

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA  
UNIDADE DE PÓS-GRADUAÇÃO, EXTENSÃO E PESQUISA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E TECNOLOGIA  
EM SISTEMAS PRODUTIVOS

KLEBERSON CARTOLARI DE SOUZA

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE FURAÇÃO EM DIFERENTES LIGAS METÁLICAS

São Paulo

Dezembro/ 2016

KLEBERSON CARTOLARI DE SOUZA

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE FURAÇÃO EM DIFERENTES LIGAS METÁLICAS

Dissertação apresentada como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, no Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos, sob a orientação do Prof. Dr. Humber Furlan.

São Paulo

Dezembro /2016

KLEBERSON CARTOLARI DE SOUZA

# CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE FURAÇÃO EM DIFERENTES LIGAS METÁLICAS

---

Prof. Dr. Humber Furlan

---

Prof. Dr. Daniel Iwao Suyama

---

Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi

São Paulo, 20 de Dezembro de 2016

## **Dedicatória**

Dedico este mestrado à minha esposa e meus filhos por toda compreensão, envolvimento e incentivo.

À minha família que sempre me incentivou a acreditar em meus sonhos, em especial aos meus pais e avós pelas constantes conversas e ensinamentos sobre suas experiências fundamentais para minha.

Ao Sr. Graciliano Lima e a Sra. Isabel Marques Lima, pela contribuição muito importante sem a qual o trabalho se tornaria lento.

## Mensagens

*Quem fica de joelhos diante e Deus,  
fica de pé diante de qualquer coisa.*  
“Desconhecido”

*“Tenha em mente que tudo que você aprende na escola é trabalho de muitas  
gerações. Receba essa herança, honre-a, acrescente a ela e, um dia, fielmente,  
deposite-a nas mãos de seus filhos”*  
“Albert Eistein”

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a DEUS que sempre me guiou e iluminou, colocando as pessoas certas em meu caminho.

Ao Prof. Dr. Humber Furlan pelos conhecimentos adquiridos, pelo profissionalismo como professor e orientador por acreditar, motivar e incentivar a concepção e construção deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Henrique Küll Neto pela ajuda e colaboração com suas considerações sobre o trabalho.

A Faculdade de Tecnologia de São Paulo, por ceder os seus laboratórios e toda a ajuda dispensada sem o qual a realização deste trabalho seria inviável.

Aos meus amigos da Faculdade de Tecnologia de São Paulo pela amizade e companheirismo, pelos momentos de apoio, incentivo e descontração.

Aos amigos e colaboradores: Ricardo Freitas, Leandro Marinello, Wagner Aneas, Eriton Ciqueira Frias, Elso da Silva Júnior, Pitágoras Marques, André Felipe dos Santos, Ricardo Vagner dos Santos, Marcelo Barbosa.

As empresas: ISCAR do Brasil Ferramentas de Corte, MMC Metal do Brasil, TDC TOOLS, Metalpó Ind. e Comércio, Marques Solda e Erosão, Evolufer Ferramentaria e Usinagem.

## RESUMO

SOUZA, K. C. **Contribuição ao estudo de furação em diferentes ligas metálicas.**

Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos).

Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2016.

A medição da temperatura durante a usinagem é uma importante contribuição para determinação do tipo de ferramenta que será utilizada para a execução de um determinado trabalho. O calor gerado durante o processo de usinagem, quando em excesso, pode acelerar os mecanismos de desgaste da ferramenta favorecendo a quebra e dificultando a usinagem. O presente trabalho tem por objetivo principal, efetuar a medição da temperatura de uma broca durante a usinagem das ligas metálicas alumínio AA 2011F, Latão C 360 e aço SAE 1020. Para realização dos estudos foram feitos experimentos com no mínimo uma réplica para cada material. O sensor utilizado para captação dos dados de temperatura foi um termopar tipo k inserido no centro de uma broca intercambiável de metal duro, estando este isolado da influência de fatores externos quantificando somente a temperatura da ferramenta. Foi escolhida a usinagem sem fluido de refrigeração para não haver influência na medição do fenômeno. Além dos dados de temperatura foram coletados também sinais referentes a força axial e momento torsor coletados por um dinamômetro adaptado a um torno mecânico. Os sinais enviados pelo dinamômetro e pelo termopar foram dirigidos a um aquisitor construído com a plataforma Arduino preparada para possibilitar a organização destes dados em uma tabela, afim de se poder analisar estas informações com tratamento estatístico. Através do arranjo criado, foi possível verificar a variação da temperatura e dos esforços de usinagem, em função da alteração dos parâmetros de corte. Com os resultados obtidos foi possível avaliar o comportamento da temperatura na ferramenta e sua taxa de crescimento ao longo do percurso de usinagem, comprovando a eficácia do método proposto. Os resultados preliminares indicaram uma influência maior do avanço para o aumento da temperatura se comparado a rotação.

**Palavras-chave:** Furação, Temperatura, Esforços de Usinagem, Arduino, Ligas Metálicas.

## **ABSTRACT**

The measurement of the temperature during machining is an important contribution to determine the type of tool that will be used for the execution of a given work. The heat generated during the machining process, when in excess, can accelerate the wear mechanisms of the tool favoring the breakage and making difficult the machining. The main objective of this work is to measure the temperature of a drill bit during machining of the aluminum alloys AA 2011F, Brass C 360 and SAE 1020 steel. For the accomplishment of the studies, at least one replicate was made for each material. The sensor used to capture the temperature data was a k-type thermocouple inserted in the center of an interchangeable carbide drill bit, which was isolated from the influence of external factors by quantifying only the temperature of the tool. Dry machining was chosen to avoid influencing the measurement of the phenomenon. In addition to the temperature data, signals were also collected referring to the axial force and torque obtained by a dynamometer adapted to a lathe. The signals sent by the dynamometer and the thermocouple were directed to a receiver built with the Arduino platform prepared to enable the organization of these data in a table, in order to be able to analyze this information with statistical treatment. Through the arrangement created, it was possible to verify the variation of the temperature and of the machining efforts, due to the alteration of the cutting parameters. With the obtained results it was possible to evaluate the behavior of the temperature in the tool and its growth rate along the machining path, proving the effectiveness of the proposed method. Preliminary results indicated a greater influence of feedrate for temperature increase compared to rotation.

**Keywords:** Drilling, Temperature, Machining Forces, Arduino, Metallic Alloys.



## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Composição química normalizada para o aço SAE 1020.....	20
Tabela 2 - Coeficiente para cálculos de esforços na furação em cheio.....	48
Tabela 3 - Limites de erros entre os termopares segundo a norma ANSI MC 96.1 ..	56
Tabela 4 - Informações referentes aos diversos tipos de medição encontrados na literatura.....	59
Tabela 5 - Composição química normalizada para as ligas estudadas.....	68
Tabela 6 - Relação rotação x avanços utilizados nos ensaios de Alumínio AA2011F e Latão C360. ....	82
Tabela 7 - Relação rotação x avanços utilizados nos ensaios do Aço SAE1020. ....	83

## Lista de Figuras

Figura 1 - Gráfico do n° de publicações x ano .....	10
Figura 2 - Classificação das Ligas de Alumínio .....	17
Figura 3 - Classificação para o aço em função da dureza e tipo de liga .....	20
Figura 4 - Conceito de velocidade de corte em furação .....	28
Figura 5 - a) Processo de formação de cavaco e b) microscopia eletrônica da deformação do cavaco.....	30
Figura 6 - Área de contato cavaco-ferramenta.....	31
Figura 7 - Zona de fluxo dentro do cavaco .....	32
Figura 8 - Exemplos de afiações e diminuição da influência da aresta transversal. ...	33
Figura 9 - Formação do cavaco na aresta transversal, a) secção da aresta transversal e b) cavaco formado durante o corte .....	34
Figura 10 - a) Direção do fluxo de cavaco entre A e B; b) modelo de curvatura do cavaco e c) fragmento real de cavaco .....	34
Figura 11 - Formas de cavaco produzido na usinagem .....	36
Figura 12 - Formas de cavaco produzido na furação.....	36
Figura 13 - Gráfico de dureza do material da ferramenta versus Temperatura .....	38
Figura 14 - Gráfico de resistência a flexão do material da ferramenta versus Dureza Vickers Fonte: (adaptado de Astakhov, 2014).....	39
Figura 15 - Apresenta a evolução na forma de construção das brocas inteiriças conferindo – lhes melhor rigidez. ....	40
Figura 16 - Imagens representativas de tipos de broca, (a) ponta intercambiável com suporte, e (b) inteiriças. ....	41
Figura 17 - Representativa de tipos de broca e ângulos de ponta relacionados à aplicação. ....	43
Figura 18 - Ângulos principais e perfil específico de uma broca helicoidal.....	43
Figura 19 - Descrição da nomenclatura das brocas helicoidais. ....	44
Figura 20 - Estimativa das Forças atuantes na aresta de corte .....	45
Figura 21 - Representação de momento torsor e força de avanço .....	46
Figura 22 - Estimativa das Forças atuantes na aresta de corte .....	47
Figura 23 - Principais tipos de desgaste em Brocas .....	49
Figura 24 - Câmera infravermelha e imagem gerada em funcionamento.....	57
Figura 25 - Termômetro infravermelho e imagem da área de detecção em função da distância. ....	57

Figura 26 - Diferentes métodos de medição de temperatura. ....	58
Figura 27- Imagens de Dinamômetros comerciais.....	61
Figura 28 - Imagens de controladores de código livre: a) Waspote e.....	62
Figura 29 - Imagens de Shields a) é um transmissor ou receptor sem fio e a letra b) serve para anexar um relógio de tempo real e memória externa ambos podem ser acoplados no Arduino .....	63
Figura 30 - Corpo de prova utilizados nos ensaios de furação. ....	67
Figura 31- Máquina utilizada nos ensaios.....	69
Figura 32 - Ferramenta utilizada nos ensaios. ....	70
Figura 33 - Dinamômetro utilizado nos ensaios. ....	71
Figura 34 - As figuras a) e b) são referentes a o Arduino e o programa PLX- DAQ respectivamente. ....	72
Figura 35 - a) Termopar tipo K e b) Termômetro infravermelho .....	73
Figura 36 - Locação dos termopares na amostra .....	75
Figura 37- Gráfico de Temperatura x Tempo.....	76
Figura 38 - Suporte, patilha e termopar montados.....	78
Figura 39 - Representação em corte da pastilha com termopar inserido .....	79
Figura 40 - a) Termômetro infravermelho e b) distância em mm da face da castanha até a face do sensor. ....	81
Figura 41 - Dados médios obtidos durante os ensaios para comportamento da temperatura em função do tempo. ....	86
Figura 42 - Gráfico Temperatura x Tempo para o material de Alumínio AA2011F ....	87
Figura 43 - Gráficos de efeitos para a liga de alumínio AA2011F. ....	90
Figura 44 - Gráficos de efeitos para a liga de alumínio AA2011F. ....	90
Figura 45 -Gráfico Temperatura da superfície oposta ao início da furação x Tempo para o material de Alumínio AA 2011F .....	91
Figura 46 - Gráfico Temperatura x Tempo para o material de Latão C360 .....	93
Figura 47 - Gráfico de influência Temperatura para o material de Latão C360 .....	95
Figura 48 - Gráfico de influência Temperatura para o material de Latão C360 .....	95
Figura 49 - Gráfico Temperatura da superfície oposta ao início da furação x Tempo para o material de Latão C 360.....	96
Figura 50 - Gráfico Temperatura x Tempo para o material Aço SAE 1020 .....	97
Figura 51 - Gráfico de influência da temperatura para o material Aço SAE 1020 ....	98
Figura 52 - Gráfico Temperatura da superfície oposta ao início da furação x Tempo para o material Aço SAE 1020 .....	99
Figura 53 - Sequência de formação da rebarba tampa (cap burr).....	100

Figura 54 - Formas de cavacos dos ensaios de Alumínio obtidos durante a furação	101
Figura 55 - Formas de cavacos das ligas de Latão obtidos durante a furação.....	102
Figura 56 - Formas de cavacos de aço obtidos durante a furação.....	103
Figura 57 - Representação de força axial para o material de Alumínio .....	105
Figura 58 – Gráfico de efeitos principais para força de avanço no material de Alumínio AA2011F.....	106
Figura 59 - Representação de força axial para o material de Latão.....	106
Figura 60 - Gráfico de efeitos principais para força de avanço no material de Latão C360.....	107
Figura 61 - Representação de força para o material de aço .....	107
Figura 62 - Gráfico de efeitos principais para força de avanço no material de Aço SAE 1020.....	108
Figura 63 - Representação de torque para o material de Alumínio .....	109
Figura 64 - Gráfico de efeitos principais para Torque no material de Alumínio. ....	109
Figura 65 - Representação de torque para o material de latão .....	110
Figura 66 - Gráfico de efeitos principais para Torque no material de Latão. ....	111
Figura 67 - Representação de torque para o material de aço.....	111
Figura 68 - Gráfico de efeitos principais para Torque no material de Aço.....	112

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	8
1.1 QUESTÕES DE PESQUISA.....	14
1.2 HIPÓTESE .....	14
1.3 OBJETIVOS .....	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	15
2.1 MATERIAIS PARA USINAGEM.....	15
2.1.1 O alumínio .....	15
2.1.2 O Latão.....	18
2.1.3 Aço e suas Ligas.....	19
2.2 USINABILIDADE DAS LIGAS METÁLICAS.....	21
2.2.1 Usinabilidade do Alumínio.....	22
2.2.2 Usinabilidade do Latão.....	23
2.2.3 Usinabilidade do aço.....	24
2.3 PROCESSOS DE USINAGEM .....	25
2.3.1 Processo de Furação .....	27
2.4 MECANISMOS DA FORMAÇÃO DE CAVACO .....	29
2.4.1 Formação de cavaco na furação.....	32
2.4.2 Classificação do Cavaco.....	35
2.5 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS .....	37
2.6 BROCAS .....	39
2.6.1 Tipos de brocas .....	41
2.7 DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS DE CORTE. ....	46
2.8 DESGASTES EM BROCAS .....	49
2.9 TEMPERATURA.....	50
2.9.1 Temperaturas no processo de furação.....	52
2.10 Estudo e coleta das variáveis do processo .....	54
2.11 Técnicas utilizadas para aquisição de temperaturas no processo de furação .....	55

2.12 Controle da temperatura .....	55
2.13 Sensores óticos .....	56
2.14 Métodos de medição de temperatura.....	57
2.15 Sistema de aquisição de dados .....	60
2.16 Temperatura na interface de usinagem – Método da superfície de resposta	63
3. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....	67
3.1 Materiais .....	67
3.2 Máquinas e Equipamentos .....	68
3.2.1 Máquinas .....	69
3.2.2 Ferramenta .....	69
3.2.3 Equipamentos utilizados para realização dos ensaios .....	70
3.3 Aquisitor .....	71
3.3.1 Sensores para medição de temperatura .....	72
3.4 Metodologia dos ensaios .....	74
3.5 Planejamento experimental .....	82
3.5.1 Análise Fatorial.....	84
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	85
4.1 Ensaio preliminares .....	85
4.2 Análise da temperatura durante a usinagem.....	87
4.3 Esforços de corte.....	104
5. CONCLUSÕES .....	113
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	114
7. BIBLIOGRAFIA.....	115
ANEXOS .....	120

## 1. INTRODUÇÃO

A usinagem de materiais em suas diversas categorias é um dos pontos de maior concentração de recursos por uma empresa ou instituição que faça uso deste processo de fabricação. Segundo Wu e Ermer (1966), uma análise das condições econômicas para usinagem tem assumido importância em grande parte das empresas, principalmente na redução de custos com mão de obra, melhoria de processos e redução de sobremetal.

Usinar algo em uma análise geral implica em um investimento financeiro relativo, pois, é necessário remover material de uma dada matéria prima, com o uso de uma ferramenta que necessita de características diferenciadas e específicas ao material ao qual vai ser submetida. Esta por sua vez, estará contida em uma máquina de determinada potência, instrumentada e alocada em um ambiente previamente guarnecido de uma série de situações normatizadas e orientadas por leis e que será por fim operada por um profissional técnico habilitado para exercer a função ou as funções.

Em uma situação ideal qualquer técnica que possibilite a fabricação de um produto com as exigências e os cuidados inerentes à aplicação e desempenho, sem prejuízo, seria algo a se considerar como alternativa antes de se usinar este produto, pois, o investimento aplicado para se efetivar esta operação é alto em um conceito amplo, além do que, é potencializado pelo impacto ambiental causado.

No entanto esta técnica possui eficácia, necessidade de utilização e aceitação (SOUZA, 2011). Muitos produtos que são utilizados frequentemente por grande parte da população global, foram concebidos por usinagem, ou ainda, trouxeram em sua essência algum componente que recebeu ao menos uma operação de usinagem. Segundo Ferraresi (1977), usinagem pode ser definida como o trabalho de dar forma e dimensões desejadas aos materiais através da remoção de matéria em forma de cavaco.

A diversidade destas operações carrega em seu escopo estudos contemporâneos, presentes e pósteros com o intuito de diminuir estes custos e impactos oriundos dos processos.

O aprofundamento da pesquisa sobre o tema demonstra que alguns procedimentos têm melhorias significativas na coleta, levantamento e validação das variáveis que compõe a técnica de remoção de material, dedicados a revelar infortúnios que diminuam os ganhos, sejam eles de tempo ou capital (SOUZA, 1997).

A investigação de fatores desencadeadores de condições que levam à quebra de ferramentas, danos às máquinas operatrizes, aumento da produtividade e principalmente, deformidades, imperfeições, inexatidão ou imprecisão do produto são intento de empresas fabricantes de ferramentas e máquinas do setor, que fazem parcerias com instituições de ensino e pesquisa e empenham seus esforços por encontrar soluções aplicáveis a cada situação (NOVASKI *et al.*, 2009).

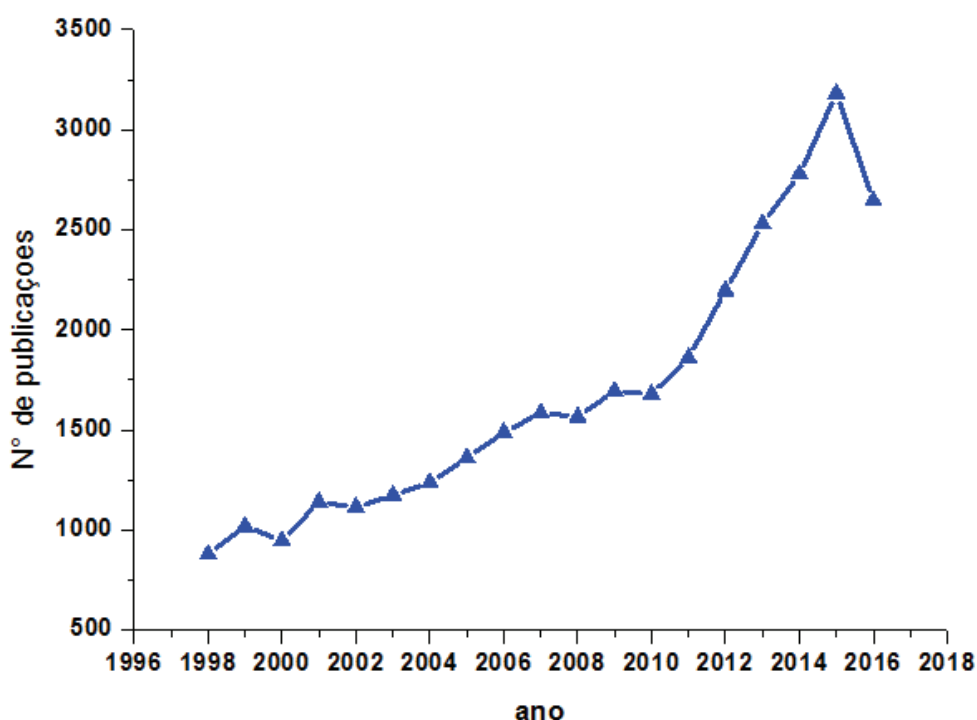
Tamanha necessidade obteve resultados positivos em um período de tempo relativamente curto, quando foram desenvolvidas técnicas, materiais e máquinas capazes de fornecer respostas muito próximas ao que se espera de algo ideal, eliminando assim fatores gritantes de limitação e, ao mesmo tempo, formando uma base para investigações mais apuradas sobre os elementos contidos nestas operações que influenciam nos resultados. Pode se somar a este fato as exigências de eficácia, de funcionalidade e redução de custos, hoje atribuída aos produtos, onde qualquer variável não pode ser descartada.

Dentre operações de usinagem, a furação é comprovadamente a que tem maior aplicabilidade e utilização rotineira na maioria dos produtos fabricados em todo mundo (NOVASKI, 1996).

O processo de furação tem uma representatividade estimada em 35% de todas as operações de usinagens executadas, isto porque, a grande maioria dos produtos necessita de um furo ou de outro processo que remeta a este anteriormente (MACHADO, 2009).

Tamanha expressão merece estudos específicos e aperfeiçoamentos constantes com o anseio de reduzir fatores que a tornam o processo dispendioso. No gráfico da figura 1 é possível visualizar o crescimento do número de publicações referentes ao processo de furação ao longo dos anos.





