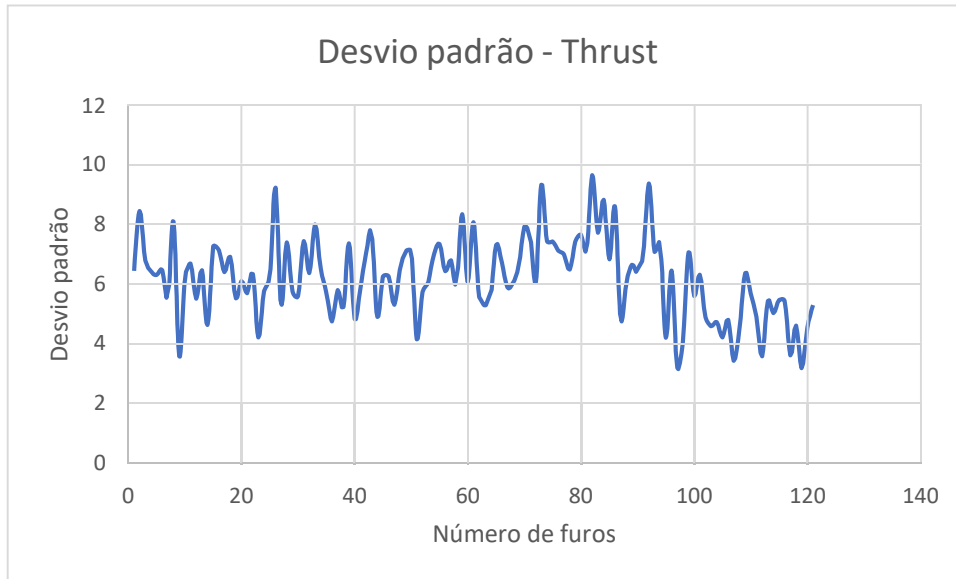


Figura 46. Desvio-Padrão em função do número de furos.

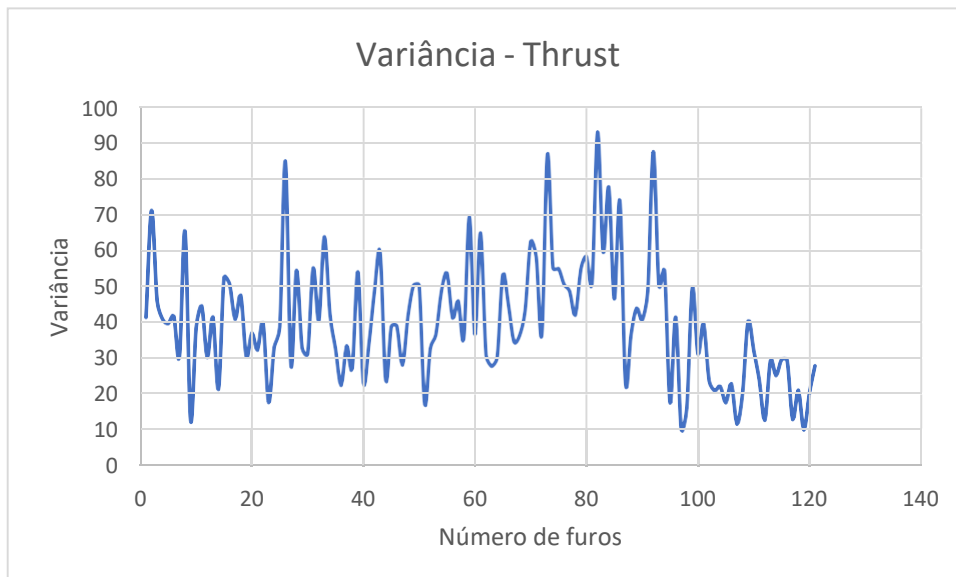


Figura 47. Variância em função do número de furos.