**Figura 1** - Gráfico do nº de publicações x ano  
**Fonte:** SCIENCE DIRECT, 2016.

Nos processos de usinagem são encontradas componentes variáveis de processos, que podem causar danos em ferramentas tais como: calor, atrito, abrasão, adesão e difusão. A determinação prévia destes fatores pode culminar em uma redução significativa de custos com preparação, seleção e tempo de execução destes processos (DINIZ *et al*, 2010).

Em operações de torneamento ou fresamento externas, a visualização e a quantificação do calor e dos esforços gerados são relativamente facilitadas e se tornam mais frequentes os estudos, em contrapartida para operações de furação, embora apresentem todos estes elementos, existe a peculiaridade de se manifestarem internamente nas peças onde a usinagem será aplicada, oferecendo uma dificuldade maior da quantificação de seus valores.

O atrito causado pelo contato entre ferramenta e peça, em uma determinada área, produz calor devido movimento das moléculas ou átomos individuais. Esta energia afeta significativamente o par ferramenta/peça, modificando suas características metalográficas, físicas e estruturais (DENKINA; TÖNSHOFF, 2011).

A geometria de construção da ferramenta é baseada em um perfil helicoidal que tem a função de facilitar a remoção do cavaco (material extraído da peça por intermédio da operação de usinagem). O cavaco carrega grande parte da energia

térmica que também é dissipada em mais três partes possíveis: material que está sendo usinado, ferramenta e ambiente além do fluido refrigerante, caso esteja sendo utilizado (ASTAKHOV, 2014).

A afiação desta ferramenta envolve um desenvolvimento próprio definido com base no material ao qual será destinado o corte e os ângulos são estabelecidos de forma diminuir os esforços de corte e consequentemente a ação da variável térmica. A afiação feita de forma adequada implica em uma melhora na influência das variáveis de processo. A broca helicoidal possui dois fios de corte que atuam simultâneos quando a ferramenta trabalha, por esta razão devem ser simétricos a fim de obter precisão geométrica e dimensional do furo.

Uma das preocupações no processo de furação feito com brocas helicoidais é com relação à precisão e exatidão. O uso desta ferramenta exige processos posteriores para se alcançar as tolerâncias dimensionais e geométricas projetadas.

O núcleo da broca helicoidal, popularmente conhecido por alma, é a base de sustentação para garantir a resistência necessária durante a operação. A dimensão desta alma varia da ordem de 0,16 vezes o diâmetro da broca. Além disso, este núcleo tem um formato cônico crescente a partir da ponta da broca. A alma da broca, aliada à sua forma helicoidal, ocupa a posição central desta e divide os dois fios de corte (FERRARESI, 1977).

No centro fica estabelecida uma área onde não existe fio de corte, denominada aresta transversal de corte, como agravante esta região é a que tem o primeiro contato com a peça que está sendo trabalhada. Assim, ao primeiro contato com a peça a ferramenta deve deformar a peça, o que aumenta a força em uma furação em cheio (onde não existe um pré-furo) e a continuidade do processo promove uma diminuição desta força à medida que logo em seguida o fio de corte tem o primeiro contato e começa a atuar efetivamente.

Quando se constrói este modelo baseado nos estudos e nas teorias de corte, o calor considerado é apenas o que se apresenta efetivamente pelo atrito do fio de corte, esta quantidade de calor é diminuída pela atuação dos ângulos de afiação e pela seção dos cavacos que estão sendo removidos. Contudo o núcleo da broca continua em constante contato e o esforço permanece por toda extensão do caminho a ser percorrido, até que chegue ao final do furo.

No processo de furação é recomendável que se utilize uma broca de centro cujo seu diâmetro mínimo é determinado a partir do diâmetro da peça que será furada

e da alma da broca que formará a medida final do furo. Este cuidado pode possibilitar maior precisão no intento de posicionar o furo e deixar um ponto de alívio para ponta da broca subsequente.

Afiações especiais já foram desenvolvidas com a intenção de diminuir o tamanho desta região na ponta da broca, mas é inegável o fato de que, o atrito gerado pela área do núcleo da broca produz calor e os levantamentos dos valores de temperatura neste núcleo podem contribuir para decompor melhor os acontecimentos ocorridos naquele instante, ou até mesmo estudar a direção da propagação da temperatura.

O modelamento matemático de método de elementos finitos é uma ferramenta de simulação que oferece um resultado muito próximo do que ocorre efetivamente naquele instante, porém mesmo este método sofisticado carece de informações empíricas de experimentos realizados com enfoque científico. É importante relatar que não existe um consenso em relação a forma de captação, quantificação e distribuição da temperatura. Isto porque as variáveis relacionadas à calibração, metodologia e processos adotados para os vários estudos feitos por diversos autores como Trent e Wright (2000), Shaw (1984), Childs *et al.* (2000), divergem em seus resultados segundo Astakhov, (2007).

Os materiais que são utilizados na fabricação das brocas são de grande variedade e sua escolha considera a melhor resposta para exatidão do furo e longevidade da ferramenta, resistindo de maneira eficiente aos severos esforços que serão submetidos.

O desafio em amenizar os fatores de influência sobre o desempenho da ferramenta é tentar combinar um material que resista por maior tempo a essa conjuntura de elementos inerentes ao processo, sem que tenha afinidade química com o material a ser cortado. O diamante, por exemplo, é um material de grande dureza e consequente resistência ao desgaste, porém sua essência é da base de carbono e não pode ser utilizado para corte de uma peça de aço, pois existe afinidade química entre os dois materiais quando expostos a situações com temperatura, pressão, atrito, calor, abrasão.

Atualmente para que se diminua a incidência destes fatores é comum encontrarmos ferramentas que foram revestidas por uma camada muito fina (da ordem de micrometros) em sua superfície de outros materiais com características diferentes, conferindo à ferramenta maior resistência. Esta técnica permite que sejam

depositados materiais diferentes sobre a ferramenta e com mais de uma camada. Os resultados obtidos são bons e os materiais utilizados para esta deposição são de diversos tipos: nitreto de titânio, óxido de alumínio e nitreto de cromo são exemplos de revestimentos que são usados com o propósito de reduzir o desgaste. A escolha do mais adequado tem a prerrogativa de optar por aquele que apresenta um melhor rendimento e desempenho a ferramenta, lhe conferido um bom equilíbrio de propriedades como dureza, tenacidade, estabilidade química, dentre outros, aumentando sua vida útil em até três vezes (Oliveira *et al*, 2010).

A injeção de fluido lubrificante/refrigerante a alta pressão também é uma opção bem válida e é utilizada pelas empresas com a pretensão de reduzir e amenizar os danos, é necessário, porém dizer, que na interface ferramenta/peça, ou seja, no momento exato de contato em que a ferramenta toca a peça, o fluido não consegue atuar diretamente como refrigerante agindo apenas no auxílio da expulsão dos cavacos e refrigeração periférica dos componentes do sistema.

A usinagem pode ser feita sem o uso de lubrificantes, técnica que vem sendo utilizada para materiais como ferro fundido e aços ferríticos-perlíticos para torneamento e fresamento (JAREO e BRADBURY, 1999). As consequências para o uso deste tipo de usinagem trazem severos danos às ferramentas por conta do atrito e do calor que se mantém em constante evolução, aumentando a carga térmica de cada componente do sistema. A parcela do calor que seria removida pelo fluido, tem que ser dividida entre eles. Como restrição, para essa usinagem, temos as tolerâncias dimensionais e geométricas, que ficam limitadas por causa da deformação e esforço aumentado. Sob outro ponto de vista, O uso do fluido lubrificante na usinagem sofre severas críticas por parte de alguns pesquisadores, devido ao impacto causado no meio ambiente tanto no momento da sua utilização como também no seu descarte.

Um dos objetivos do trabalho é a medição da temperatura real na ferramenta (broca), proporcionando assim mais detalhes e contribuindo para os estudos relacionados, resultando em benefícios diretos de aplicação, controle e possíveis formas de melhoria de processo.

Informações sobre esta temperatura podem auxiliar no controle e desenvolvimento de ferramentas aumentando seu tempo de utilização e resultando em uma redução de custos no processo. Será possível também entender se tal temperatura é diminuída com o uso de algum fluido refrigerante ou se existe evaporação antes de atingir o local. A contribuição deste ponto de vista seria também

ecológica, uma vez que os produtos químicos utilizados durante a usinagem necessitam ser descartados.

## **1.1 QUESTÕES DE PESQUISA**

Qual a temperatura no centro da broca em durante o processo de usinagem? E qual o comportamento da temperatura e dos esforços de corte, durante o processo de furação?

## **1.2 HIPÓTESE**

Com o sensor posicionado sob a aresta transversal da broca a temperatura medida teoricamente deveria ser menor, pois nesta região a velocidade de corte tende a zero. Porém esta região também é conhecida e estudada por não haver corte e sim deformação plástica severa no material, ocorrendo assim um processo de esmagamento. Este fato pode resultar no aumento significativo da temperatura.

## **1.3 OBJETIVOS**

O objetivo principal deste trabalho é a mensuração do valor de temperatura atingido no centro da broca durante o processo de usinagem de furação em cheio de corpos de prova de alumínio AL 2011F, Latão C360 e aço SAE 1020. Outro ponto importante é analisar as informações relevantes ao processo de furação, que tenham conteúdo adicional pertinente e cooperativo em um panorama bilateral, ou seja, referente ao comportamento do material que está sendo usinado, do calor oriundo do processo e as informações sobre sua distribuição na ferramenta. Dessa forma poderão ser analisadas relações de comportamento entre variáveis como velocidade

de corte e de avanço em função da temperatura, além de verificar o comportamento do momento torsor e força de corte.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

A necessidade de melhoria constante nos processos de usinagem, ferramentas e equipamentos levam ao estudo de todos os componentes que englobam o processo de fabricação. Esta análise se faz necessária como base teórica para o entendimento de todos os fenômenos e resultados oriundos do trabalho.

### **2.1 MATERIAIS PARA USINAGEM**

Este campo tem a pretensão de apresentar algumas informações referentes aos materiais utilizados durante a construção do estudo. As características variadas destes materiais, possibilitam uma melhor observação do comportamento da temperatura na ferramenta, e os esforços aos quais ela estará submetida durante a usinagem.

#### **2.1.1 O alumínio**

Para realização deste trabalho um dos materiais escolhidos foi uma liga de alumínio. E esta opção levou em consideração a boa condutividade térmica do material, facilidade de aquisição e constante aplicação na indústria.

O alumínio é um dos elementos químicos mais jovens e com maior abundância na natureza é o alumínio que como características naturais, apresenta certas peculiaridades que o fazem ser utilizado como matéria prima para diversos segmentos

de transformação industrial, o excelente comportamento mecânico, a elevada resistência a tração, que pode ser aumentada se for utilizada em trabalho a frio, a facilidade de ser usado em estruturas, além da relação força/peso, fazem com que este metal tenha preferência de aceitação em setores como aeroviário e sobre trilho (ABAL, 2014)

A pesquisa aeroespacial e o setor de transporte aéreo têm a necessidade de desenvolvimento de novos materiais que possuam uma alta exigência de qualidade em seu processamento e resposta positiva a demanda (HEINZ *et al*, 2000).

O alumínio é de grande apreço na indústria nacional por suas características físicas e mecânicas e alto potencial de produção. Seu módulo de elasticidade é três vezes maior que o aço, ou seja, em mesmas condições de forças de corte o alumínio se deforma até três vezes mais. Estando em sua forma pura, tem uma grande resistência a corrosão, graças a formação de um filme de óxido de alumínio o que neutraliza o processo, em contrapartida ao se acrescentar elementos de liga essa resistência vai diminuindo tornando mais suscetível ao fenômeno de oxidação.

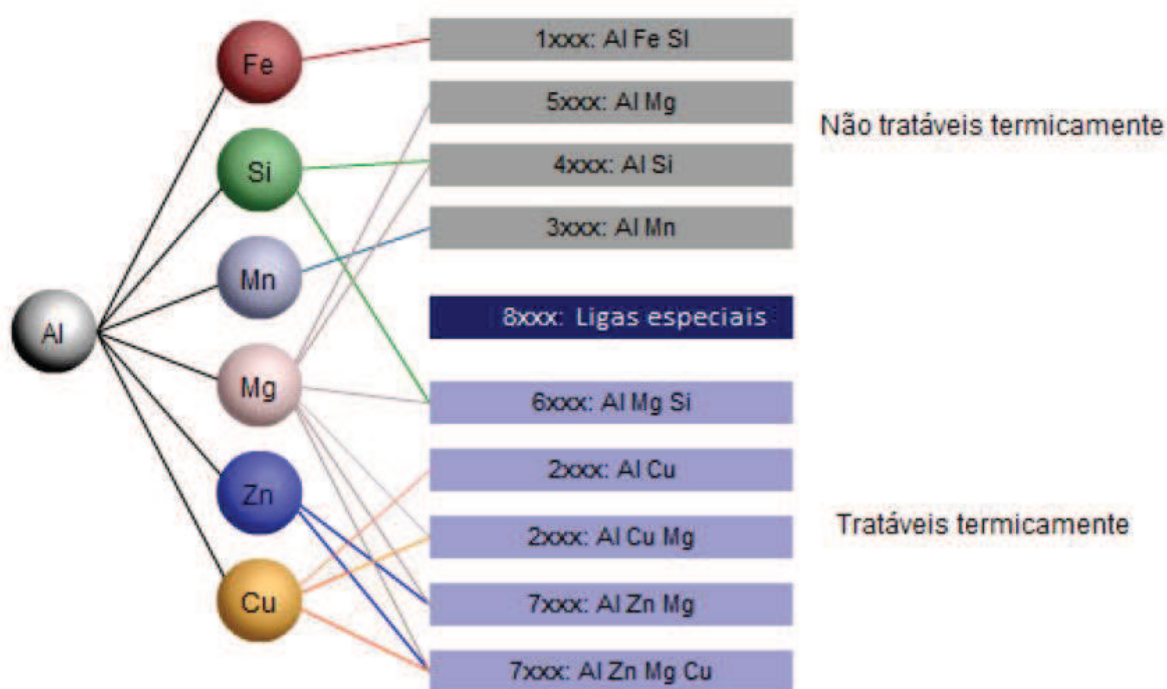
Em geral as ligas de alumínio possuem diversas propriedades muito interessantes, entre as características é possível citar sua baixa densidade, fácil fabricação, receptividade a vários tipos de tratamentos térmicos e principalmente uma boa relação resistência/peso (ABAL, 2014).

O alumínio e suas ligas são caracterizados por uma densidade relativamente baixa ( $2,7 \text{ g/cm}^3$  em comparação com uma densidade de  $7,9 \text{ g/cm}^3$  para o aço), condutividade elétrica e térmica elevadas e uma resistência à corrosão em alguns ambientes comuns, incluindo a atmosfera ambiente (LOPES, 2008). Muitas dessas ligas são conformadas com facilidade em virtude de sua elevada ductilidade; isso fica evidente através das finas folhas de papel de alumínio nas quais o material relativamente puro pode ser laminado. Uma vez que o alumínio possui uma estrutura cristalina CFC (cúbico de face centrada), a sua ductilidade é mantida até mesmo em temperaturas reduzidas. A principal limitação do alumínio está na sua baixa temperatura de fusão ( $600^\circ\text{C}$  ou  $1220^\circ\text{F}$ ), o que restringe a temperatura máxima em que o alumínio pode ser utilizado.

Os principais elementos de liga incluem o cobre, o magnésio, o silício, o manganês e o zinco. As ligas que não são tratáveis termicamente consistem em uma única fase, para as quais um aumento na resistência é obtido através do endurecimento por solução sólida.

Existem outras ligas capazes de serem submetidas a tratamento de endurecimento por precipitação como resultado do processo de formação da liga. Em várias dessas ligas, o endurecimento é devido a precipitação de dois elementos que não o alumínio para formar um composto intermetálico, tal como o  $MgZn_2$ .

A figura 2 apresenta a classificação das ligas de alumínio tratáveis e não tratáveis termicamente



**Figura 2 - Classificação das Ligas de Alumínio**  
**Fonte:** Adaptado de (Cunha, 2012)

Cunha (2012), observou que tem sido voltadas as atenções às ligas de alumínio e outros metais de baixa densidade (por exemplo, Mg e Ti) como materiais de aplicação em engenharia na área de transporte, com o objetivo de efetuar reduções no consumo de combustível.

Uma geração de novas ligas de alumínio-lítio foi recentemente desenvolvida para uso de indústrias aeronáuticas e aeroespaciais. Esses materiais possuem densidades relativamente pequenas (entre aproximadamente 2,5 e 2,6 g/cm<sup>3</sup>), módulos específicos elevados (razões módulo de elasticidade-gravidade específica) e excelentes propriedades de fadiga, tenacidade e baixas temperaturas. Além disso, alguns deles podem ser endurecidos por precipitação. Entretanto esses materiais são de fabricação mais cara do que as ligas de alumínio convencionais, pois são exigidas



técnicas de processamento especiais como resultado da reatividade química do lítio. (CALLISTER, 2002).

Segundo Ambroziak (2010), na indústria automotiva o alumínio é um excelente material para o desenvolvimento de projetos futuros no segmento de carrocerias, tendo como principal objetivo a diminuição do peso total do veículo, sendo que a segurança e a força de construção devem ser pelo menos a mesma.

O alumínio é totalmente reciclável e pode ser processado por diversas vezes sem alterar sua qualidade e suas propriedades serão as mesmas que a do alumínio obtido a partir de seu minério, dessa forma, contribui de maneira mais eficiente para a sustentabilidade e diminuição dos recursos naturais.

### **2.1.2 O Latão**

O latão é uma liga metálica composta por uma combinação de cobre e zinco com variação deste último componente entre 3 e 45%. Segundo Klocke e König, (2008), ligas de cobre são aquelas que possuem em sua composição pelo menos 50% deste elemento, podendo ser adicionados outros componentes para formação de materiais diferentes.

O zinco participa desta liga conferindo-lhe valores superiores de resistência mecânica e ductibilidade, com um ponto de fusão baixo e diminuindo o custo. Ligas de latão são caracterizadas pela excelente condutividade térmica e elétrica (NOBEL, *et al* 2014).

Existem diversas associações químicas que conferem ao latão características diferentes, dentre todas, pelo menos 4 ligas ternárias de latões, são mais usuais devido a melhoria de algumas propriedades:

- Latão de alumínio, para aumentar a resistência à tração e à corrosão, por exemplo em aplicações navais (22% Zn, 2% Al);
- Latão de chumbo, em que este é insolúvel no cobre, formando pequenas bolsas e proporcionando um efeito lubrificante, útil para ocasiões sujeitas a atrito;

- Latão de estanho, aumenta a resistência à tração, corrosão, além da rigidez. É conhecido como “admiral bronze” para condensadores (70% Cu, 28% Zn, 1% Sn, 0,75 % Pb);
- Latão de silício, aumenta a resistência à tração e fluidez da fusão. É conhecido o bronze silício (85% Cu, 10% Zn, 5% Si), usado em bombas, válvulas e engrenagens. O latão puro é raramente produzido, sendo que, quase a totalidade contém pequenas quantidades de metais como chumbo, manganês e alumínio (OHLWEILER, 1973).

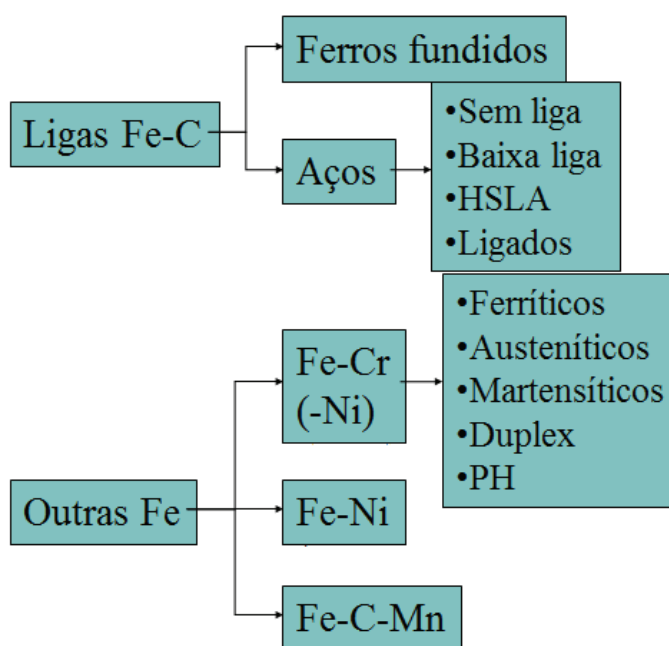
O latão é um material interessante para as indústrias de diversos segmentos devido as suas propriedades e ação antibacteriana, este fato faz com que sua utilização para fabricação de peças e componentes em quantidade perdendo apenas para o uso de materiais como alumínio e aço.

### **2.1.3 Aço e suas Ligas**

O aço é uma mistura metálica composta fundamentalmente por ferro e carbono oriunda do ferro gusa, onde a quantidade de carbono influencia na dureza da liga e é determinante para derivação dos vários tipos de aço, ou para outro produto resultante do gusa, o ferro fundido. A composição química do aço também é levada em consideração na classificação do tipo de aço que devido as porcentagens de cada elemento resulta em diferentes características, são os chamados aços ligas.

A associação normativa SAE (Society of Automotive Engineers - EUA) é um dos órgãos mais utilizados na normatização dos aços ao carbono em todo mundo juntamente com a AISI (American Iron and Steel Institute). As duas corporações têm um padrão comum para classificação de aço e fornecem um exemplo para que se possa comparar os elementos que fazem parte da mistura. Outros itens como processo de acabamento e forma de produto podem ser possíveis critérios de avaliação na escolha de um tipo de aço.

Conforme a figura 3, segue o fluxograma com a classificação mais comum para aços em função de sua dureza e tipo de liga:



**Figura 3** - Classificação para o aço em função da dureza e tipo de liga  
**Fonte:** Adaptado de (Silva, 2012)

No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas regulamenta os aços em geral conforme o modelo SAE-AISI e classifica o aço ao carbono 1020 através da Norma Regulamentadora 172/2000, como aço para construção mecânica. Este ainda pode receber tratamentos posteriores para modificar suas características metalúrgicas, superficiais e de dureza. Quanto a sua composição química a mesma entidade utiliza a Norma NBR NM 87/2000 para regularizar comercialização e utilização. A tabela 1 apresenta a composição química para o aço SAE 1020.

**Tabela 1 – Composição química normalizada para o aço SAE 1020**

<b>Carbono (% C)</b>	<b>Ferro (% Fe)</b>	<b>Manganês (%Mn)</b>	<b>Enxofre (% S)</b>	<b>Silício (%Si)</b>	<b>Fósforo (% P)</b>
0,18 – 0,23	99,82-99,77	0,30 -0,60	< 0.050	0,10 – 0,60	0,040

**Fonte:** Adaptado de Matweb (2016)

Quanto a aplicação, por ter uma boa afinidade entre a resistência mecânica e resistência a fratura, o aço 1020 tem expressiva aplicação na construção de eixos, pinos, parafusos, grampos e elementos de aplicações gerais que necessitem de

maleabilidade ou tratamento para aumentar sua resistência e a relação custo benefício se torna atraente com um resultado satisfatório.

## 2.2 USINABILIDADE DAS LIGAS METÁLICAS

De um modo geral, usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo (índice de usinabilidade), um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão (DINIZ *et al*, 2008).

Segundo Trent (2000), a usinabilidade de um material está associada a pelo menos um dos seguintes fatores: a vida de ferramenta de usinagem, a taxa máxima de remoção de material, os esforços de corte, o acabamento superficial e a características do cavaco.

A usinabilidade pode ser compreendida de modo geral, como o grau de dificuldade em se usinar um determinado material, onde se pode ter uma boa usinabilidade tomando-se como base a vida da ferramenta, ou não possua em função de outras propriedades de usinagem, como por exemplo, a rugosidade superficial. Com isso pode-se concluir que a usinabilidade do material depende diretamente dos parâmetros considerados e das condições de realização do trabalho.

Kluszko e Soares (2012), afirmam que outros fatores também devem ser observados para melhor compreensão de usinabilidade como, o controle do processo de fabricação/ transformação do material, a adição de elementos de liga que promovam mudanças na característica do cavaco e até mesmo contribuam com a lubrificação da ferramenta.

Segundo Diniz *et al*, 2008 a usinabilidade também pode ser influenciada além das variáveis já mencionadas, pelas propriedades mecânicas do material, dureza e estado metalúrgico da peça, das condições de usinagem, tipos de ferramentas, rigidez do sistema, condições de refrigeração e tipo de processo que a ferramenta será utilizada. Um ponto importante a destacar é que o aumento da ductilidade do material pode dificultar a usinagem do material (ASTAKHOV, 2006).

Atualmente um ensaio bem difundido e aceito para medição de usinabilidade é o chamado ensaio de longa duração, que consiste em uma comparação entre a usinagem de um material padrão e um material que será ensaiado até o final da vida da ferramenta.

### **2.2.1 Usinabilidade do Alumínio**

A usinabilidade das ligas de alumínio pode ser influenciada por diversos fatores metalúrgicos que de alguma forma afetam os resultados do processo. Utilizando velocidade de corte suficientemente alta e uma geometria da ferramenta adequada, podem-se obter bons acabamentos superficiais, porém, impurezas, tratamentos aplicados ao metal, processo de fundição, elementos de liga, são fatores que podem influenciar nas características de usinagem do alumínio.

A energia consumida por unidade de volume de material é muito baixa em função de ser facilmente usinado (DINIZ *et al*, 2008).

Segundo Kim e Kang (1997), superfícies espelhadas de alumínio podem ser obtidas usando ferramentas de diamante em processos de fresamento a alta velocidade sem a necessidade de operações posteriores como, por exemplo, o polimento.

Segundo Diniz *et al* (2008), uma refrigeração eficiente, pode beneficiar peças em que o acabamento superficial e tolerâncias dimensionais são críticas, porém as forças de corte necessárias para usinagem das ligas de alumínio são bem mais baixas quando comparadas com as forças relativas aos aços.

O processo de corte gera uma grande quantidade de calor devido à energia necessária para deformação do cavaco e ao atrito da ferramenta-peça e cavaco-ferramenta.

O fluido de corte (quando predominantemente refrigerante) tem a função de dissipar o calor gerado neste processo, procurando minimizar o desgaste da ferramenta e também a dilatação térmica da peça (principalmente em materiais com alta condutividade térmica, como é o caso do alumínio) e o dano térmico à estrutura superficial da peça (DINIZ *et al*, 2008).

A maior parcela de calor é direcionada ao cavaco, contudo, a parcela restante pode ser suficiente para contribuir com a alteração dimensional da peça ou imprecisão do furo que está sendo realizado, resultando em um custo adicional ao produto ou mesmo na quebra da ferramenta devido a tendência de empastamento do cavaco. Componentes químicos adicionados a um material base podem influenciar a usinabilidade favorável ou desfavoravelmente dependendo da característica e da quantidade introduzida.

### **2.2.2 Usinabilidade do Latão**

A quantidade e variedade de peças produzidas a partir desta matéria prima demanda de uma combinação de elementos de liga que favoreçam a usinabilidade e atue também na formação dos cavacos oriundos dos processos de usinagem aos quais estes produtos são submetidos. Nesta conjuntura, o chumbo é um dos elementos mais utilizados devido a sua eficácia, tanto para alta produtividade que proporciona na confecção destas peças como para redução do desgaste de ferramentas que são utilizadas para trabalhar este material (NOBEL, *et al.* 2014).

A quebra dos cavacos é facilitada pela baixa solubilidade do chumbo em ligas de latão, o que faz com que aconteça sua segregação na microestrutura do grão singularmente nos contornos de grão, diminuindo a resistência ao cisalhamento consideravelmente.

Outro aspecto atrativo se deve pelo fato de que o chumbo, muito encontrado em grande parte das ligas, apresentar uma temperatura de fusão relativamente baixa por volta de 327 °C. Ao longo da usinagem uma fina película de chumbo semilíquida atua como redutor de atrito reduzindo assim as forças e o desgaste da ferramenta.

Devido aos aspectos ambientais e de contaminação do chumbo, estudos recentes vêm buscando elementos químicos alternativos que possibilitem as mesmas características ao material como bismuto, selenio, telúrio e até grafite. Mas o alto custo e a escassez dificultam alcançar esse objetivo, fazendo com que ainda hoje o chumbo seja utilizado (IMAI *et al.*, 2010). A influência dos elementos Pb, Se, Te, sob

a forma de componentes insolúveis em ligas à base de cobre é comparável aos efeitos destes elementos no corte do aço (KLOCKE e KÖNIG, 2008).

Outra forma de melhorar a usinabilidade do latão é através do revestimento da ferramenta por uma película fina de um outro material como estanho, diamante, entre outros (SAIGAL e ROHATGI, 1996).

Li *et al.*(2003), investigaram a adesão em ferramentas durante a usinagem do bronze de alumínio. A adesão foi mais severa e mais irregular sobre a ferramenta de aço rápido do que sobre a ferramenta de metal duro, concluíram que a espessura e o grau de aderência dependem da distribuição da temperatura na superfície da ferramenta.

### **2.2.3 Usinabilidade do aço**

Segundo Diniz *et al.* (2008), materiais com baixos valores de dureza e resistência mecânica em sua maioria tem melhores resultados de usinabilidade, porém se estes valores forem muito baixos podem ocasionar prejuízos à ferramenta e essa usinabilidade não está somente relacionada com a característica do material mais tem relação com as condições de usinagem rigidez, refrigeração, fixação, etc.

A usinabilidade do aço pode ser determinada através de ensaios que levam em consideração algum parâmetro importante para usinagem como vida da ferramenta, rugosidade ou força. Normalmente com um tempo de duração longo estes ensaios são aplicados a um certo tipo de material que é usinado com um padrão de ferramenta estabelecido até que esta esteja comprometida e não possa mais ser utilizada.

Um dos pontos de grande relevância para o conhecimento da usinabilidade é a condutividade térmica do material, pois quanto maior for o valor de condutividade térmica da peça usinada, mais, facilmente o calor gerado durante a operação será removido da região de corte preservando assim a ferramenta.

Chiaverini (2012), argumenta sobre a norma da ABNT que mesmo adicionando elementos em quantidades controladas com o intuito de influenciar de forma positiva a usinabilidade, não se pode classificar este aço como aço liga.

O grau de dificuldade em usinar apresentado pelo material, aliado aos parâmetros de usinagem como refrigeração, rigidez do sistema, características da ferramenta e tipo de operação formam um conjunto de características chamado de usinabilidade. Estas características, cada uma em particular, definem diferentes níveis de usinabilidade para um mesmo material e são feitas por comparação em relação a um material previamente conhecido (ASTAKHOV, 2007).

Parâmetros físicos que compõem a usinabilidade como a dureza, resistência mecânica, condutividade térmica e taxa de encruamento.

## **2.3 PROCESSOS DE USINAGEM**

A partir do período do aparecimento do homem, a necessidade de se valer de utensílios que facilitassem o seu trabalho ficou evidente, pois este descobrimento estava diretamente associado à sua sobrevivência. As ferramentas e técnicas de utilização desenvolvidas foram talvez uma das maiores descobertas já realizadas. Este conhecimento possibilitava inúmeras oportunidades à medida em que se podiam utilizar materiais diferentes e estes por sua vez apresentavam acontecimentos diferentes que foram e estão sendo constantemente observados.

Estes acontecimentos são ainda hoje utilizados para dar nome a períodos relativos à evolução da humanidade, idade da pedra lascada (no período Paleolítico, onde lascas de pedras eram usadas como machado de pedra e ponta de lanças), Idade da Pedra Polida (no período Neolítico, a foice de osso que era obtida através do polimento ou desgaste desse material), Idade dos Metais (onde o homem passa a utilizar metais em pontas de armas e ferramentas).

Os primeiros metais conhecidos foram o cobre, o ouro e em escala menor, o estanho. O último metal que o homem passou a utilizar na fabricação de seus instrumentos foi o ferro (STEPHENSON e AGAPIOU, 2016).

É denominada usinagem, a técnica que combina a utilização de máquinas e ferramentas para transformação de uma dada matéria prima através da remoção de material com a intenção de lhe conferir forma e dimensão desejada.



Contida no campo da mecânica, a usinagem se destina a fabricação de componentes de diversos setores. Mesmo que não possa ser visível inevitavelmente algum componente de uso cotidiano ou foi usinado ou é decorrente de uma máquina que possui peças usinadas.

Em acordo com este conceito o conhecimento sobre materiais é um fator relevante seja através da seleção de ferramentas adequadas para a execução do trabalho ou na especificação do processo de transformação ao qual será submetido este material.

Os conhecimentos sobre materiais revelam também peculiaridades específicas de cada material, que podem ser facilmente trabalhados ou que apresentem problemas como desgaste prematuro da ferramenta, empastamento, mau acabamento e exigência de alta potência para o corte.

O entendimento destes fatores possibilita a tabulação e compilação de dados que contribuem sobre o comportamento de cada material, estas tabelas, embora precisas, são usadas como ponto de partida para o trabalho, pois as condições devem ser ajustadas de acordo com cada necessidade.

Critérios normalmente definidos para serem comparados são: vida da ferramenta, força de corte e potência consumida. Estes fatores associados a necessidade de um bom acabamento são componentes que influenciam diretamente no custo do processo.

Outro ponto de constante interesse de estudo é o cavaco, que é o material removido durante o processo de usinagem. O fenômeno da formação do cavaco é de grande interesse, pois revela informações sobre o processo pelo qual foi obtido e as condições durante sua construção (CHERN *et al*, 2005).

Cavacos longos são preocupantes, pois oferecem risco ao operador, quanto mais longo for o cavaco significa que o mesmo desliza suave e uniformemente sobre a face (superfície de saída) da ferramenta. O material rompe na zona primária de cisalhamento com deformações elevadas ( $\epsilon_0 < \epsilon_P$ ) e permanece homogêneo, com estrutura regular, sem fragmentação. As deformações não levam a encruamentos acentuados. O maior tempo de contato da superfície de saída da ferramenta com o cavaco remete ao aumento do calor, além de seu armazenamento se tornar difícil. É necessário reservar um local específico para que seja armazenado por conta de seu volume, por consequência uma certa área é destinada a esse material de descarte, o que reduz a área produtiva gerando, portanto, um desperdício.

O ideal é que se trabalhe então com a ideia de diminuição ou minimização do volume deste material para que se preserve a integridade do operador, da máquina ferramenta e ao mesmo tempo, se tenha um setor menor dedicado ao tratamento deste resíduo.

A fim de se obter melhores resultados na deformação do cavaco para aumentar a capacidade de sua quebra, pode-se exagerar muito nos esforços de corte, tendo como consequência o aumento de temperatura e uma diminuição da vida da ferramenta (DINIZ *et al*, 2008).

### **2.3.1 Processo de Furação**

Dentre as operações de usinagem, a furação é um dos processos que tem grande importância, chegando a representar um quarto dos trabalhos de usinagem (DINIZ *et al.*, 2010). Independente da necessidade, seja furação sem pré-furo ou para aumento de um furo já existente, destaca-se como um processo de grande importância e que necessita de melhorias.

Nos últimos anos os estudos sobre materiais para brocas e revestimentos obtiveram grandes contribuições, aliado a este fato, a combinação com máquinas de fusos mais potentes, altas velocidades, maior rigidez e melhorias na composição dos fluidos de refrigeração permitiram um avanço considerável nas operações de furação.

Segundo Astakhov (2011), cerca de 36% das horas de usinagem são gastas em processos de furação, contra 25% de torneamento e 26% para retificação, sendo responsável por 60% dos cavacos produzidos. A seleção correta do tipo de ferramenta e condições de uso podem diminuir os custos com o processo e aumentar significativamente a produção.

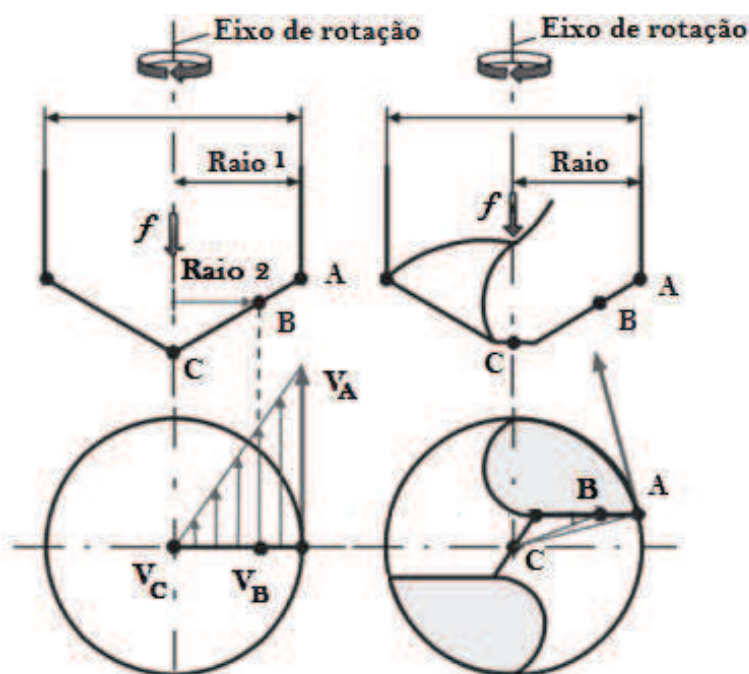
A operação de furação em alguns produtos pode ser executada no final do ciclo de produção, onde o valor agregado dos produtos já é considerável, investir em tecnologia no processo de furação pode impulsionar ou na falta deste investimento prejudicar sua produtividade.

Nas operações de furação os principais movimentos são o de rotação da ferramenta de trabalho ou da peça que será usinada juntamente com o movimento de

avanco que dependendo do posicionamento adotado e geometria da ferramenta é responsável pelo ataque da ferramenta na peça.

Um ponto importante a destacar é sobre os conceitos de velocidade de corte para os processos de usinagem, no torneamento, por exemplo, a velocidade de corte não tem alteração significativa ao longo da aresta de corte enquanto na furação a concepção é bem diferente, onde a mesma é variável ao longo da aresta em função do diâmetro da broca.

A seguir a figura 4 exemplifica a variação de velocidade de corte ao longo da aresta principal.



**Figura 4** - Conceito de velocidade de corte em furação  
**Fonte:** (adaptado de Astakhov, 2014).

Na figura 4 acima observa-se a variação da velocidade de corte em função do diâmetro, onde na aresta são demonstrados três pontos A, B e C que representam o diâmetro externo, diâmetro intermediário e região central respectivamente. Nota-se que para o ponto A o vetor da velocidade  $V_A$  representa o valor máximo por estar localizada na aresta secundária de corte e por essa razão apresenta um valor maior em relação as velocidades  $V_B$  e  $V_C$ , na velocidade  $V_B$  o vetor tem um comprimento menor, portanto remete a uma velocidade menor em relação a periferia e maior em relação a região central, na velocidade  $V_C$  o vetor tende a se tornar um ponto e, portanto, seu valor tende a zero.

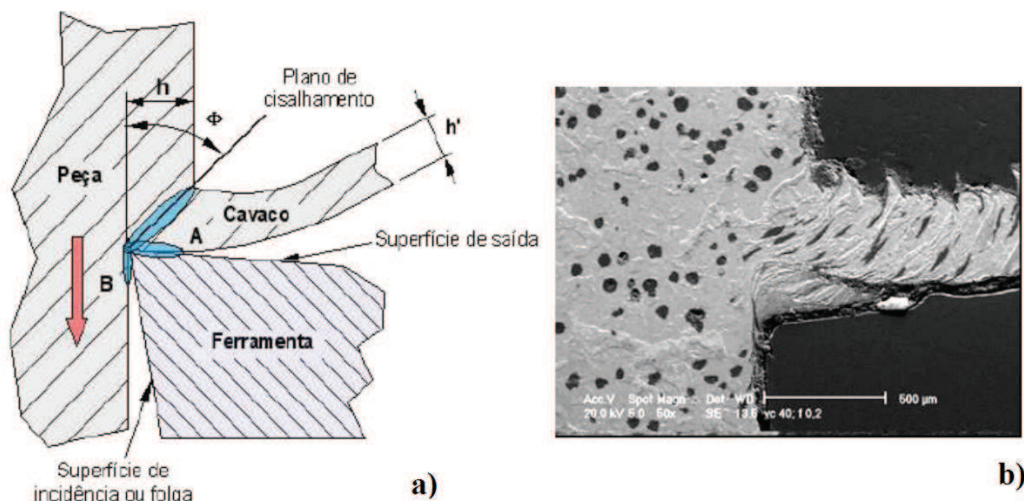
Deve-se atentar também ao fato de que cada região da broca contribui de forma diferente para os valores de torque, no qual temos 80% do total distribuído para as arestas principais, 10% para arestas laterais (ou guias) e 10% para a aresta transversal. Da mesma forma para os dados de força axial, as arestas principais tem um percentual de contribuição de 30 a 40 %, as arestas secundárias 10% e a aresta transversal em torno de 50 a 60% dos valores totais (ASTAKHOV, 2011). As arestas de corte das brocas devem ser projetadas em equilíbrio, afim de suportar a solicitação angular de torção no momento da usinagem pois pode ocasionar vibrações que dificultam a saída do cavaco, principalmente em furações profundas (DENKENA e TÖNSHOFF, 2011).

## **2.4 MECANISMOS DA FORMAÇÃO DE CAVACO**

Para grande parte dos materiais, em condições normais de usinagem, o mecanismo de formação do cavaco pode ser dividido basicamente em quatro etapas:

- Recalque – onde durante a penetração da ferramenta, uma pequena porção de material, ainda unida a peça, é pressionada contra a superfície de saída da ferramenta.
- Deslizamento – após a deformação elástica inicial, o material entra em regime plástico (deformação permanente), esse processo aumenta gradativamente as tensões de cisalhamento sem que o material recalcado seja desprendido da peça, deslizando apenas.
- Cisalhamento parcial ou Ruptura – nesta etapa as forças de usinagem aumentam de tal forma que o material não consegue manter a união em algumas regiões, inicia-se um processo de cisalhamento parcial ou total do cavaco que acompanha o plano de cisalhamento.
- Escorregamento – que é devido ao relativo movimento entre os movimentos: da ferramenta e da peça onde se inicia um escorregamento da porção de material cisalhada sobre a superfície de saída da ferramenta. Este fenômeno é repetido sucessivamente, onde uma nova porção de material está sendo formada e cisalhada

(DINIZ *et al*, 2008). Na figura 5 pode-se observar o plano de cisalhamento e o ângulo de cisalhamento.