Os métodos representados pelos gráficos 46 e 47, indicam-nos a regularidade do conjunto de dados, contudo, pela amostra possuída ser pequena, estes não permitem qualquer tipo de análise.

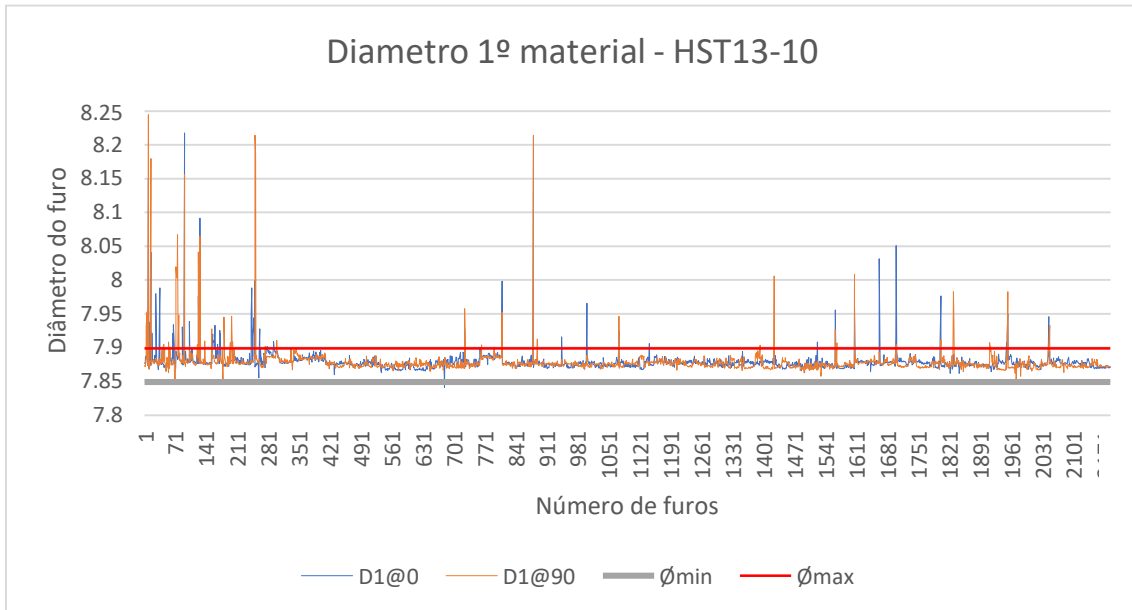


Figura 48. Diâmetro dos vários furos no primeiro bloco de material.