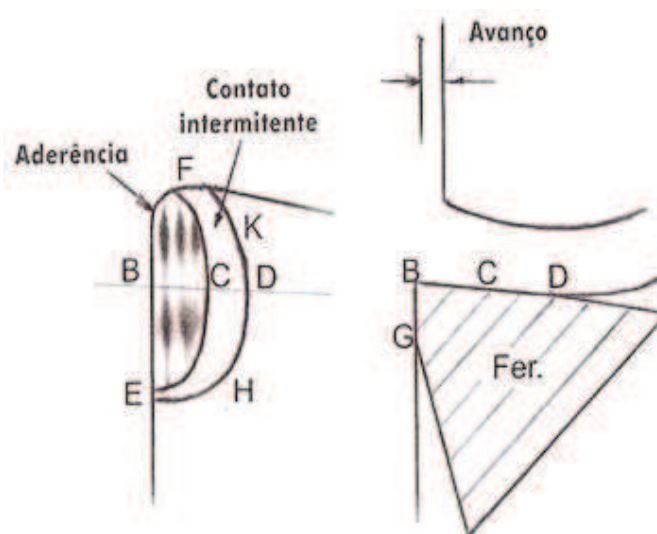
**Figura 5 -** a) Processo de formação de cavaco e b) microscopia eletrônica da deformação do cavaco.

**Fonte:** Tecnologia da usinagem dos metais (DINIZ, *et al*, 2008).

A parte do cavaco que não entra em contato com a ferramenta é rugosa em razão da deformação não ser homogênea. Isto ocorre devido à presença de pontos de baixa resistência ou de concentração de tensão presente no metal sendo usinado. Um plano de cisalhamento passando através de um ponto de concentração de tensão, causa deformação a um valor de tensão mais baixo que aquele que deforma um ponto que não está sob concentração de tensão (FERRARESI, 1977).

Trent e Wright (2000), relatam a existência de uma zona de aderência na interface cavaco/superfície de saída da ferramenta, que é seguida por uma outra zona chamada de zona de escorregamento, estas zonas podem ser encontradas na usinagem de metais que tem a tendência de formar cavacos contínuos, tanto em ferramentas de metal duro como em ferramentas de aço rápido. Quando ocorrem estas circunstancias, acontece o cisalhamento do material do cavaco na zona de aderência, próximo a interface, forma-se uma outra chamada zona de fluxo. Na figura 6 mostra-se área de contato cavaco ferramenta onde cada letra representa diferentes temperaturas para as diferentes regiões sendo que em torno da letra C a temperatura é maior diminuindo a caminho da letra D. O ponto B é onde a ferramenta toca a peça que será cortada.

Na zona de fluxo existe uma camada de material estacionário na interface cavaco-ferramenta e a velocidade de saída do cavaco aumenta à medida que se percorre a espessura, chegando ao fim da zona de fluxo, onde acaba o cisalhamento e a velocidade de saída do cavaco torna-se constante. A espessura desta zona tem uma ordem de 0,01 a 0,08 mm, isto é, a velocidade de saída do cavaco se estabiliza logo após. Na zona de aderência, a área de contato entre cavaco e ferramenta é total, ou seja, é igual a aparente (DINIZ *et al*, 2008). As divisões e zonas de formação do cavaco na ferramenta são apresentadas na figura 6.



**Figura 6** - Área de contato cavaco-ferramenta

**Fonte:** Adaptado de (MACHADO *et al*, 2009 apud TRENT & WRIGHT, 2000).

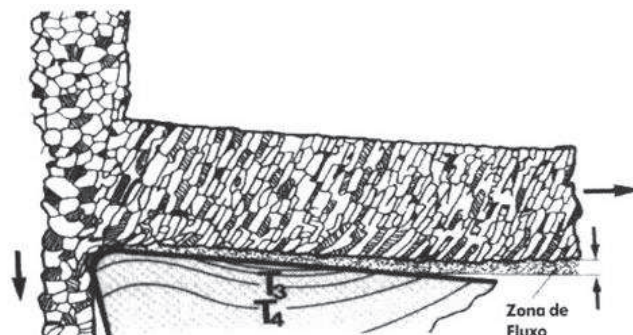
Na zona de escorregamento localizada ao lado da zona de aderência, o contato se dá apenas nos picos das duas irregularidades das superfícies em contato. Devido a alguns fatores tais como: altas taxas de deformação, pureza do material, altas taxas de compressão.

Segundo Wright (1979), fatores tais como velocidade de corte, tempo de usinagem e o conjunto ferramenta-peça, influenciam diretamente nas condições da interface, de escorregamento ou aderência. Pequenas diferenças entre o material da peça e da ferramenta (afinidade química), altas velocidades de corte e longos tempos de usinagem, são características que favorecem as condições de aderência.

A constância das fases de formação do cavaco origina uma movimentação dinâmica na ferramenta, corroborada pelo aumento da força de corte (MACHADO *et*



al, 2009). A figura 7 ilustra o comportamento da microestrutura do material no momento do corte.



**Figura 7** - Zona de fluxo dentro do cavaco

**Fonte:** Tecnologia da usinagem dos metais (DINIZ, *et al*, 2008).

Na furação, o cavaco diferente de outros processos deve ser pensado no momento do projeto com o intuito de facilitar seu escoamento pelos canais de saída. O desenvolvimento da ferramenta precisa contemplar a melhor geometria para fragilização do cavaco em sua raiz, este fato incide em outro problema que em função das altas taxas de remoção e temperatura pode ocasionar o entupimento dos canais de saída, aderência do material que está sendo removido e formato inadequado do cavaco, dificultando assim a retirada do material da zona de corte. Este material pode ficar entre a peça e as arestas de corte provocando aumento e distribuição irregular das forças podendo resultar em erros de dimensão e forma do furo, e até mesmo a quebra da ferramenta.

### 2.4.1 Formação de cavaco na furação

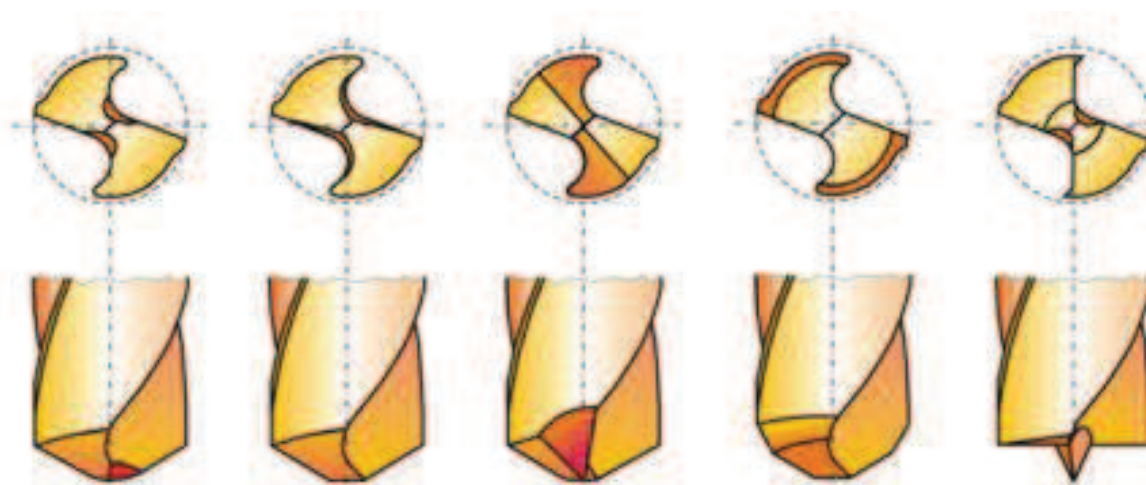
O cavaco oriundo da furação deve ser contínuo e produzido em duas linhas paralelas para que seja facilmente conduzido pelos canais, rompendo-se assim o aumento do peso ocasionado pelo aumento de volume. Esta configuração é atingida pela correta combinação de rigidez, geometria e parâmetros de corte adequados.

Outro fator de grande significância é relacionado ao ângulo de ponta da broca, muitos autores como, por exemplo, Galloway, (1957); Ferrarezi, (1977); Klocke e König, (1997); Agapiou e Stephenson, (1997) fazem referência a formação do cavaco aplicada ao tradicional processo de torneamento, entretanto Astakhov, (2011), apresenta uma abordagem diferente, onde para o melhor escoamento do material o a combinação entre o ângulo da ponta da broca e o ângulo do canal helicoidal, possui participação relevante na formação do cavaco.

Um outro diferencial para o processo de furação se dá pela presença da aresta transversal de corte, que é um dos componentes mais significativos na avaliação do desempenho de uma broca. A aresta transversal é responsável não apenas pela penetração inicial da broca como também pela distribuição gradativa das forças envolvidas, sendo esse o motivo que lhe confere uma atenção especial. No sentido de melhorar sua eficiência, uma das formas é com métodos de afiação diferenciados onde em determinadas ocasiões e materiais, facilita a primeira penetração no material a ser furado, diminuindo a resistência, e também conduzindo esse material para as arestas de corte principais onde se dará início a forma do cavaco (PAUL *et al*, 2005).

Estas características associadas a geometria irregular, e velocidades de corte baixas ou até mesmo próximas de zero na região central, contribuem para uma formação diferenciada do cavaco, produzindo formatos variados, dificultando o seu escoamento da região de corte e aumentando as forças de usinagem.

Pode-se observar os tipos de afiação que diminuem a influencia da aresta transversal nas brocas conforme a figura 8.



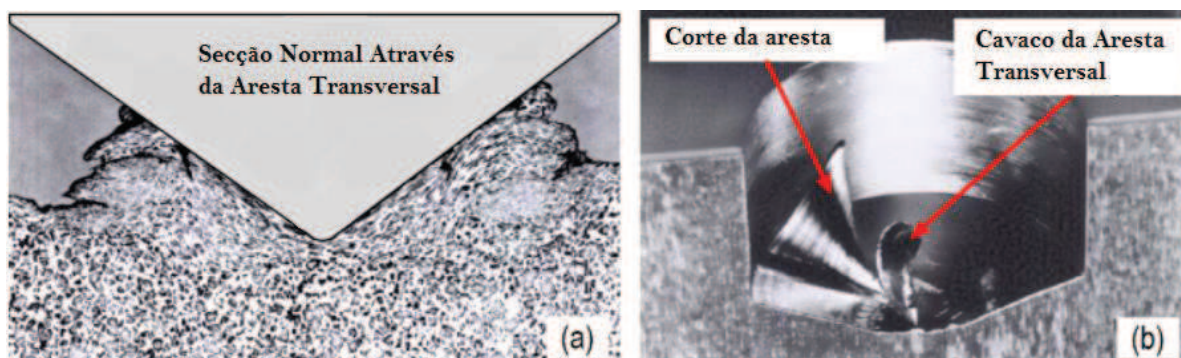
**Figura 8** - Exemplos de afiações e diminuição da influência da aresta transversal.

**Fonte:** Dissertação de Doutorado Risse, 2006



Nas imagens a) e b) a seguir, é possível verificar a formação do cavaco na aresta transversal e a remoção do material ao longo da aresta de corte, pode-se inclusive verificar a deformação plástica sofrida pelo material durante a furação.

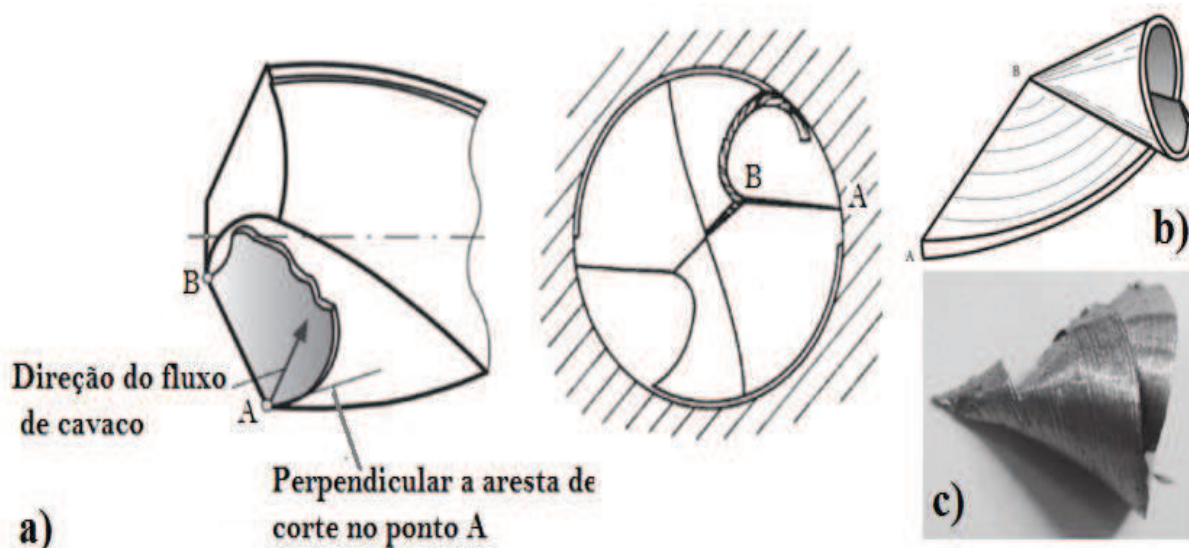
Em uma observação mais criteriosa verifica-se que a formação entre a aresta principal e o início da aresta transversal ocorre de forma diferenciada conforme a figura 9:



**Figura 9** - Formação do cavaco na aresta transversal, a) seção da aresta transversal e b) cavaco formado durante o corte

**Fonte:** (adaptado de Astakhov, 2014).

A figura 10 exemplifica o modelo de curvatura do cavaco e sua direção de fluxo, também é possível verificar a influência do ângulo de curvatura da broca durante o processo de formação do cavaco.



**Figura 10** - a) Direção do fluxo de cavaco entre A e B; b) modelo de curvatura do cavaco e c) fragmento real de cavaco

**Fonte:** (adaptado de Astakhov, 2014)

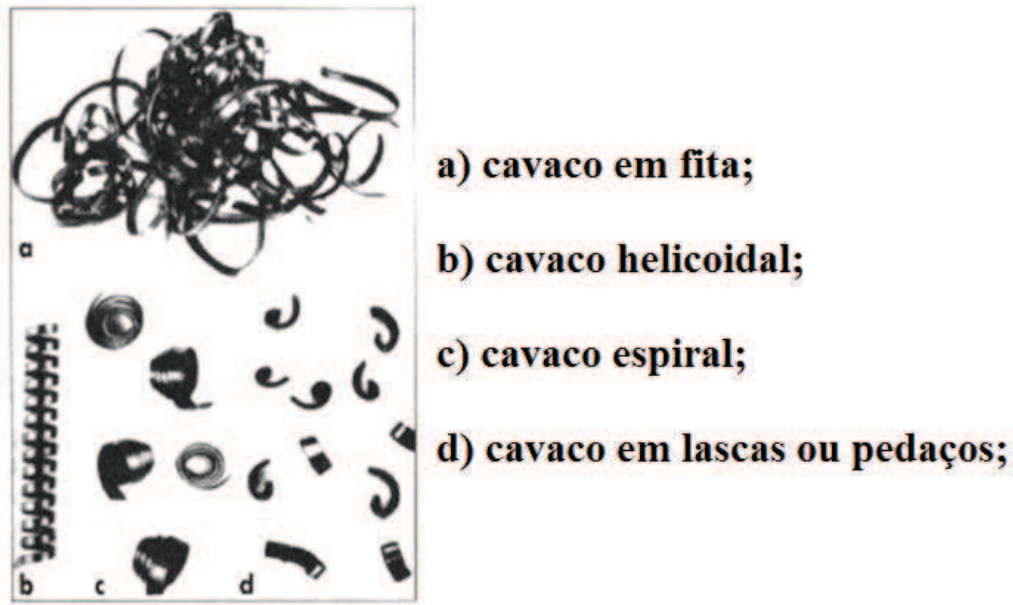
No ponto (a) o cavaco tem um espaço maior para percorrer sobre a aresta da broca em movimento em comparação ao ponto (b), isto significa que a velocidade percorrida em (a) é maior do que a percorrida em (b). Astakhov e Shvets, (2004); Astakhov, (2006) determinaram o comprimento do cavaco como sendo o percurso dividido pela taxa de compressão do cavaco, e indicaram que a diferença de (a) para (b) chega a ser de 50 a 70 %, e destacaram ainda a mudança de geometria de (b) em relação a (a), chegando a um valor de comprimento 7 a 8 vezes menor em (b) com relação a (a).

### **2.4.2 Classificação do Cavaco**

No processo de usinagem, a formação do cavaco pode ser dividida em três tipos:

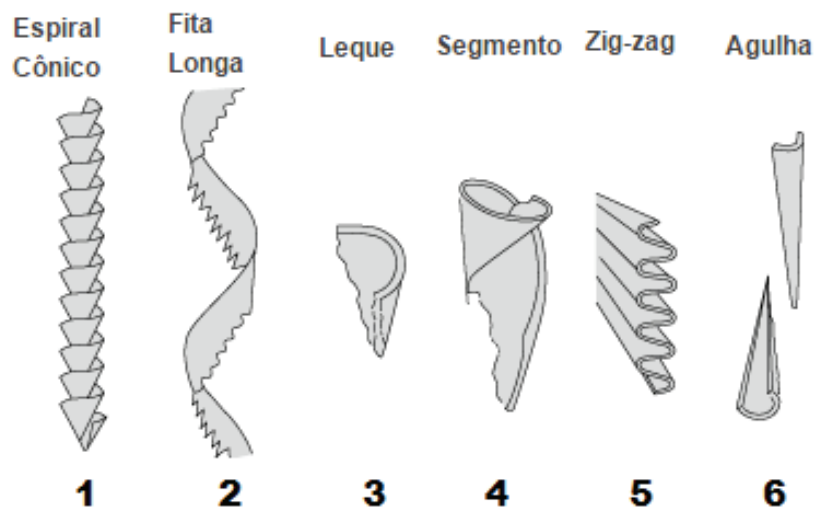
- Cisalhamento ou parcialmente contínuos: trata-se de uma classe intermediária entre os cavacos contínuos e descontínuos, onde se apresentam constituídos de lamelas justapostas bem distintas. Dois motivos são apontados como possíveis causas na propagação da trinca, a primeira está relacionada à energia elástica acumulada na ferramenta, onde o cavaco perde o contato com a ferramenta não sendo suficiente para a propagação da trinca no plano de cisalhamento e consequentemente a quebra do cavaco, outro fator é referente a presença de grandes tensões de compressão no plano de cisalhamento que também dificulta a formação de trinca (DINIZ *et al*, 2008 e MACHADO *et al*, 2009).
- Contínuo: o material é cisalhado e deformado continuamente sem apresentar fragmentação. Este tipo de cavaco é formado na usinagem de metais dúcteis, como alumínio e aço de baixo carbono.

Os dois tipos de cavacos citados podem ainda ser identificados nas formas de cavaco em fita, cavaco espiral, cavaco helicoidal e cavaco em lascas ou pedaços conforme a figura 11.



**Figura 11** - Formas de cavaco produzido na usinagem  
**Fonte:** Tecnologia da usinagem dos metais (DINIZ, *et al*, 2008).

- Ruptura: É comum em materiais que não suportam grandes deformações, este tipo de cavaco é normalmente resultado da usinagem de materiais frágeis como: ferro fundido cinzento, bronze, latão, etc. Apresenta geralmente a forma de pedaços muito pequenos ou fragmentos. Entretanto, é importante ressaltar que alterando os parâmetros de usinagem e geometria da ferramenta, é possível obter este tipo de cavaco em materiais de baixa ductilidade. Para furação os tipos de cavacos mais característicos são apresentados na figura 12.



**Figura 12** - Formas de cavaco produzido na furação  
**Fonte:** (adaptado catálogo Mitsubishi tools, 2015).

A figura 12 demonstra seis tipos mais comuns de cavaco na operação de furação, sendo que cada tipo pode assumir seu formato devido as condições as quais a usinagem está sendo realizada, normalmente o primeiro tipo é característico de usinagens com baixa taxa de avanço e que favorece a usinagem a respeito da correta remoção do material que é conduzido para fora da região de usinagem. O segundo tipo é normalmente visualizado em usinagens sem refrigeração e se envolve na superfície da broca com facilidade. A terceira imagem da figura revela o cavaco gerado com alta taxa de avanço, onde provavelmente sofreu restrição na sua formação pelo canal de saída e a parede do furo. As imagens quatro e cinco tem representação em função da pressão de corte e característica do material que está sendo cortado em relação a ductilidade e tenacidade. O sexto tipo mostrado revela que possivelmente houve vibração durante o corte não possibilitando outra formação e quebrando o material em pequenos pedaços.

Outro fator a ser considerado é referente à condição ecológica, os lubrificantes utilizados para tentar amenizar os prejuízos à usinagem na grande maioria são líquidos e a base de água, no entanto tem também substâncias em sua composição que necessitam de tratamento. Esses lubrificantes acompanham os cavacos, o que dificulta ainda mais o seu descarte, exigindo uma maior atenção (MACHADO *et al*, 2009).

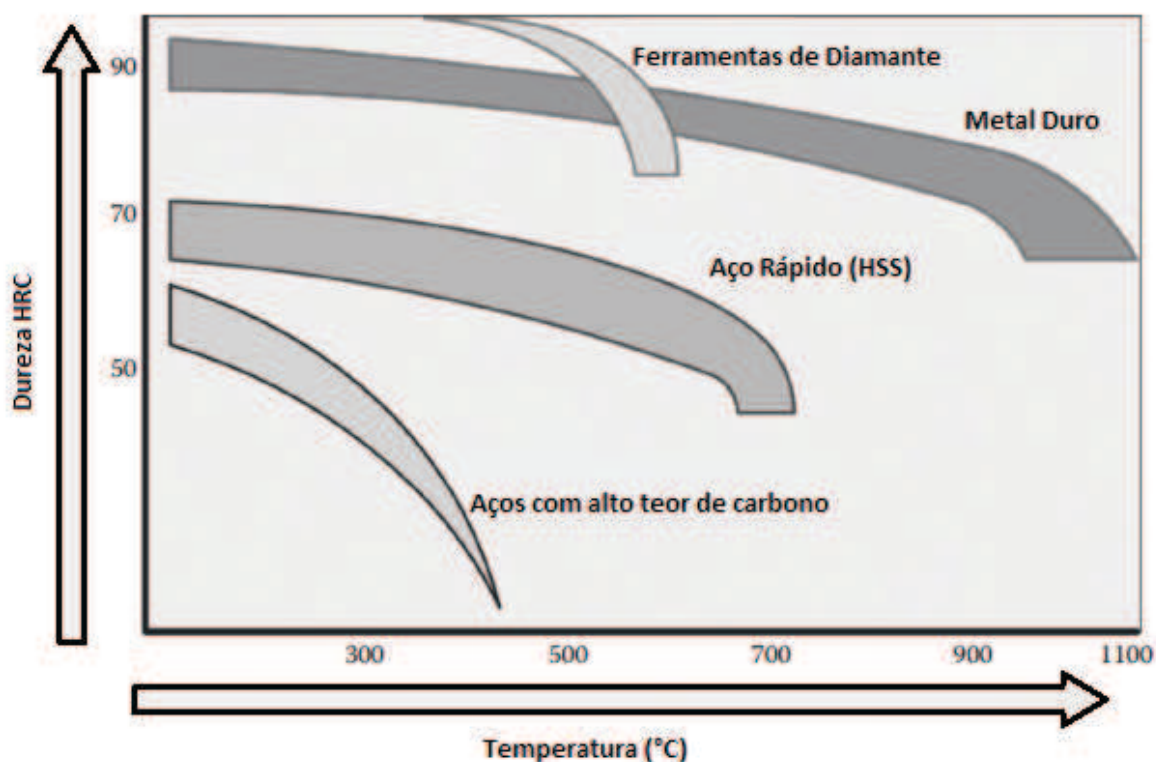
## **2.5 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS**

Um dos fatores de grande importância para uma usinagem bem-sucedida e que tem forte impacto nos resultados obtidos pelo processo é a escolha do material da ferramenta. A correta seleção dos materiais das ferramentas e dos parâmetros que serão utilizados pode impactar diretamente nos custos de fabricação.

No setor industrial de hoje vários materiais são utilizados na fabricação de ferramentas de corte, aços de alto teor de carbono, aços ligas, ferramentas de metal duro, cermet, cerâmica e diamante são exemplos de materiais empregados.

Para furação são basicamente três os materiais de maior uso sendo eles o aço rápido, o metal duro e o diamante, incluindo ainda os grupos de ferramentas sem cobertura e com cobertura de PVD ou CVD (ASTAKHOV, 2014).

A figura 13 apresenta a relação de dureza x temperatura para os diversos materiais de ferramentas.

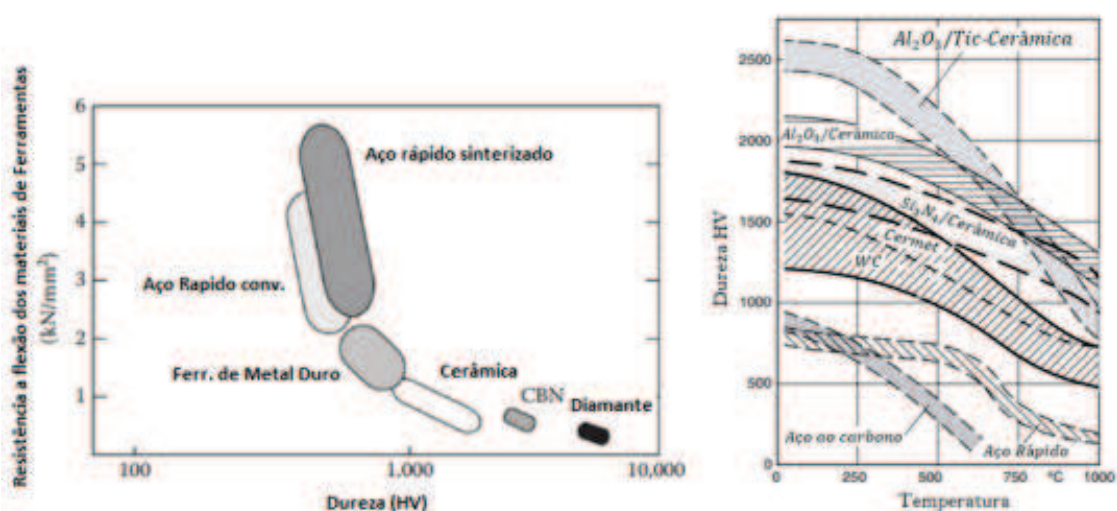


**Figura 13** - Gráfico de dureza do material da ferramenta versus Temperatura  
**Fonte:** (adaptado de Astakhov, 2014).

Mesmo com o avanço das tecnologias de materiais de ferramentas e máquinas ferramentas, grande parte das ferramentas utilizadas para o processo de furação ainda é de aço rápido (NOVASKI, 1996). O fator limitante para o uso de outro material, principalmente para diâmetros pequenos é a velocidade de corte, onde no aço rápido atinge valores compatíveis com a tecnologia disponível em máquinas nos dias de hoje.

Entre os requisitos importantes para uma boa escolha dos materiais de ferramenta estão dureza, tenacidade e resistência ao desgaste. Fatores de composição dos materiais de ferramentas como resistência a flexão e dureza ou dureza Vickers e temperatura são relacionados na figura 14.





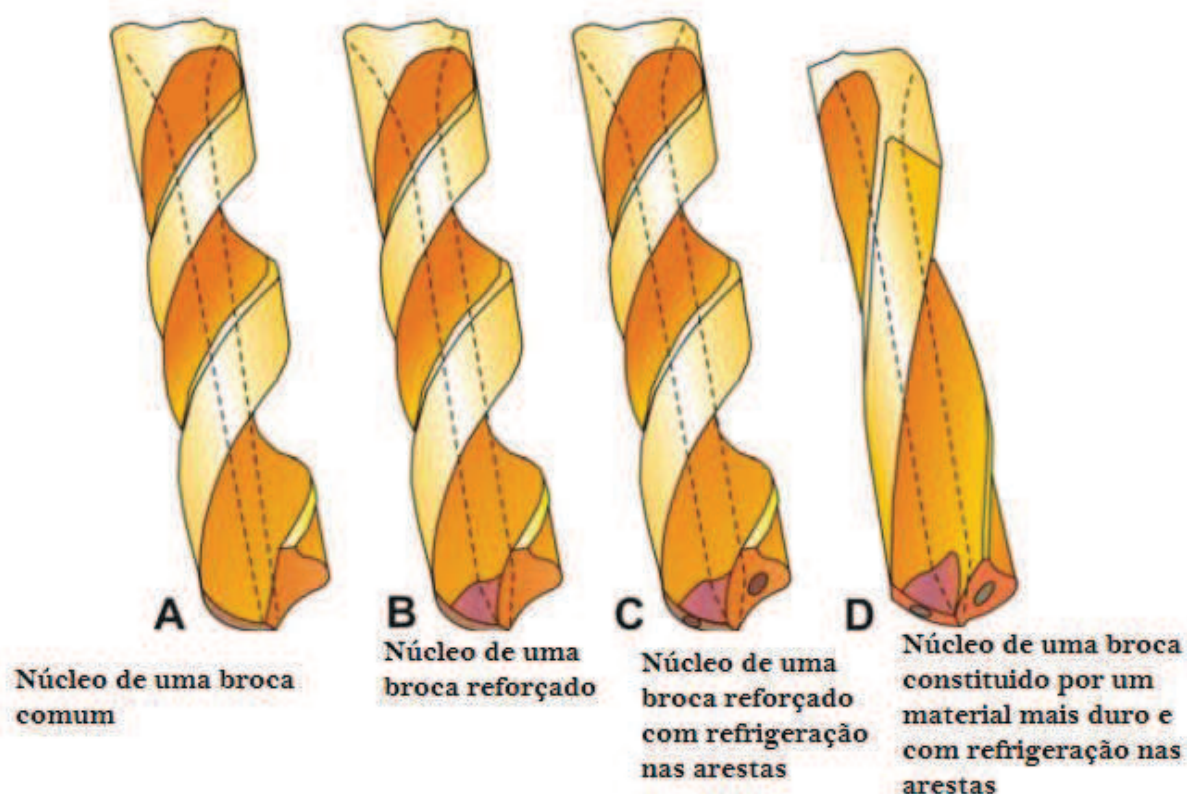
**Figura 14** - Gráfico de resistência a flexão do material da ferramenta versus Dureza Vickers  
**Fonte:** (adaptado de Astakhov, 2014).

## 2.6 BROCAS

Para furação, a ferramenta que efetua a usinagem do material é denominada broca, e pode conter duas ou mais arestas de corte sendo retas ou helicoidais dependendo da aplicação a qual será destinada. As brocas podem ser fabricadas de diversos materiais sempre se levando em consideração a diminuição do desgaste, aumento da produtividade, e precisão. Preservar a ferramenta significa aumentar o seu tempo de utilização, portanto produzir mais com menos recursos e consequente diminuição de custos.

Stephenson e Agapiou, (1997), classificaram as ferramentas de furação em dois tipos básicos:

Ferramentas inteiriças feitas de aço rápido, aço sinterizado, metal duro ou cerâmica, feitas de um material homogêneo. Este tipo de ferramenta normalmente geram um custo maior pois quando quebram ou desgastam necessitam de uma máquina adequada para que possam ser reafiadas, este é um fator que deve ser considerado na seleção da ferramenta de acordo com cada tipo de trabalho. Exemplos de ferramentas inteiriças e suas diferentes formas de construção são exibidos na figura 15.



**Figura 15** - Apresenta a evolução na forma de construção das brocas inteiriças conferindo – lhes melhor rigidez.

**Fonte:** Dissertação de Doutorado Risse, 2006

Ferramentas com pontas intercambiáveis onde apenas as pontas são feitas de materiais mais resistentes e fixadas a uma haste de aço e podem ter ou não cobertura. A fixação pode ser feita por solda, parafuso ou pressão. As pontas podem ser pastilhas com geometrias parecidas com as de torneamento ou inteiriças feitas de um material de maior dureza, uma opção atual é a mescla de dois materiais numa mesma ponta para que possa resistir melhor as solicitações de esforços e temperatura. Este modelo de ferramenta apresenta algumas vantagens consideráveis, apesar de ter um custo inicial ligeiramente maior, em caso de quebra ou de perda de afiação troca-se apenas a ponta ou pastilha da ferramenta preservando seu suporte. A rigidez oferecida para este tipo de ferramenta costuma ser bem consistente não sendo uma desvantagem em relação ao sistema homogêneo. Na figura 16 são demonstrados dois modelos diferentes de brocas de brocas.



**Figura 16** - Imagens representativas de tipos de broca, (a) ponta intercambiável com suporte, e (b) inteiriças.

**Fonte:** [www.ferramentasdeusinagem.com.br](http://www.ferramentasdeusinagem.com.br) (2016).

A escolha do melhor tipo de ferramenta para executar um trabalho de furação deve levar em consideração fatores como: rigidez do sistema, potência de máquina, material a ser usinado e material de ferramenta além dos parâmetros adequados afim de se conseguir o desempenho desejado e um melhor aproveitamento (DINIZ *et al.*, 2010).

### 2.6.1 Tipos de brocas

Alguns autores como Astakhov (2011), defendem que as brocas possam ser classificadas por outros critérios como: Formação da haste, relação comprimento diâmetro, número de arestas laterais, forma das arestas laterais, liquido de resfriamento, equilíbrio de forças, etc. A forma mais comum para se realizar esta classificação é baseada nas funções e aplicações, quanto a esta classificação temos : Brocas helicoidais, Brocas sem corte frontal, Brocas de centro, Brocas de trepanação, Brocas para furação profunda, escareadores, rebaixadores, etc.

Para diferentes materiais existem, brocas especiais com diferentes características de geometria, número de arestas e saída de cavaco.

Como características as brocas possuem:

- Canais helicoidais; que são responsáveis pela saída do material e seu comprimento dependem do diâmetro da broca e da profundidade do furo (DINIZ *et. al.* 2006).

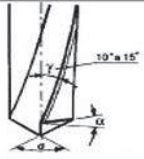
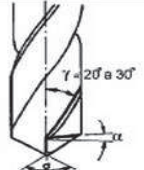
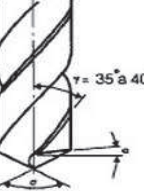


- Arestas principais de corte; responsáveis pelo corte do material, se visualizadas de frente as arestas são paralelas entre si porém se visualizadas de lado formam o ângulo de ponta (STEMMER, 1995).
- Aresta transversal de corte; esta aresta é responsável pelo esmagamento do material antes de ser cortado e faz a união das duas arestas de corte seu comprimento e influência sobre o furo podem ser minimizados mudando a afiação.
- Guias; que tem a função de diminuir o atrito da ferramenta com a lateral interna do furo, reduzindo a área de contato e direcionando o trabalho da broca (DINIZ, 2006).
- Haste; área reservada para fixação em mandris, pinças, ou cone de máquina e pode apresentar forma cilíndrica ou cônica.

Para o processo de furação em geral a broca helicoidal é a ferramenta com maior uso, porém alguns fatores devem ser considerados, pois são de grande importância, os furos obtidos através dela têm em geral relativamente baixa qualidade de precisão considerando os padrões exigidos para tolerâncias dimensionais apertadas, a difícil condução do cavaco para fora da região de corte e o desgaste acentuado nas quinas e cantos vivos, também merecem atenção.

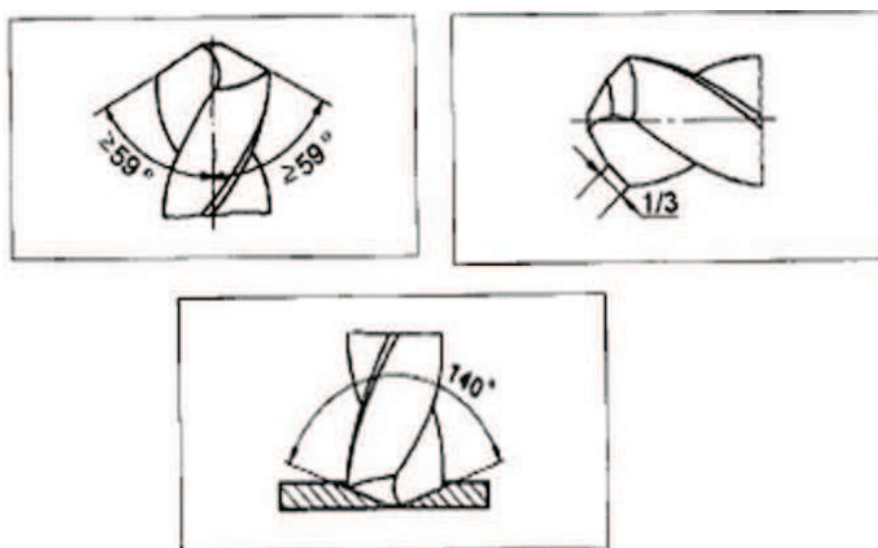
A afiação das brocas é diferenciada para cada tipo de material a ser furado, sendo por volta de 150 tipos diferentes de afiação obtendo perfis específicos, quanto a utilização é usada em furos curtos ou longos sendo em cheio ou com pré-furo, a velocidade de corte varia desde o valor máximo na periferia e chegando a zero no centro. A velocidade de corte de torna fundamental na seleção do melhor tipo de ferramenta a se utilizar, porém, esta fica condicionada ao desenvolvimento de máquinas capazes de fornecer-las. A geometria da broca tem fundamental importância na qualidade da usinagem. A norma que regulamenta a geometria das brocas é a NBR 6163 (ABNT, 1980). Desde a sua criação em 1820, a broca vem sendo constantemente aperfeiçoada devido a exigência continua de melhoria nos processos produtivos, redução de custos de fabricação além do desenvolvimento de novos materiais usados na confecção de produtos de consumo.

As brocas podem ser classificadas de maneira em geral como sendo de três classes: tipo H, tipo N, tipo conforme é exibido nas figuras 17 e 18.

Ângulos da Broca	Classificação quanto ao ângulo de hélice	Ângulo da ponta ( $\alpha$ )	Aplicação
	Tipo H – para materiais duros, tenazes e/ ou que conduzem cavaco curto (descontínuo).	80° 118° 140°	Materiais prensados, ebonite, náilon, PVC, mármore, granito. Ferro fundido duro, latão, bronze, celeron, baquelite, Aço de alta liga.
	Tipo N – para materiais de tenacidade e dureza normais.	130° 118°	Aço alto carbono. Aço macio, ferro fundido, latão e níquel.
	Tipo W – para materiais macios e/ ou que produzem cavaco longo.	130°	Alumínio, zinco, cobre, madeira, plástico.

**Figura 17** - Representativa de tipos de broca e ângulos de ponta relacionados à aplicação.

**Fonte:** Adaptado de SENAI (2002).



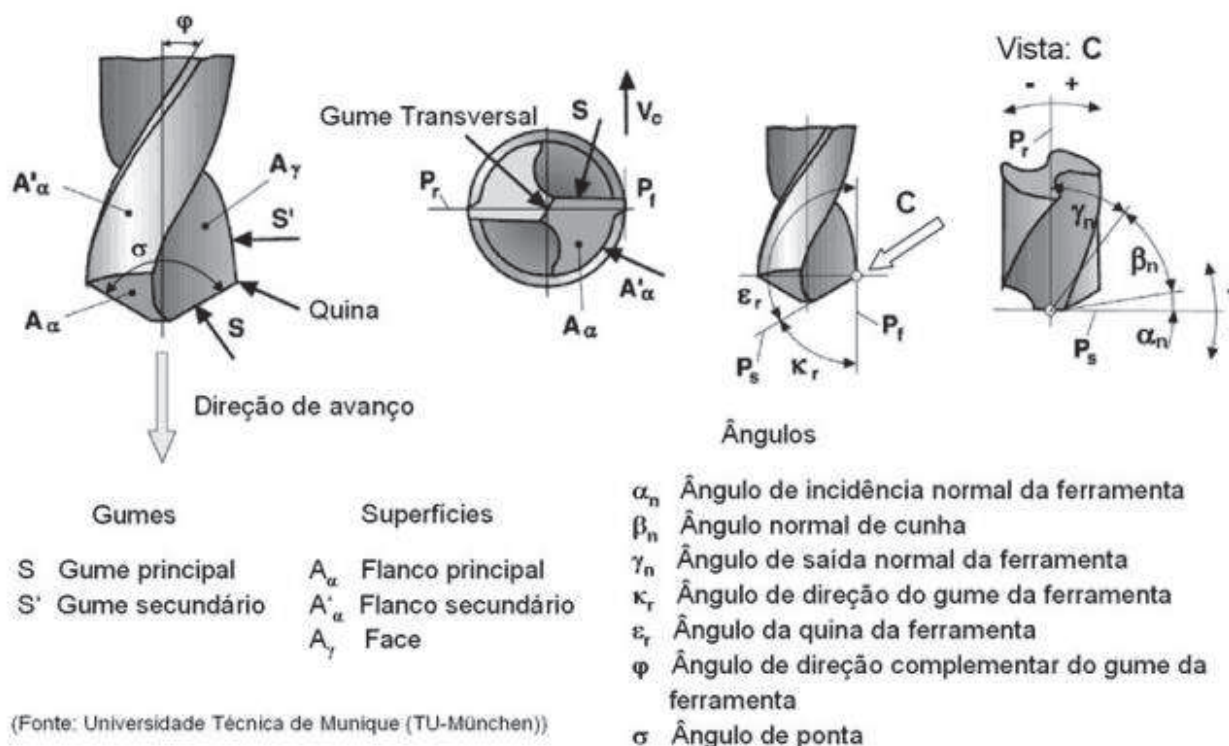
**Figura 18** - Ângulos principais e perfil específico de uma broca helicoidal.

**Fonte:** Adaptado de SENAI (2002).

Esta classificação se dá por diferenciar a aplicação para cada material e o ângulo de ponta correspondente. Alguns erros são comuns e, atribuídos ao processo de furação diâmetros não uniformes, rebarbas, erros de circularidade e dimensão podem ocorrer dependendo das condições e dos equipamentos utilizados.

Após o processo de furação é comum se ter outro processo para a fim de se garantir o posicionamento e a dimensão do furo, estes podem ser feitos por retificação, alargamentos, etc.

A geometria da broca por si só necessita de uma atenção maior e um conhecimento prévio, a fim de se definir os planos e ângulos feitos e preparados para cortar cada material ao qual serão utilizados, estudos oferecem melhores ângulos de ponta, avanços, velocidades de corte para consulta propiciando melhores condições de corte. Visualizando a figura 19 pode se atentar a característica geométrica da broca.