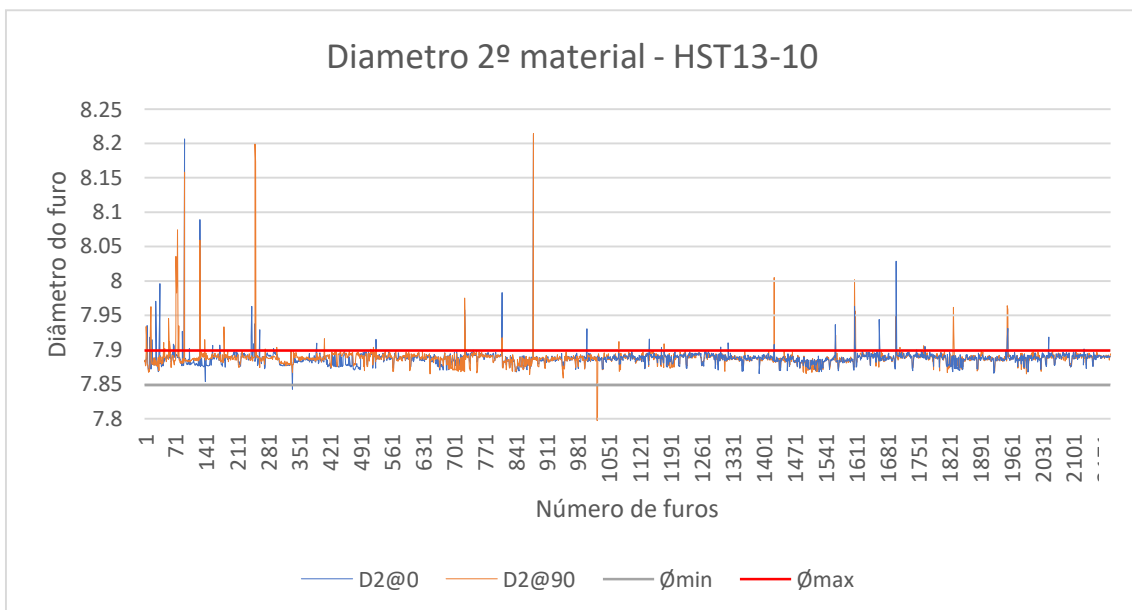


Figura 49. Diâmetro dos vários furos no segundo bloco de material.

Os gráficos 48 e 49 representam o valor médio do diâmetro de cada furo das várias brocas no primeiro e segundo bloco de material. O segundo material é titânio, material que desgasta bastante a ferramenta devido às suas características físicas e deste modo consegue-se obter um registo dos valores de uma broca mais exatos. Pode observar-se que, desde o primeiro furo, o alargador deixa os furos muito próximos da máxima tolerância admissível, verificando-se a ocorrência de furos fora de tolerância. Isto em

termos médios, pois se olharmos para os gráficos 50 e 51, onde se observa o comportamento dos vários alargadores utilizados, verificam-se vários furos fora de tolerância.

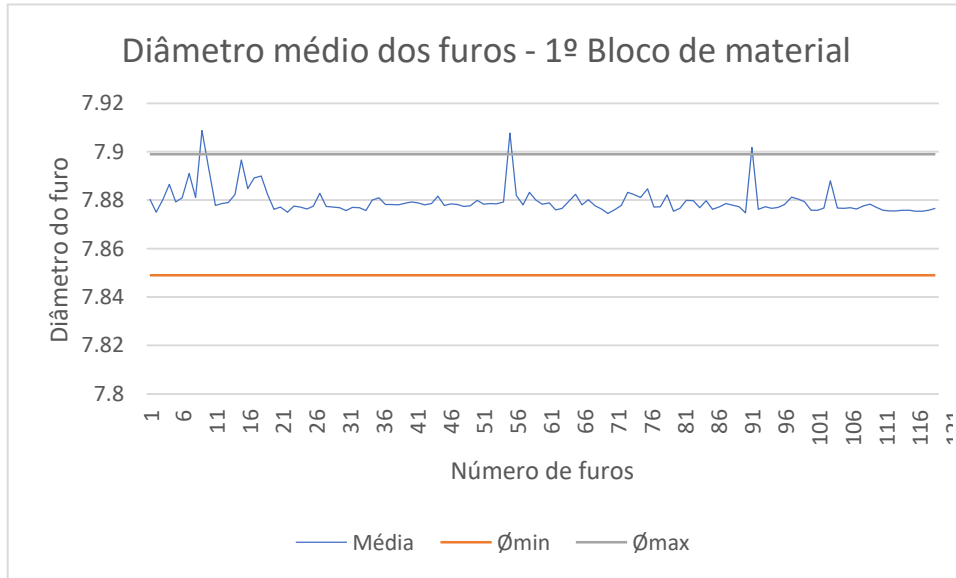


Figura 50. Representação média de diâmetros durante um ciclo de vida no primeiro bloco de material