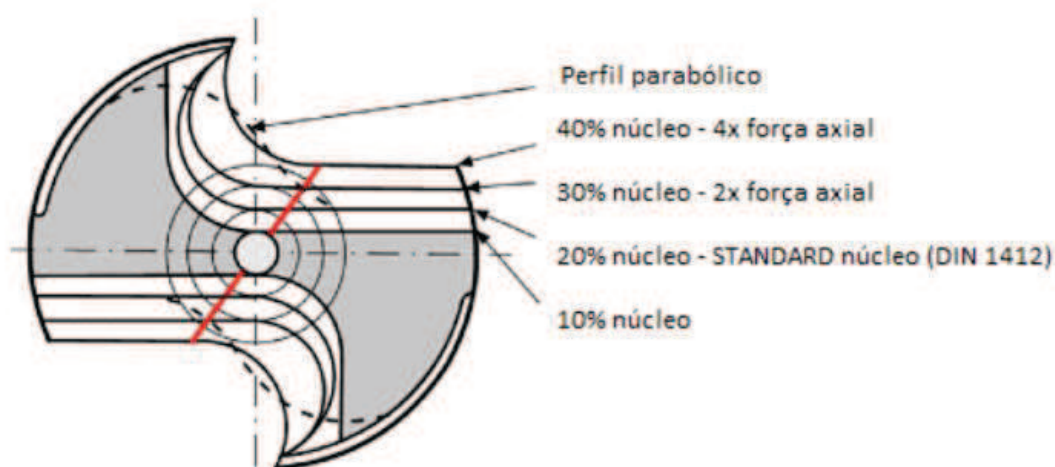
**Figura 19** - Descrição da nomenclatura das brocas helicoidais.

**Fonte:** Adaptado de Universidade Técnica de Munique (2005).

- Ângulo de ponta " $\sigma$ " segundo Stemmer (2005) este é o ângulo responsável por alterar a espessura do cavaco além de aumentar o comprimento da aresta de corte, este aumento facilita a dissipação do calor e interfere na direção do cavaco. Diniz *et al.*, (2006) orienta que este é o ângulo formado pelas duas principais arestas de corte. Experiências feitas por Haq; Marimuthu e Jeyapau, (2008) revelaram que o ângulo de ponta é um fator de grande importância para

furação, pois quanto maior for mais difícil se torna a centralização da broca e repetibilidade do furo influenciando no posicionamento da ponta da broca sobre a peça, em contrapartida, um ângulo de ponta maior, possibilita o aumento do avanço e consequentemente um ganho em produtividade.

- Ângulo de incidência ou folga “ $\alpha$ ” Swinehart, (1969) defende que este ângulo é o mais determinante para seleção do melhor avanço, já que tem a função de diminuir o atrito entre a aresta principal de corte e a peça. Atribui-se à ele também o fator de determinancia sobre avarias e desgaste na aresta de corte, um angulo grande pode significar quebra ou lascamento da aresta (CASTILLO,2005).
- Ângulo da aresta transversal “ $\Psi$ ” A aresta transversal é a principal causa de imprecisão dimensional no processo de furação, pois favorece uma tendência de deslocamento da ponta da broca e a peça, nesta região o corte praticamente inexistente devido ao fato do ângulo de saída ser negativo e o que se apresenta então é somente deformação plástica responsável por impulsionar o material para as duas principais arestas de corte, a força de avanço por sua vez tem substancial aumento, por este motivo opta-se em diminuir esta aresta a fim de se reduzir o esforço. Embora pareça uma alternativa interessante, se pensar em rigidez esta ideia não é tão boa assim, algumas brocas têm seu núcleo crescente em direção à haste e a reafiação destas brocas podem deixar a aresta transversal maior (BORK, 1995). Na figura 20 é possível se observar a relação existente entre a força axial e o aumento da seção transversal.



**Figura 20** - Estimativa das Forças atuantes na aresta de corte

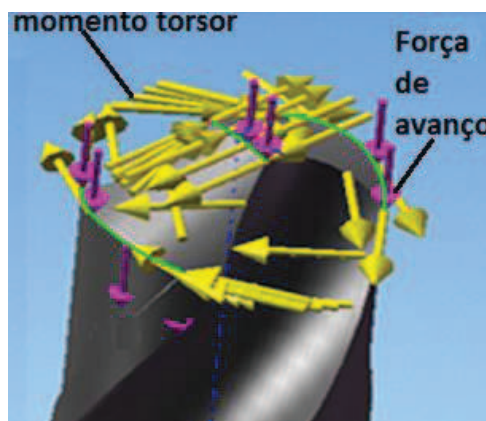
Fonte: Tese de Doutorado Risse, 2006

- Ângulo de saída “ $\gamma$ ” é um valor que pode ser variável, sendo negativo no centro da broca até um valor igual ao ângulo da hélice na periferia o que faz com que o material seja removido em diferentes atuações. Ângulos de saída negativos não tem um bom desempenho a baixas velocidades de corte por minimizarem a ação do corte causando a extrusão do material, condição essa em que se encontra o centro da broca.
- O ângulo de cunha “ $\beta$ ” composto pelas superfícies de saída e de incidência e é o responsável pela resistência da aresta. (OLIVEIRA, 2008).
- Raio de ponta necessário para reforçar a extremidade da aresta, e tem influência na espessura do cavaco, pressão de corte e geração de calor como desvantagem quando muito grande aumenta as vibrações na área de contato da ferramenta e a peça.

## 2.7 DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS DE CORTE.

Segundo Diniz *et al.*, (2008) estudar as forças de usinagem tem como resultados muitos benefícios como informações sobre a potência que será consumida a temperatura do processo e o desgaste da ferramenta.

Para brocas helicoidais os esforços de corte são caracterizados basicamente por duas abordagens, momento torçor e força de avanço estes por sua vez são provenientes da resistência durante o corte de material nas arestas e a resistência oferecida pelo corte e esmagamento da aresta transversal. (STEMMER,2005)



**Figura 21** - Representação de momento torçor e força de avanço

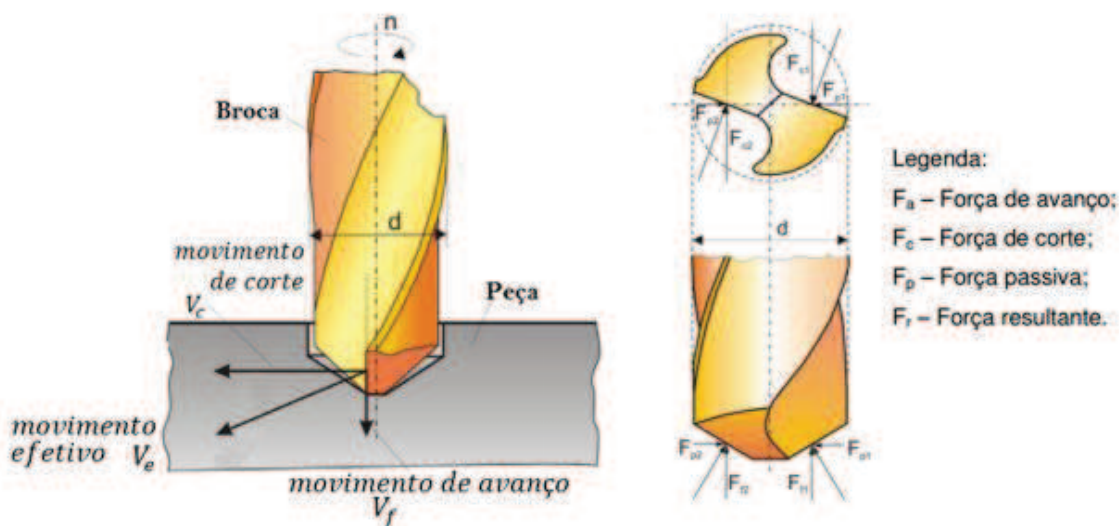
**Fonte:** Adaptado de Zhu, 2015



As forças de usinagem que agem na aresta de corte de uma broca durante o processo de corte podem ser divididas em três componentes: Força de corte ( $F_c$ ), Força de avanço ( $F_f$ ) e Força passiva ( $F_p$ ).

As Figuras 21 e 22 mostram essas Forças. A Força de corte  $F_c$  está relacionada diretamente à resistência do material ao corte, tendo grande influência sobre o momento torçor. A Força de avanço  $F_f$  é decorrente da atuação na aresta transversal de corte e da resistência à penetração do material usinado. Já a Força passiva  $F_p$  atua em uma parcela da aresta principal. As forças passivas atuantes nas arestas tendem a se anular mutuamente e são desprezíveis quando comparadas com as forças de corte e de avanço.

Além das forças é possível também compreender os movimentos de corte, de avanço e efetivo, que respectivamente são definidos como sendo o movimento que é efetuado entre a aresta e a peça sem a influência do avanço, movimento no qual é gerado o cavaco feito entre a peça e a aresta de corte, e pôr fim a resultante dos dois movimentos anteriores.



**Figura 22** - Estimativa das Forças atuantes na aresta de corte  
**Fonte:** Tese de Doutorado Risse, 2006

Diniz; Marcondes e Coppini (2013) argumentam que no processo de furação a ferramenta é submetida a esforços de torção e esforços de compressão relacionados aos movimentos de rotação e avanço respectivamente.

Para se estimar os esforços é necessário que se calcule o momento torçor e a força de avanço, considerando os fatores de influência de forma implícita, através da

fórmula de Kienzle para determinação da força de corte na Eq. (1), determinação do momento torçor Eq. (2) e determinação da força de avanço Eq. (3) no processo de furação em cheio. (STEMMER, 2005). Na tabela 2 pode-se observar os coeficientes da fórmula de Kienzle para aço de baixo carbono.

$$F_c = K_{s1} \times \frac{D}{2 \times \sin \frac{\sigma}{2}} \times \left( \frac{f}{2} \sin \frac{\sigma}{2} \right)^{-z} \quad (1)$$

Onde:  $F_c$  = Força de corte,  $D$  = Diâmetro da broca (mm),  $f$  = avanço (mm/volta),  $\sigma$  = ângulo da ponta da broca,  $K_{s1}$  (Mpa) e  $-z$  = constantes empíricas do material da peça (conforme tabela 1).

$$M_t = \frac{F_c \times D}{2000} \quad (2)$$

Onde:  $F_c$  = Força de corte,  $D$  = Diâmetro da broca (mm)

$$F_f = \frac{1}{2} \times K_s \times f \times D \times \sin \frac{\sigma}{2} \quad (3)$$

Onde:  $F_f$  = Força de avanço,  $D$  = Diâmetro da broca (mm),  $f$  = avanço (mm/volta),  $\sigma$  = ângulo da ponta da broca,  $K_s$  (Mpa) = constantes empíricas do material da peça (conforme tabela 2).

**Tabela 2 - Coeficiente para cálculos de esforços na furação em cheio**

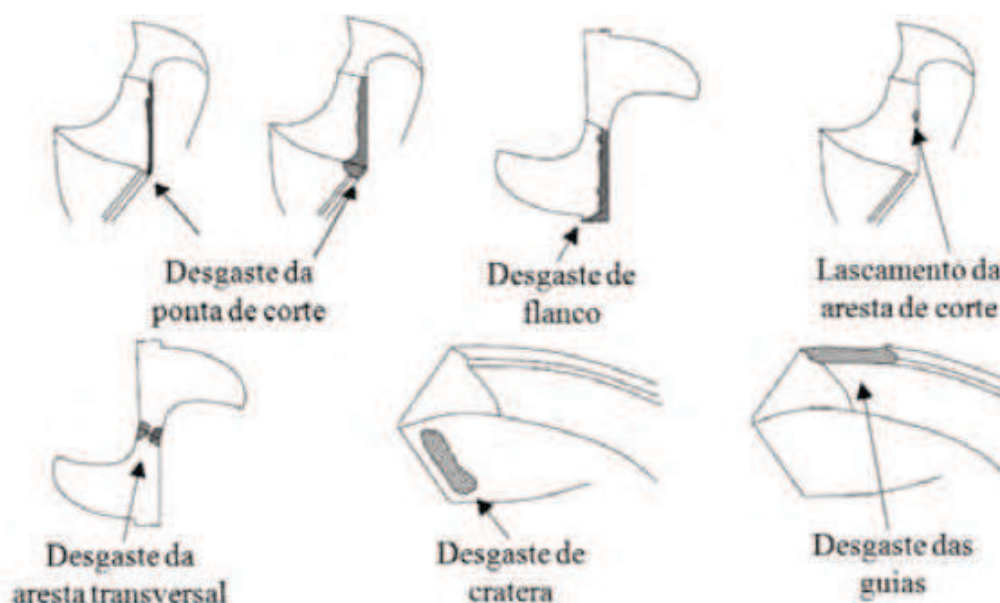
Material	$\sigma_r$ [N/mm2]	Ks [N/mm2]		Ks1	-z
		Avanço[mm/rot]			
		0,1	0,2		
Ligas de alumínio	170	1150	840	400	0,73

Fonte: adaptado de STEMMER (1993)

## 2.8 DESGASTES EM BROCAS

Dentre as principais falhas de funcionamento de ferramentas estão os desgastes, que são oriundos de fatores como desbalanceamento de esforços altas temperatura e pressões de Corte. As consequências decorrentes destes esforços são maiores vibrações, impactos nas paredes dos furos além de imprecisão dimensional e de forma no furo. Os desgastes apresentados nas brocas estão relacionados como os seguintes tipos mais comuns: Desgaste de flanco (VB), Desgaste de cratera (KT), Desgaste da ponta de corte, (W), Desgaste da aresta transversal (Ct e Cm), Lascamento da aresta de corte e o Desgaste lateral ou das guias (Mw).

Conforme apresentado na figura 23



**Figura 23** - Principais tipos de desgaste em Brocas

**Fonte:** Adaptado de Silva *et al.*, 2010

O monitoramento correto destas variáveis ajudou no desenvolvimento de máquinas e ferramentas mais potentes e robustas que tem uma resistência relativamente superior aos modelos mais antigos. Este desenvolvimento se faz constante por causa busca por novas ligas e materiais com características próprias.

Um desgaste prematuro da ferramenta implica em custos de parada de produção ou perda de produto, este é o principal motivo que leva as empresas



fabricantes de ferramentas investirem em estudos complexos e custosos afim de obter uma melhora significativa no desempenho de seus produtos.

## 2.9 TEMPERATURA

Segundo Stephenson e Agapiou (1997), para análises mais equilibradas e consistentes a respeito do corte de material a temperatura deve estar presente na maioria dos sistemas construtivos de compreensão dos processos.

Intrínseco em um sistema onde existem duas temperaturas distintas, obtém-se um gradiente de temperatura, originado pela energia que é transferida de um corpo para outro. Este processo é também conhecido como transferência de calor.

A termodinâmica é a ciência que auxilia na observação deste acontecimento. A primeira e a segunda lei que regem a termodinâmica são aplicáveis contendo a conservação de energia e o estabelecimento do sentido do fluxo de calor.

Três meios de transferência de calor são mais conhecidos e aplicáveis na física: condução, convecção e radiação.

Quando existe condução, a transferência de energia é feita através de uma substância seja ela sólida ou líquida. Este fato pode ser observado atualmente por Três fenômenos: interação molecular, deslocamento de elétrons livres e radiação intermolecular.

A equação de Fourier é utilizada para demonstrar a geração de calor:

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

Onde: k é a condutibilidade térmica, A é a área, T a temperatura, x é a direção do escoamento do calor.

O sinal (-) é consequência da segunda lei que exige que a direção do fluxo de calor seja do ponto de maior para menor temperatura. Embora os conceitos de calor e temperatura sejam distintos eles estão relacionados.

Calor: a definição de calor é tida como energia cinética total dos átomos e moléculas que compõem uma substância.

Temperatura: é uma medida desta mesma energia cinética média das moléculas ou átomos individuais.

Condução térmica é o fenômeno pelo qual calor é transportado a partir de regiões de alta temperatura para regiões de baixa temperatura de uma substância.

Cada material tem um coeficiente de dilatação térmica específico e derivado de fatores como estrutura molecular, densidade e temperatura. Este coeficiente deverá também ser levantado experimentalmente utilizando a definição da Lei de Fourier:

$$k = \frac{\dot{q}}{\left(\frac{\Delta T}{L}\right)} \equiv \frac{\left(\frac{\dot{Q}}{A}\right)}{(\Delta T/L)} \quad (5)$$

Onde:  $\dot{q}$ , fluxo de calor por condução (Kcal/h no sistema métrico); k, condutividade térmica do material; A, área da seção através da qual o calor flui por condução, medida perpendicularmente à direção do fluxo (m<sup>2</sup>);  $dT/dx$ , gradiente de temperatura na seção, isto é, a razão de variação da temperatura T com a distância, na direção x do fluxo de calor (°C/h) ."

Então será aplicada para que se descubra a taxa de transferência de calor por unidade de área. A resistência térmica de condução é dada pela equação:

$$R_T = \frac{L}{k.A} \quad (6)$$

As propriedades térmicas mais importantes são: a dilatação ou expansão térmica, condutividade térmica, calor específico e a resistência ao choque térmico.

Equação de calor:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \eta \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + f(\vec{x}, t) \quad (7)$$

Dilatação térmica:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T} = \frac{L_1 - L_0}{L_0 (T_2 - T_1)} \quad (8)$$

Calor específico:

$$=C= \frac{\partial Q}{\partial T} \rightarrow \left\{ \frac{Cv}{Cp} \right\} \quad (9)$$

Condutividade Térmica:

$$\Phi = \frac{1}{A} \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (10)$$

Uma substancia pode ser considerada isotrópica quando o calor flui da mesma forma em um sistema de coordenadas cartesianas, em teoria o calor pode fluir em várias direções e cada uma com um valor de condutividade térmica diferente.

Na usinagem de metais, altas temperaturas são originadas na interface de cavaco ferramenta. Para Stephenson e Agapiou (1997), as temperaturas de corte aumentam de acordo com a velocidade de corte o que pode influenciar fortemente na ativação dos mecanismos que prejudicam a performance da ferramenta.

E esse, por sua vez, é um forte fator de influência no controle da taxa de remoção de material e no atrito entre o cavaco e a ferramenta de corte. A dificuldade em se obter medições diretas deste fenômeno é causada pelo movimento entre a peça de trabalho e a ferramenta, potencializado pela presença do cavaco que está sofrendo uma pressão para ser conduzido para fora da área de usinagem.

O uso de técnicas inversas em condução de calor se apresenta como uma boa alternativa para a obtenção dessas temperaturas uma vez que essas técnicas permitem o uso de dados experimentais obtidos em regiões acessíveis ou parâmetros conhecidos inerentes ao processo, material e ferramentas disponíveis.

### **2.9.1 Temperaturas no processo de furação**

A grandeza de temperatura se difere das forças de corte no sentido de as forças são definidas por um vetor e, portanto, possuem três componentes, a temperatura por sua vez é um campo escalar que se dissipa em todo o sistema, não podendo fornecer informações pontuais apenas para sua compreensão total (AGAPIOU e STEPENSON, 1997).

O processo de furação assim como os outros processos de usinagem resulta no aumento da temperatura durante o corte do material. Esta característica induz a necessidade de cuidados quanto ao material da peça e parâmetros de usinagem. Uma das peculiaridades da furação tem origem na severidade do processo tendo em vista

que a ferramenta trabalha em grande parte das vezes dentro da peça, dificultando o escoamento do cavaco. Outro aspecto importante a ressaltar é referente à presença da aresta transversal no centro da broca, ocasionando o esmagamento do material conforme já citado.

A geração de calor nos processos de usinagem geralmente é oriunda do atrito entre a ferramenta, a peça e do cisalhamento do material (DINIZ *et al*, 2008), (ASTAKHOV,2014). Conforme citado o atrito entre as interfaces peça e ferramenta produz uma resistência ao corte e escoamento do cavaco.

A velocidade de corte tem significativa contribuição para os valores de temperatura alcançados durante a usinagem, sendo considerada por alguns autores como a principal variável responsável pelo aumento da temperatura.

A medida da variação do avanço em função do tempo é conhecida em furação como taxa de penetração da broca, esta deve em condições ótimas ser a maior possível, e tem origem no produto entre velocidade de avanço e a rotação, portanto uma variação de qualquer um destes parâmetros influencia diretamente neste valor o que é positivo para produtividade. Entretanto o fator limitante para esse aumento de avanço ou rotação é a temperatura. O conhecimento da distribuição e o comportamento da temperatura na região do processo são importantes para o estudo de melhores condições de usinagem e ferramentas mais adequadas. A obtenção destas informações é dificultada devido às características do processo no geral.

O comportamento da temperatura tem influência significativa no desgaste da ferramenta, fenômenos de difusão e oxidação são uma das causas de deterioração da capacidade de corte da ferramenta. Altas temperaturas favorecem também a diminuição da resistência a quente do material na interface de usinagem, podendo ocasionar mudança da geometria na zona de contato (DENKINA e TÖNSHOFF, 2011).

Astakhov, (2006), baseado na lei de Makarow relata a existência de uma temperatura considerada como temperatura ótima de trabalho, que foi segundo ele testada para torneamento com sucesso. Esta temperatura é alcançada através de uma combinação correta de mínimo desgaste de ferramenta, menor força de furação e melhor acabamento do furo.