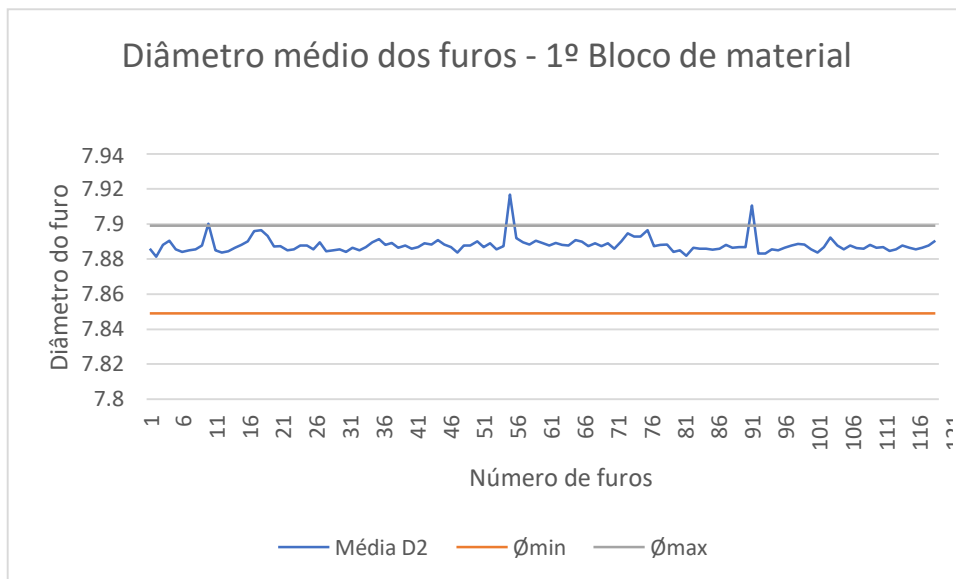


Figura 51. Representação média de diâmetros durante um ciclo de vida no segundo bloco de material

É possível concluir então que o método utilizado na realização deste furo não é viável. Este necessita de uma pré-furação, em que a ferramenta realiza uma baixa quantidade de furos, danificando-se rapidamente e o próprio alargador que possui um preço bastante

elevado quando comparado com a qualidade fornecida. Esta ferramenta, não possui condições de aumento de vida útil e seria importante repensar num processo mais vantajoso para a sua realização.

4. Dificuldades Encontradas

O presente relatório de estágio, tinha como objetivo o aumento de vida útil das ferramentas de corte dos robots, sem gerar custos de não qualidade. Este estudo passaria por uma abordagem estatística de modo a prever o comportamento futuro dessas mesmas ferramentas, com base em dados fornecidos pelo sistema robótico.

4.1 Machine Learning

Inicialmente tentou-se uma abordagem via *Machine Learning*. Este método é aplicado através de algoritmos, ajudando a explorar, analisar e localizar um conjunto de dados complexos. Cada algoritmo é um conjunto finito de instruções passo a passo inequívocas que um computador pode seguir para atingir um determinado objetivo. O seu principal objetivo, é estabelecer ou descobrir padrões de modo a ser possível realizar previsões ou categorizar informação. Estes algoritmos, utilizam parâmetros baseados em dados de preparação, um subconjunto de dados que representa o conjunto maior. À medida que estes dados se expandem, o algoritmo calcula resultados mais precisos.

Existem vários algoritmos no que toca à análise de dados, são exemplos: a aprendizagem supervisionada, não supervisionada e a aprendizagem por esforço. Estes utilizam a regressão e a classificação para prever categorias no destino, localizar pontos de dados invulgares, prever valores e descobrir semelhanças.

Ao submeter os dados aos algoritmos acima mencionados, estes tentaram cruzar a informação de variáveis que possam ter influência no desgaste da ferramenta, tais como, *Max Thrust*, diâmetros dos furos, escareado, *Clamp*, Quantidade de material perfurado, onde o resultado nunca foi satisfatório, pois os dados são insuficientes ou não são os ideais para realizar qualquer tipo de previsão ou até mesmo descobrir algum tipo de semelhanças entre eles.

4.2 Equações Diferenciais Estocásticas

Após o insucesso do método acima mencionado, analisou-se a possibilidade de previsão de vida da ferramenta através das equações diferenciais estocásticas. Este tipo de equações poderia ser a solução para o problema proposto pelas características dos dados possuídos serem bastante aleatórios.

De uma forma bastante resumida, as equações diferenciais estocásticas são equações diferenciais com um termo estocástico adicional. O termo determinístico, descreve o comportamento dinâmico “médio” do fenómeno em estudo e o termo estocástico descreve o “ruído”, ou seja, as suas perturbações aleatórias ao longo do tempo [30]. São exemplo as cotações de ações na bolsa de valores em que os seus gráficos se assemelham aos obtidos neste estudo, no entanto a falta de dados neste estudo não permite uma análise idêntica.

Contudo, não foi possível a utilização deste método pois não se verifica uma descrição multifatorial (passado, presente e futuro) nos dados fornecidos pelo sistema robótico. Assim sendo não é possível prever o comportamento futuro, nem em como esse pode ser afetado pelas condições impostas pelo meio.

Para que este método ou o *Machine Learning* fossem possível de ser utilizados seria necessário realizar vários ciclos de vida das ferramentas de corte de modo a analisar o seu comportamento ao longo do tempo, adição de variáveis como medição do nível de desgaste da ferramenta, torque, diferentes avanços e velocidades de rotação, por exemplo,

5. Trabalhos Futuros

Um dos principais entraves aquando da realização deste estudo, foi o de se tratar de uma indústria bastante rigorosa e criteriosa, em que o custo de ensaios requer um grande investimento, tanto a nível de material como de pessoal.

Para que seja possível a realização do trabalho inicialmente proposto, uma previsão estatística do fim de vida das ferramentas de corte, seria necessário que as ferramentas em estudo realizassem o seu ciclo de vida completo sem serem substituídas. Só assim, se

terá conhecimento do seu comportamento ao longo do tempo, medindo o seu desgaste inicial e final. Deste modo, a utilização de equações diferenciais estocásticas seria um método possível.

Outro estudo que seria interessante, mas também bastante difícil de se realizar, seria observar o comportamento da força axial e do desgaste da ferramenta com a variação de parâmetros, tais como o avanço, velocidade de corte, etc... Esta variabilidade de parâmetros, permitiria a algoritmos de *machine learning* possuírem dados suficientes para cruzar informações e através de árvores de decisão, obter um resultado de qual a variável que influencia mais no desgaste da ferramenta, obtendo assim um valor ótimo, aumentando assim a vida da ferramenta.

Um estudo mais empírico seria a continuação do presente relatório de estágio, aumentando o *Max Thrust* e o *tip life* das ferramentas com margem de aumento do seu ciclo de vida, e posteriormente analisar o seu comportamento. Baseado depois nessa análise poderiam estar a sofrer outro aumento caso fosse viável.

6. Conclusões

A informação contida neste relatório foi alvo de manipulação (fator de multiplicação), pois no ramo da Aeronáutica a informação é bastante controlada e restrita, no entanto em nada altera as conclusões obtidas.

Este estudo tinha como principal objetivo, o aumento de vida útil das ferramentas de corte sem gerar custos de não qualidade, infelizmente devido a diversos fatores anteriormente mencionados, não foi possível através dos métodos que gostaria.

Foi analisado o comportamento de quatro ferramentas de corte: três brocas helicoidais e um alargador de alta precisão. Esta análise foi realizada através da média da força axial de cada furo das várias brocas, desvio-padrão, variância e histograma, comparando estes dados com os valores dos diâmetros medidos ao longo do número de furos, observando qual o nível de desgaste da ferramenta. Este estudo originou as seguintes conclusões:

- A ferramenta **UAB130-05-CF**, de entre todas as analisadas, é a que possui claramente maior margem de progressão no que toca ao seu aumento de vida útil.

Uma hipótese plausível é a de existir pouco conhecimento referente ao comportamento da ferramenta após a realização de 1800 furos. Em média, seria aumentar o seu *tip life* para o dobro durante uma determinada quantidade de amostras (brocas) e caso não se verifique nenhum tipo de não conformidade, seria interessante aumentar a vida útil desta ferramenta para três vezes o seu *tip life* inicial, tendo em conta a qualidade e robustez dos dados apresentados.