## 2.10 Estudo e coleta das variáveis do processo

A engenharia se vale de informações de fenômenos físicos para entendimento, quantificação e aprimoramento dos processos de transformação dos materiais. Fenômenos como forças, temperatura, emissão acústica revelam importantes informações que são destinadas a um desenvolvimento tecnológico de melhor desempenho. Com isso o desenvolvimento de sensores capazes de identificar de forma adequada cada tipo de grandeza aliados a equipamentos que sejam capazes de coletar dados, são primordiais para um estudo aprimorado.

Existe uma gama variada de sensores que podem ser utilizados para captação destes sinais, estes podem ser óticos, piezo resistivos, piezelétricos, fotoelétricos entre outros de acordo com a melhor resposta para cada exigência.

Os sinais enviados por estes sensores em geral normalmente são relativamente baixa amplitude de frequência e em sua maioria podem ser influenciados por ou captarem outros fenômenos considerados como ruídos, que não pertencem a grandeza desejada diretamente mais interferem na leitura, vibrações da máquina, variações de geometria da ferramenta como aresta postiça de corte e flutuações do processo necessitam de uma filtragem tornando-os adequados para uma possível amplificação, quando necessário, e posterior gravação de dados em software para que possam ser analisados.

Monitorar o processo demanda de alguns testes preliminares que permitam simular adequadamente a experiência, com o intuito de se reduzir os erros e imprevistos que possam interferir ou até mesmo inutilizar os valores das grandezas que estão sendo estudadas.

O tempo de resposta de cada sinal que o sensor envia (pulso), aliado ao correto e preciso posicionamento do sensor são de vital importância para o sucesso do monitoramento. Grandezas que demandam uma rápida resposta como temperatura, por exemplo, necessitam de um intervalo de captação de sinais rápido, e um posicionamento adequado afim de se obter a medição direta ou indiretamente da

temperatura pontual e possível gradiente de temperatura (DENKENA e TÖNSHOFF, 2011).

## **2.11 Técnicas utilizadas para aquisição de temperaturas no processo de furação**

Os métodos e sensores utilizados para medição de temperatura em geral são por termopares, óticos, junção ferramenta peça de trabalho, por ultrassom, método metalúrgico, através de revestimentos especiais (tintas) ou observando o grau de oxidação que remete a coloração do cavaco. Outros métodos normalmente oferecem informações limitadas sobre a distribuição da temperatura. A escolha do melhor método é subjetiva a característica do processo e a necessidade de cada aplicação.

## **2.12 Controle da temperatura**

Outro fator importante a considerar é o controle da temperatura, para o funcionamento adequado do sistema é necessária à correção em tempo real da temperatura da peça, para este fim serão utilizados termopares.

Segundo a norma ANSI MC 96.1 sensores de temperatura – conhecidos também como termopares, são dispositivos constituídos da junção entre dois metais, onde o contato com uma fonte de calor produz tensão elétrica. Este fenômeno é conhecido como efeito de Seebeck em homenagem ao seu descobridor.

Podem estar disponíveis em diversos tipos de montagem, desde os modelos mais simples apenas com dois metais em contato até os mais sofisticados como incorporados em sondas. Os principais modelos são: K (níquel-cromo ou cromo-alumínio; faixa de utilização: 0 a 1250°C), T (cobre-níquel; faixa de utilização: 0 a 350°C), J (Ferro/ cobre-níquel; faixa de utilização: 0 a 750°C), E (Níquel-cromo / cobre-níquel; faixa de utilização: 0 a 900°C), S (platina 90% - ródio 10% / platina; faixa de

utilização: 0 a 1450°C), R (platina 87% - ródio 13%; faixa de utilização: 0 a 1450°C), B (platina 70%-ródio 30%/ platina 94%-ródio 4%; faixa de utilização: 800 a 1700°C).

Conforme a tabela 3 pode-se observar os diferentes tipos de termopares.

**Tabela 3** - Limites de erros entre os termopares segundo a norma ANSI MC 96.1

**Fonte:** Termics, (2015).

Tipo de Termopar	Faixa de Temperatura	Limites de Erro	
		Standard (Escolher o Maior)	Especial (Escolher o Maior)
T	0 a 350°C	±1°C ou ±0,75%	±0,5°C ou 0,4%
J	0 a 750°C	±2,2°C ou ±0,75%	±1,1°C ou ±0,4%
E	0 a 900°C	±1,7°C ou ±0,5%	±1°C ou ±0,4%
K	0 a 1250°C	±2,2°C ou ±0,75%	±1,1°C ou ±0,4%
S e R	0 a 1450°C	±1,5°C ou ±0,25%	±0,6°C ou ±0,1%
B	800 a 1700°C	±0,5%	-
T	-200 a 0°C	±1°C ou ±1,5%	-
E	-200 a 0°C	±1,7°C ou ±1%	-
K	-200 a 0°C	±2,2°C ou ±2%	-

Uma boa opção no projeto é a escolha de termopares do tipo blindado para evitar a soldagem sobre a peça, o modelo será escolhido para a temperatura de 900°C.

## 2.13 Sensores óticos

Os sensores óticos são constantemente utilizados em medição de temperatura, onde os mais comuns são de medição por radiação infravermelha. Seu funcionamento baseia-se na conversão da radiação infravermelha do espectro eletromagnético em um dado possível de interpretar para o ser humano como um escalar ou imagem representativa.

Entre os tipos disponíveis é possível citar:

Câmera térmica - constituída normalmente por um sensor CMO ou CCD, é uma câmera comum com sensores mais eficazes que captam a radiação infravermelha e converte em imagens que evidencia o calor gerado em determinadas superfícies ou componentes que estejam com temperaturas diferentes, identificando através da

coloração os de maior temperatura. Na figura 24 pode se observar uma câmera térmica em funcionamento.



**Figura 24** - Câmera infravermelha e imagem gerada em funcionamento.

**Fonte:** [www.fluke.com.br](http://www.fluke.com.br)

O termômetro infravermelho ou pirômetro ótico – é composto por um sistema ótico e um detector, onde o sistema mesmo focaliza a radiação emitida pelos objetos sobre o sensor, no qual a resposta é obtida por um comprimento de onda específico. A principal diferença em relação a câmera térmica é referente a área de medição, que no caso do termômetro é normalmente menor e na forma circular conforme a figura 25.

**Termômetro  
infravermelho**



**Maior área de captação  
para maior distância**



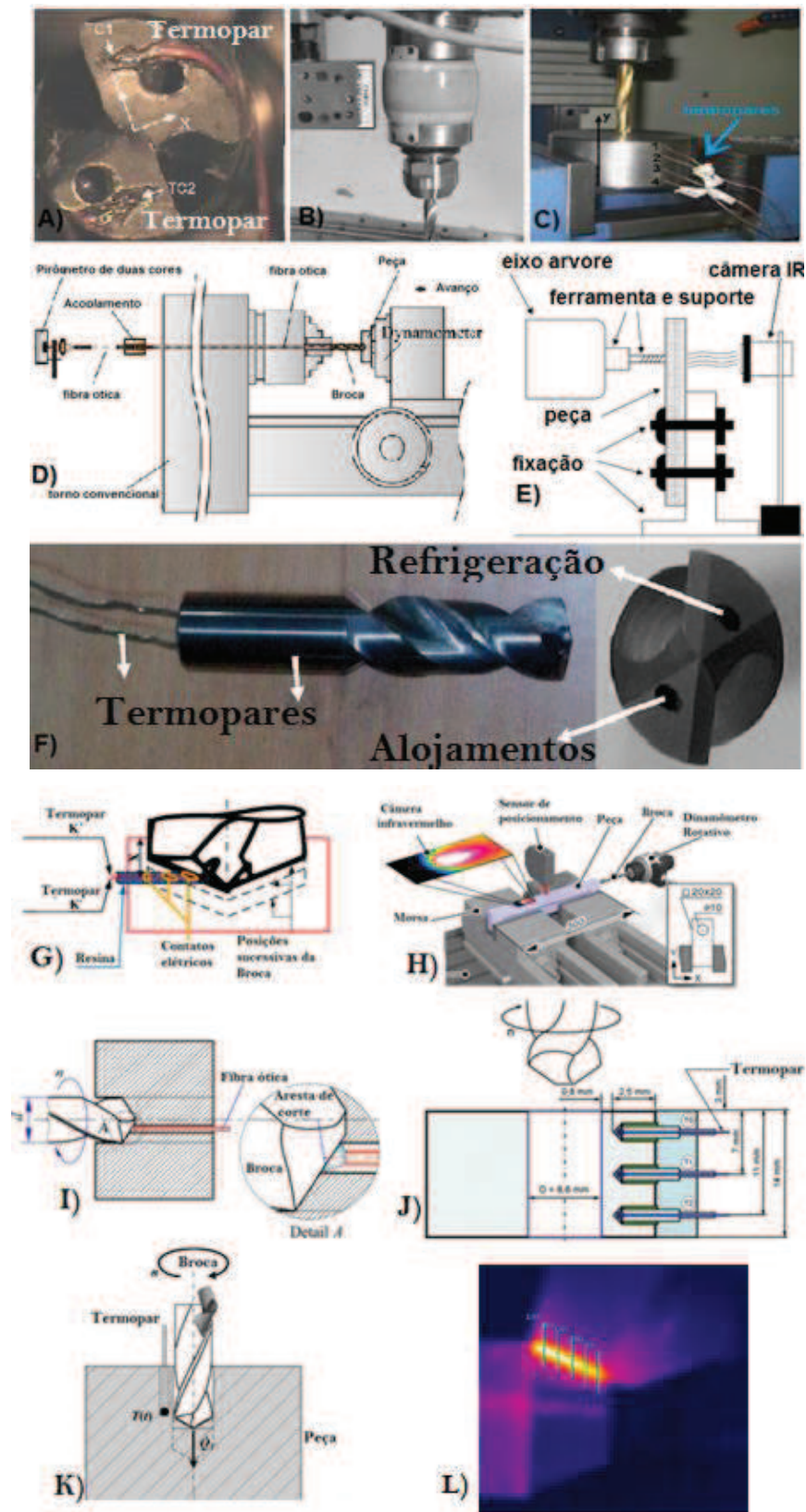
**Figura 25** - Termômetro infravermelho e imagem da área de detecção em função da distância.

## 2.14 Métodos de medição de temperatura

Observando esta necessidade, diversos autores realizaram pesquisas com a finalidade de quantificar e verificar estas variáveis. Muitos métodos e técnicas de medição foram desenvolvidos com a tentativa de se prever alguma definição sobre



este problema. A Figura 26 apresenta alguns tipos de medições feitos por diferentes autores.



**Figura 26** - Diferentes métodos de medição de temperatura.

**Fonte:** Science Direct, (2015).

**Tabela 4** - Informações referentes aos diversos tipos de medição encontrados na literatura.**Fonte:** Informadas na tabela.

<b>Termopar</b>	Fabricaram alojamentos junto aos canais de lubrificação da ferramenta e fixaram os sensores próximos a aresta de corte principal.	Li e Shih (2007),	a)
<b>Rádio frequência e termopar</b>	Fizeram estudos posicionando termopares na peça, próximos a região de corte da ferramenta, onde a transmissão dos dados de temperatura foi realizada através de rádio frequência, possibilitando a medição com a ferramenta em movimento	Le Coz <i>et al</i> (2011),	b)
<b>Termopar</b>	Fixaram quatro termopares verticalmente em diferentes alturas afim de obter dados reais para uma simulação por elementos finitos.	Ainda em 2011, De Sousa <i>et al.</i>	c)
<b>Fibra ótica e pirômetro</b>	Posicionou fibras óticas por toda extensão da broca até o final do furo de lubrificação, na face da ferramenta, e efetuou as medições para seus estudos.	Ueda <i>et al.</i> (2007) e Sato <i>et al</i> em 2012	d)
<b>Infravermelho</b>	Efetuoou a medição da temperatura por infravermelho, na face da peça perpendicular ao eixo de rotação da broca e oposto ao início da furação.	Pérez <i>et al.</i> , (2014)	e)
<b>Termopar</b>	Optaram por posicionar dois termopares nos canais de lubrificação da ferramenta, e utilizaram o método de Tagushi para os cálculos referentes a temperatura.	Çakiroglu e Acir (2013),	f)
<b>Termopar</b>	Efetuaram de forma indireta a medição da temperatura na ferramenta utilizando a broca como sensor, no momento em que ligava os dois polos do termopar a medida que avançava.	Ramirez <i>et al.</i> , 2014	g)
<b>Infravermelho</b>	Observou a temperatura através da medição por uma câmera infravermelha posicionada na face da peça, que está presa a uma morsa, e perpendicular ao corte da broca.	Biermann e Iovkov , 2015	h)
<b>Ótico</b>	Estudou a medição de temperatura por um meio ótico, com a medição diretamente na face da ferramenta em um ponto escolhido na aresta principal	Ueda, Nozaki, Hosokawa, 2007 apud Taskesen, Kutukde, 2014	i)
<b>Termopar</b>	Inseriu 3 termopares em sequência na peça para observar o comportamento da temperatura quando eram aplicados diferentes tipos de lubrificante.	Brandao <i>et al.</i> , 2011	j)
<b>Termopar</b>	Inseriu um termopar paralelo a aresta secundária da broca e analisou a temperatura de corte em materiais que são utilizados na medicina.	V. Bogovic , A. Svete, K. Rupnik, I. Bajsic (2014)	k)
<b>Câmera térmica</b>	Medição por câmera térmica, na aresta principal de corte da broca não medindo a aresta transversal nem o ponto central.	D. Biermann, I. Iovkov (2015)	l)

Mediante a tantas opções de métodos e técnicas referentes a captação e quantificação da temperatura é possível extrair duas conclusões que estão explícitas em todos os estudos, e que servirão de base para apresentação do trabalho posteriormente.

A primeira engloba o sensor, que mesmo por meios diferentes, deve ser capaz de captar sinais de forma confiável e, portanto, a calibração do mesmo é de fundamental importância, com um tempo de resposta ou de envio destes sinais condizente com a variável e o tempo ao qual ela ocorre aliado ao sistema de aquisição e tratamento destes sinais para que se tornem dados confiáveis que servirão de base para os estudos.

A segunda se fundamenta no posicionamento adequado deste sensor, afim de que o mesmo tenha uma interação real e confiável com a variável que é objeto de estudo, sem interferências que possam camuflar ou afetar de alguma maneira, na ocorrência natural do fenômeno ao qual o processo está submetido.

A escolha adequada do sistema de medição é fundamental pois os dados recolhidos do experimento possibilitam procedimentos tecnológicos avançados capazes de prever ou extrapolar situações com uma precisão relativamente alta. Prova disto são os modelamentos matemáticos e simulações de elementos finitos, que são hoje ferramentas muito eficazes na projeção de possíveis situações de esforços da ferramenta e condições de trabalho ao qual a mesma será destinada. Mesmo um sistema de simulação computacional que tem como principais aliados a visualização 3D, e o processamento matemático contínuo capaz de fornecer resultados precisos necessários para entender situações complexas e de serem quantificadas na sua forma natural, é alimentado por elementos que surgiram a partir de ensaios práticos e que, portanto, devem seguir os dois básicos acima citados.

## **2.15 Sistema de aquisição de dados**

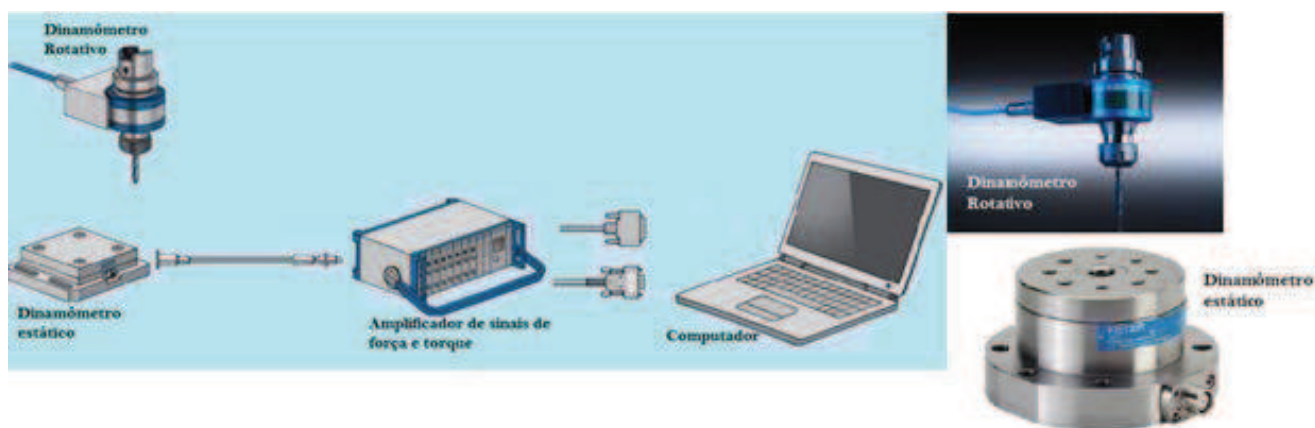
A medição direta e avaliação estática dos esforços da potência necessária para o corte serve como estimativa para estudos menos precisos que possam despertar o interesse para alguma finalidade específica (MACHADO *et al.*, 2009). Porém já na

visão de Ferraresi (1977), para estudos detalhados sobre atividades dinâmicas em máquinas ferramentas existe a necessidade do uso de dinamômetros desde que os mesmos atendam a requisitos básicos de operação, exatidão, sensibilidade, precisão, rigidez são algumas virtudes desejáveis aos métodos adotados para medição.

A estimativa de forças oferece referências teóricas para a operação de furação, contudo a determinação das forças de corte durante a usinagem ainda é muito importante para obtenção de dados mais exatos e precisos. Estas forças podem ser medidas através de sistemas com transdutores de força (célula de carga), elementos sensíveis, por um membro elástico (extensômetro) que converte as grandezas mecânicas como deflexão ou deformação em variações na resistência elétrica do material, aplicando o princípio da Ponte de Wheatstone, onde a variação da resistência elétrica gera uma diferença de potencial entre os braços da ponte, com consequente variação de tensão elétrica conforme a tensão mecânica é a ele aplicada, (MACHADO *et al*, 2009).

Segundo Pinto (2015), em virtude do avanço na tecnologia das máquinas e dos materiais, tanto de produtos quanto de ferramentas, os procedimentos de ensaio de usinagem são cada vez mais frequentes o que gera uma grande quantidade de dados experimentais, porém isso dificulta a coleta e análise destes dados, por isso há anos se faz a aquisição automática de dados, que se por um lado facilita o trabalho e motiva empresas que se destinam a esse fim específico, desenvolvendo sistemas cada vez mais evoluídos e práticos por outro aumenta o custo do ensaio, já que sistemas de aquisição tem um custo elevado.

Um modelo destes aparelhos pode ser observado na figura 27.

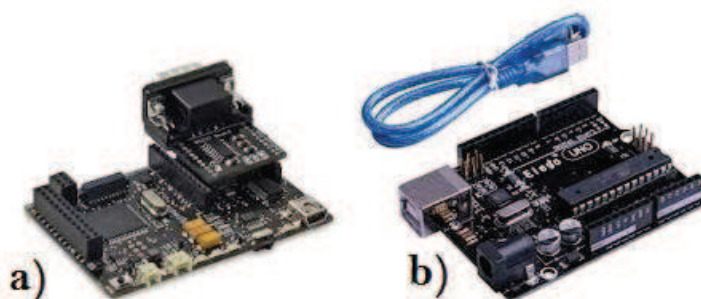


**Figura 27-** Imagens de Dinamômetros comerciais.

**Fonte:** Catálogo Kistler, (2014).

Para pesquisas com menores investimentos, equipamentos como o da figura 27 acima se tornam onerosos e de difícil manuseio, caso necessite de transporte ou adaptação, portanto, outras opções podem ser consideradas. Existem opções de aquisidores de outros fornecedores ou de plataformas eletrônicas com código aberto (open source), que podem ser adaptadas para este fim com relativa confiança.

São exemplos destas plataformas sistemas como: Arduino, Galileo, Raspberry Pi, BeagleBone, Sharks Cove, Nanode, Waspote, Little Bist. Pode-se observar duas destas plataformas na figura 28 a seguir:



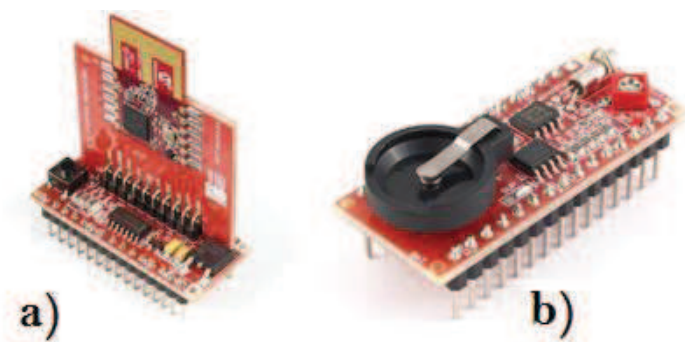
**Figura 28** - Imagens de controladores de código livre: a) Waspote e b) Arduino uno.

**Fonte:** Libelium (2016) e Arduino (2016).

O Arduino em meio a estas opções é um dos mais utilizados devido ao baixo custo e flexibilidade que possibilita diferentes campos de atuação em diferentes áreas. O Arduino foi criado em 2005, por professores italianos com o propósito de interagir em protótipos escolares com um baixo custo. É constituído por entradas e saídas analógicas e digitais, um processador do tipo ATmega, uma entrada de comunicação USB, e um adaptador para alimentação com fonte de energia. Outra vantagem é relativa a programação que é intuitiva e simplificada, e pode receber contribuições voluntárias e por esse motivo obteve grandes avanços que permitiram maiores possibilidades de uso.