- Apesar de esta ser uma das ferramentas das quais se esperava um aumento na sua vida útil, com base nos dados anteriormente descritos, conclui-se que a ferramenta **HST315-06-KL**, não possui condições para realizar um maior número de furos sem originar custos de não qualidade, pelos diâmetros dos furos realizados estarem bastante próximos do limite mínimo de tolerância. A ferramenta ao sofrer desgaste terá uma tendência para que esse limite seja ultrapassado bastante rápido.
- Nas ferramentas **UAB130-06** e **UAB130-06-CF** do avião C-390, não será possível aumentar os seus ciclos de vida, não possuindo estas condições para tal. Pelo contrário, mas referente ao avião *Praetor 550*, a ferramenta UAB130-06-CF, após análise dos dados fornecidos, possui uma grande margem de progressão no que toca ao seu tempo de vida, fazendo esta seguramente o dobro dos milímetros de furação realizados. Posteriormente, caso se verifique a continuidade da sua estabilidade, esta poderá sofrer outro aumento no seu *tip life*.
- A ferramenta **HST13-10**, não possui condições de aumento de vida útil e seria importante repensar num processo mais vantajoso para a sua realização, pois tanto a ferramenta que realiza a sua pré-furação como o próprio alargador, ficam muito aquém de realizar os seus processos conforme previsto. Nestes casos, em que se verifica necessidade de realizar um pré-furo e posteriormente passar um alargador, seria interessante uma ferramenta *one shot*, que realizasse a furação deixando o furo no diâmetro pretendido, com uma única utilização. Assim seria possível trazer vantagens tanto a nível económico como de ganho de tempo.

Referências Bibliográficas

- [1] Guimarães, J., Baptista, A. M., Lino, F. J., Gonçalves, D. J. S., Durão, L. M. P., & Almeida, J. (2009). Desenvolvimento de ferramentas de corte para a furação de laminados compósitos. *JLBL 2009*.
- [2] L. M. P. Durão, J. M. R. S. Tavares, A. T. Marques, A. G. Magalhães, and M. Figueiredo, “Estudo da Furação de Laminados Carbono/Epóxido com Diferentes Brocas,” 2004.
- [3] R. Q. Sardiñas, P. Reis, and J. P. Davim, “Multi-objective optimization of cutting parameters for drilling laminate composite materials by using genetic algorithms,” *Composites Science and Technology*, vol. 66, no. 15, pp. 3083–3088, Dec. 2006.
- [4] I. S. Shyha, D. K. Aspinwall, S. L. Soo, and S. Bradley, “Drill geometry and operating effects when cutting small diameter holes in CFRP,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, no. 12–13, pp. 1008–1014, Oct. 2009.
- [5] J. Sedlacek and M. Slany, “ANALYSIS OF DELAMINATION IN DRILLING OF COMPOSITE MATERIALS,” *MM Science Journal*, Jun-2010.
- [6] S. C. Lin and I. K. Chen, “Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed,” *Wear*, vol. 194, no. 1–2, pp. 156–162, Jun. 1996.
- [7] S.-C. Lin and J.-M. Shen, “Drilling Unidirectional Glass Fiber-Reinforced Composite Materials at High Speed,” *Journal of Composite Materials*, vol. 33, no. 9, pp. 827–851, May 1999.
- [8] S. Rawat and H. Attia, “Characterization of the dry high speed drilling process of woven composites using Machinability Maps approach,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 1, pp. 105–108, 2009
- [9] S. Rawat and H. Attia, “Wear mechanisms and tool life management of WC–Co drills during dry high-speed drilling of woven carbon fiber composites,” *Wear*, vol. 267, no. 5–8, pp. 1022–1030, Jun. 2009

- [10] D. Iliescu, D. Gehin, M. E. Gutierrez, and F. Girot, “Modeling and tool wear in drilling of CFRP,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 50, no. 2, pp. 204–213, Feb. 2010.
- [11] DE ALMEIDA, D. T., DE SOUZA, J. H., & STIEGEMEIER, R. Desgaste de broca helicoidal de metal duro na furação de aço ferramenta VF800 AT.
- [12] Rodrigues, M. Â. M. (2018). Furação Orbital de Compósitos Híbridos Aço/CFRP.
- [13] Gardiner, G. Hole Ambitions! Optimize? Customize? (2012). Acedido em março de 2018, em: <https://www.compositesworld.com/articles/hole-ambitions-optimize-customize>.
- [14] Valente, P. A. L. (2012). *Juntas mecânicas em material compósito* (Doctoral dissertation).
- [15] Poulachon, G., Outeiro, J., Ramirez, C., André, V., & Abrivard, G. (2016). Hole surface topography and tool wear in CFRP drilling. *Procedia CIRP*, 45, 35-38.
- [16] Loureiro, P. A. M. (2020). Otimização da utilização de ferramentas de corte em fresagem CNC.
- [17] Davim, J. P., & Reis, P. MAQUINAGEM ECOLÓGICA: FURAÇÃO DE ALUMÍNIO CÔM LUBRIFICAÇÃO MÍNIMA.
- [18] Ferreira, A. B. D. S. (2019). *Gestão de ferramentas de corte em processos produtivos: seleção e definição do ciclo de vida* (Doctoral dissertation, Universidade de Coimbra).
- [19] Tsao, C. C., & Chiu, Y. C. (2011). Evaluation of drilling parameters on thrust force in drilling carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite laminates using compound core-special drills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(9), 740-744.
- [20] da Costa Marques, F. (2021). Maquinagem de materiais multicamadas Al-CFRP.
- [21] Durão, L. M. P., Magalhães, A. G., Marques, A. T., & Tavares, J. M. R. (2009). Influência dos parâmetros de maquinagem no dano de placas compósitas.

- [22] Geier, N., Davim, J. P., & Szalay, T. (2019). Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125, 105552.
- [23] Hocheng, H., & Tsao, C. C. (2005). The path towards delamination-free drilling of composite materials. *Journal of materials processing technology*, 167(2-3), 251-264.
- [24] Durão, L. M., Gonçalves, D. J., de Albuquerque, V. H., & Tavares, J. M. R. (2010). Avaliação da delaminação após furação em compósitos laminados. *Encontro Nacional de Materiais e Estruturas Compósitas (ECMEC2010)*.
- [25] Rodrigues, M. Â. M. (2018). Furação Orbital de Compósitos Híbridos Aço/CFRP.
- [26] Zitoune, R., Krishnaraj, V., & Collombet, F. (2010). Study of drilling of composite material and aluminium stack. *Composite structures*, 92(5), 1246-1255.
- [27] Canuto, I. W. D. S. (2022). Análise dos desvios geométricos e desgaste da ferramenta no processo de furação de um aço AISI 1045 com broca helicoidal de aço rápido.
- [28] Teixeira, T. A. D. S. (2017). *Análise de tensões em materiais compósitos sob furação utilizando diferentes tamanhos de ferramentas de corte* (Doctoral dissertation).
- [29] Batista, M. F., Basso, I., Rodrigues, A. R., & Arai, R. (2019). Estudo comparativo de geometrias de ferramentas para furação de placas de fibra de carbono. *Anais*.
- [30] Braumann, C. A. (2005). Introdução as Equações Diferenciais Estocásticas e Aplicações. *Sociedade Portuguesa de Estatística, Ericeira, Portugal*, 190.
- [31] Romano, V., & Dutra, M. (2002). Introdução a robótica industrial. *Robótica Industrial: Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processo, São Paulo: Edgard Blücher*, 1-19.