Pode se ainda incrementar o uso do Arduino com os chamados Shields, que são pequenas placas dedicadas a determinadas circunstancias ou rotinas específicas e são facilmente conectadas através das entradas ou saídas do Arduino. Uma utilização comum para o uso dos Shields é para o acoplamento e funcionamento de sensores e sistemas de acionamento. A figura 29 mostra dois exemplos de Shields.





**Figura 29** - Imagens de Shields a) é um transmissor ou receptor sem fio e a letra b) serve para anexar um relógio de tempo real e memória externa ambos podem ser acoplados no Arduino

**Fonte:** Libelium (2016) e Arduino (2016).

## 2.16 Temperatura na interface de usinagem – Método da superfície de resposta

Diversos métodos empíricos estão disponíveis para relacionar o comportamento das variáveis do processo, o calor dissipado e a temperatura na zona de formação do cavaco. Técnicas como o método da superfície de resposta são interessantes por associar diretamente os parâmetros de entrada do fenômeno ao comportamento da variável em questão. Este método está disponível em níveis de semelhança com a característica da solução de saída do problema em graus do polinômio base da equação. A fim de prover uma maior precisão e semelhança como o objeto de estudo, optou-se por utilizar uma equação de segunda ordem. Ainda que esta escolha resulte em uma maior carga computacional em relação a solução linear, serão utilizadas apenas duas variáveis independentes, viabilizando a escolha.

A equação base utilizada para a construção do modelo matemático é constituída pela seguinte forma:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j>1}^k \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \epsilon \quad (11)$$

Onde:  $y$  = variável de saída do estudo,  $x$  = variáveis de entrada,  $\beta$  = constantes da equação,  $\epsilon$  = erro aleatório

Deseja-se encontrar um ponto onde os níveis das variáveis maximizem a resposta estimada. Este ponto será onde a derivada parcial das variáveis seja zero:

$$\partial T / \partial V_c = \partial T / \partial f = 0 \quad (12)$$

$V_c$  = velocidade de corte e  $f$  = avanço de usinagem.

Os pontos podem representar um ponto de máximo, mínimo ou sela. Admitindo que o fenômeno é fortemente associado as variáveis  $V_c$  e  $f$ , temos então:

$$T = f(V_c, f) \quad (13)$$

Substituindo na equação de resposta chegamos a forma:

$$T = \beta_0 + \beta_1 \cdot V_c + \beta_2 \cdot f + \beta_{11} \cdot V_c^2 + \beta_{22} \cdot f^2 + \beta_{12} \cdot V_c \cdot f \quad (14)$$

Taylor (1934), e Quiney (1937) realizaram estudos com este enfoque, e seus resultados mostram que apenas de 1 a 3% da energia gasta na formação do cavaco não é convertida em calor.

Trent (1984), propôs a seguinte equação para estimar a geração de calor durante o processo de torneamento pode ser relacionada pela expressão:

$$Pm = F_c \cdot V \quad (15)$$

Em que  $Pm$  é a taxa da potência consumida,  $F_c$  é a força de corte e  $V$  é a velocidade.

Melo (1998), afirmou que a potência consumida durante o processo de usinagem é usada para provocar o cisalhamento do material levando à formação do cavaco e da superfície usinada, e que uma pequena parcela fica retida no material deformado sob as formas de energia elástica e energia de superfície.

Embora os estudos mais frequentes sejam estimados para operações de torneamento, a relação pode ser adotada para o processo de furação, desde que analisada por pontos menores por conta da geometria variável da ferramenta e duplo esforço em função das arestas de corte.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_i \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_i \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_i \frac{\partial T}{\partial z} \right) = (\rho C p)_i \frac{\partial T}{\partial t} \quad (16)$$

Este é o modelo utilizado por Trigger e Chao em (1951), para determinação da temperatura do cavaco no momento em que está sendo formado.

$$T_z - T_0 = \frac{A_1 [F_c \cdot V_c \cdot (1 - B_1) - F_f \cdot V_{cav}]}{c \cdot \rho \cdot V_c \cdot f \cdot l'} \cdot 10^6 \quad (17)$$

Onde:

$T_z$  = temper. do cavaco assim que deixa a zona primária de cisalhamento ( K )

$T_0$  = temperatura ambiente

$A_1$  = fração de enrgia de deformação transformada em calor

( $A_1$ ) = 0,875 para aços recozidos)

$B_1$  = proporção de calor que flui para a peça (  $B_1 = 0,1$  )

$c$  = calor específico do material do cavaco ( J/kgK )

$\rho$  = densidade do material do cavaco ( kg/m<sup>3</sup> )

$l'$  = comprimento do traço do plano de cisalhamento ( mm )

$F_c$  = força de corte ( N )

Os valores de:  $\rho$ ,  $c$ ,  $C^2$ ,  $D^{x_2}$ ,  $f^{y_2}$ ,  $K_{s1}$  são tabelados

$$F_c = K_{s1} \cdot \frac{AP}{\text{sen } \chi_r} ( f \cdot \text{sen } \chi_r )^{1-z} \quad (18)$$

$$F_f = C^2 \cdot D^{x_2} \cdot f^{y_2} \quad (19)$$

$$l' = \text{sen } \chi_r = \frac{co}{hip} \quad (20)$$



Denkena e Tönshoff, (2011) afirmam que o calor gerado é convertido para os seguintes efeitos físicos: deformação e cisalhamento, atrito e tensões residuais.

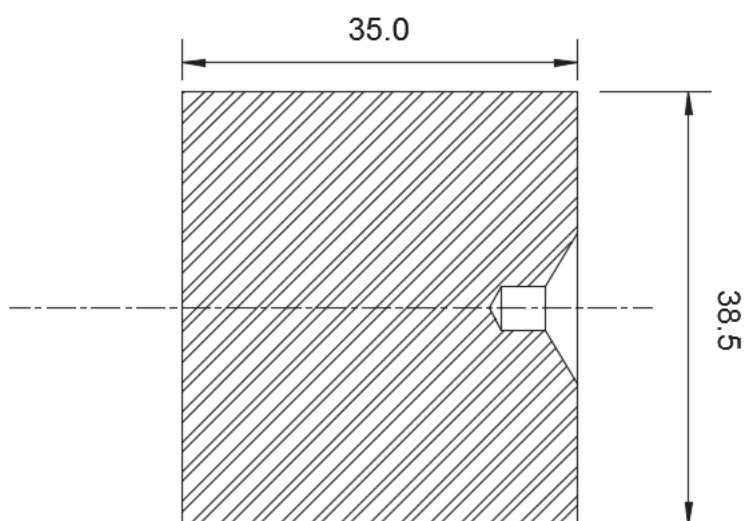
### 3. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais, máquinas, ferramentas e equipamentos utilizados para execução do trabalho. Também serão apresentadas as técnicas e métodos que foram aplicados na realização dos ensaios experimentais. A metodologia foi baseada em um posicionamento específico de um sensor de temperatura e observação do comportamento da temperatura para os diferentes materiais.

#### 3.1 Materiais

O comportamento da temperatura durante a furação em três materiais diferentes foi estudado neste ensaio experimental Alumínio AA20 11F, Latão C360 e aço SAE 1020.

A partir destes três materiais foram confeccionados corpos de prova com as seguintes dimensões:  $\varnothing$  de 38,5mm x 35mm de comprimento. Todos os corpos de prova foram usinados para que mantivessem o mesmo padrão. Também foram feitos furos de centro nos corpos afim de facilitar a entrada da broca e melhor centralização da broca conforme a figura 30.



**Figura 30** - Corpo de prova utilizados nos ensaios de furação.

A geometria foi selecionada de acordo com a ferramenta disponível para os ensaios, recomendada para furos com o comprimento de até uma vez e meia o valor do diâmetro ( $1.5xD$ ), e também de modo a otimizar os ensaios e obter um resultado com uma maior margem de amostras.

A análise da composição química foi feita através do equipamento de espectrometria de emissão ótica presente no laboratório de metrologia da FATEC-SP. Foram feitas cinco medições pelo aparelho para cada material, afim de minimizar o erro inerente ao processo, a média destes resultados para composição química de cada material é apresentada na tabela 5.

**Tabela 5** - Composição química normalizada para as ligas estudadas.

**Fonte:** Adaptado de Matweb (2016)

<b>Alumínio AA 2011F</b>						
	<b>% Al</b>	<b>% Cu</b>	<b>% Bi</b>	<b>% Pb</b>	<b>% Fe</b>	<b>% Zn</b>
Medido	Balanço	5,17	0,435	0,503	0,467	0,252
<b>Latão</b>						
	<b>% Cu</b>	<b>% Fe</b>	<b>% Pb</b>	<b>% Zn</b>	-	-
Medido	Balanço	0,148	2,72	38,63	-	-
<b>Aço</b>						
	<b>% C</b>	<b>% Fe</b>	<b>% Mn</b>	<b>% S</b>	<b>% Si</b>	<b>% P</b>
Medido	0,297	Balanço	0,837	0,0095	0,209	0,0386

### 3.2 Máquinas e Equipamentos

Este tópico visa informar sobre as máquinas e equipamentos utilizados durante a realização dos ensaios. A descrição dos itens está compreendida em cinco sub

tópicos estruturados da seguinte forma: máquinas, ferramentas, dinamômetro, sensores e aquisitor.

### 3.2.1 Máquinas

Todos os ensaios de furação foram realizados em um torno mecânico universal de marca Nardini modelo NODUS 220 GOLD, com 7,5 cavalos de potência e rotação máxima de 2600 Rpm, pertinente ao Departamento de Mecânica, alocado no laboratório de usinagem da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, com segue na figura 31.



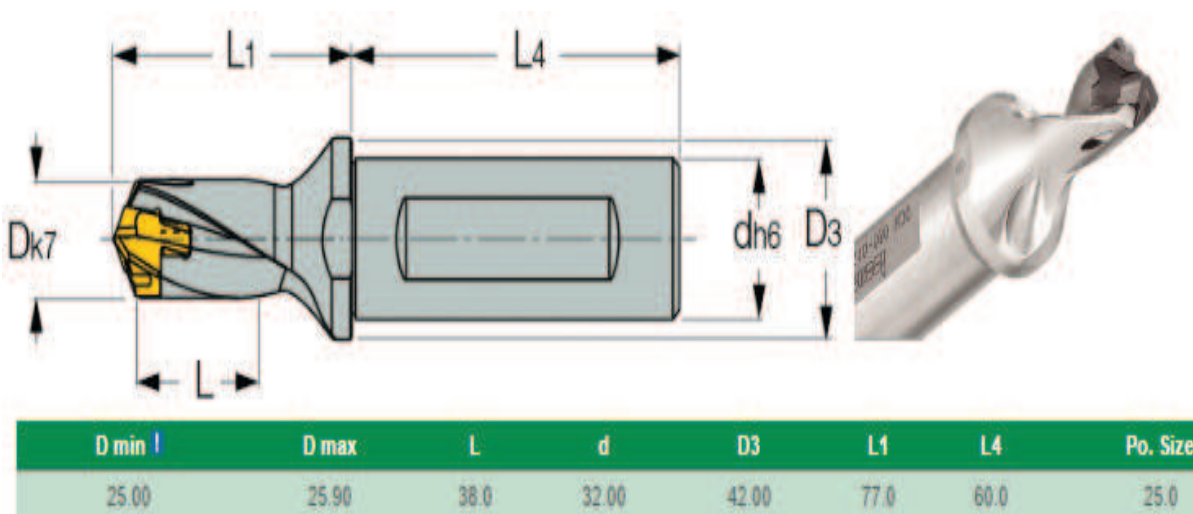
**Figura 31-** Máquina utilizada nos ensaios.

### 3.2.2 Ferramenta

A ferramenta utilizada foi uma broca de metal duro com ponta intercambiável, com ângulo de ponta de 140° e cobertura de PVD TiAlN, cedida pela empresa ISCAR do Brasil, modelo Sumocham DCN 250-038-32R-1.5D / SUMOCHAM ICP 250 IC908 e um suporte apropriado de aço fornecido pela mesma empresa. A broca tem o

diâmetro de 25 mm, com um comprimento “L” recomendável para furos até 38 mm de profundidade, o diâmetro da Haste é de 32 mm e um comprimento de fixação de 60mm. A faixa de velocidade de corte recomendada é de 80 a 120 m/min e o avanço 25 a 35 mm/rot. Durante a realização dos ensaios optou-se por utilizar as velocidades dentro do recomendado, com exceção da menor rotação, alterando apenas os avanços em função da disponibilidade da máquina e segurança.

Na figura 32 a seguir possibilita verificar a descrição da ferramenta.



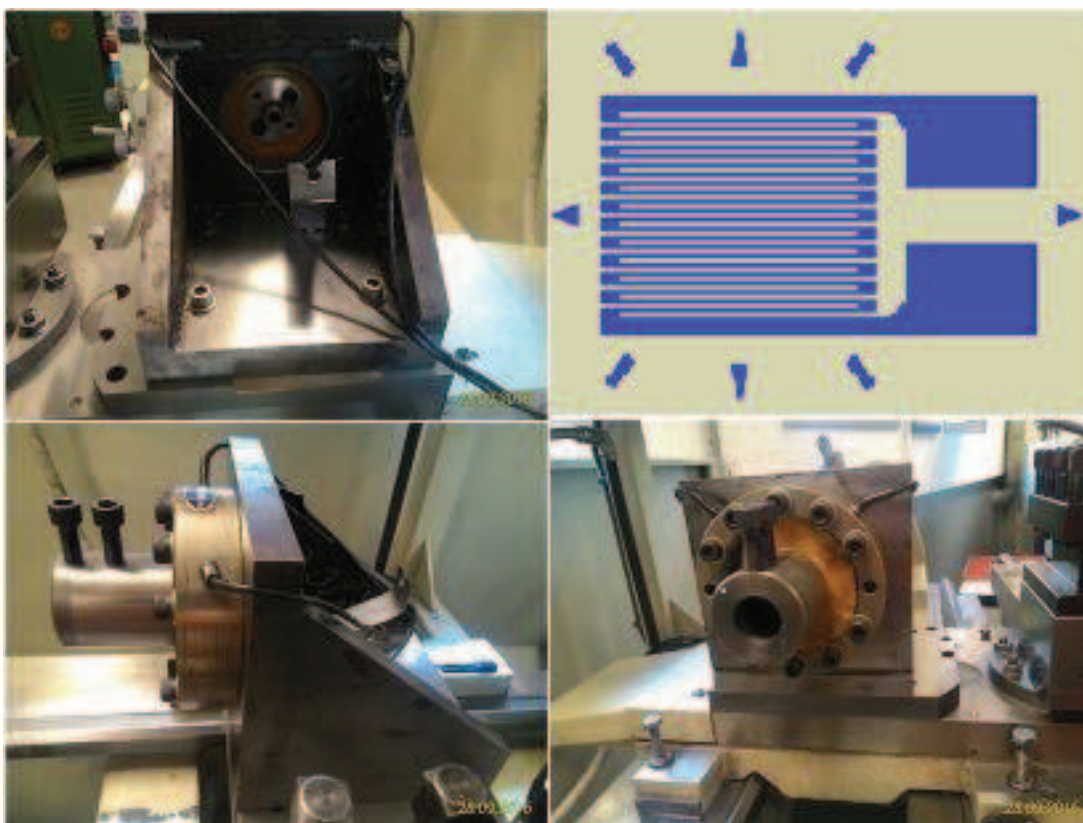
**Figura 32** - Ferramenta utilizada nos ensaios.

**Fonte:** adaptado do catálogo ISCAR, 2016

### 3.2.3 Equipamentos utilizados para realização dos ensaios

Para medição dos esforços foi utilizado um dinamômetro disposto no referido laboratório, constituído por extensômetros (strain gages), montado em um suporte 90° em relação a base especificamente projetado para medição de esforços de força axial e torque radial.

A figura 33 a seguir exibe a forma do dispositivo e o tipo de sensor utilizado para medição das forças.



**Figura 33** - Dinamômetro utilizado nos ensaios.

Para o início dos estudos o mesmo foi calibrado por uma empresa especializada afim de verificar a capacidade de medição do instrumento, o laudo fornecido pela empresa X-cal Calibrações, certificou um erro menor que 5% para as duas grandezas de força e momento torçor.

### 3.3 Aquisitor

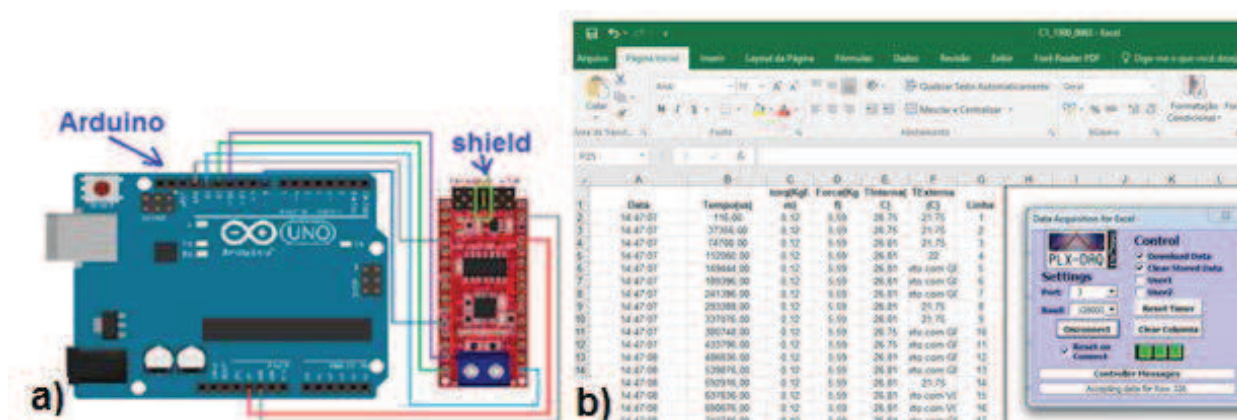
A aquisição dos dados foi feita através de uma placa de prototipagem eletrônica Arduino uno, este tipo de aplicação tem sido muito utilizado em sistemas para a coleta de informações. O mesmo é constituído por um microcontrolador ATMEL ATMEGA16U2, com 14 pinos que podem ser utilizados como entradas digitais e saídas digitais, 6 entradas analógicas e 6 saídas do tipo PWM.

A comunicação entre a célula de carga e o Arduino foi feita por intermédio de mostradores digitais modelo GI 4910 da empresa Panantec A.T.M.I., que já estavam



em funcionamento no aquisitor e cumpriam a função de mostrar os valores de força e torque apenas. A união dos Mostradores digitais e o Arduino propiciou a comunicação com o computador e armazenamento dos dados, uma vez que estes aparelhos possuem saídas analógicas com tensões reguláveis em diferentes valores de voltagem, facilitando a comunicação com o Arduino.

Para a realização da interface com o sistema de sensorização foram aplicadas placas do tipo Shields dedicados a medição de temperatura e forças. A comunicação com o hardware foi realizada através de um programa de comunicação denominado PLX – DAQ a fim de integrar o circuito feito com o conjunto eletrônico e o computador (Figura 34).



**Figura 34** - As figuras a) e b) são referentes a o Arduino e o programa PLX- DAQ respectivamente.

Fonte: [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)

### 3.3.1 Sensores para medição de temperatura

A medição da temperatura contou com dois tipos de sensores diferentes, um por medição direta com termopar e outro por medição com medição indireta por um termômetro infravermelho.

O termopar utilizado foi o tipo K, com  $\varnothing$  de 1,5 mm, isolamento mineral, comprimento da haste de 200 mm e cabo de 1,5 m de comprimento, indicado para o estudo de acordo com as quais seria submetido. A faixa de medição a qual este tipo



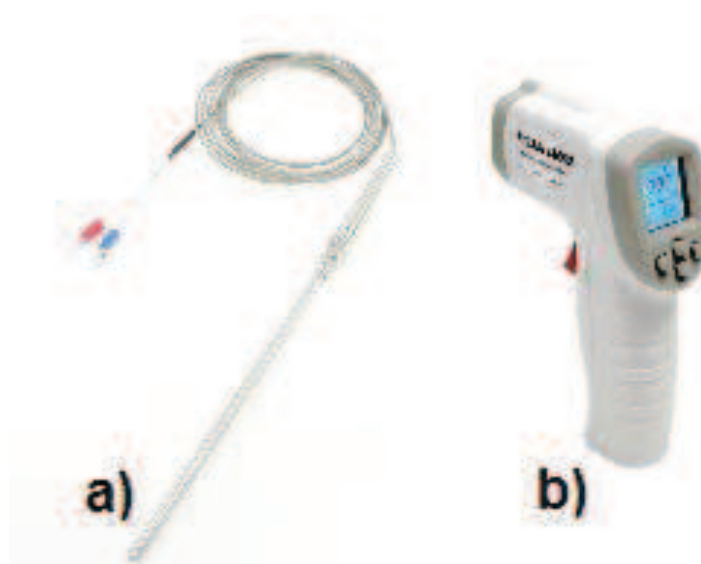
de sensor é indicado normalmente vai de 0 a 1250 °C, com um erro de aproximadamente  $\pm 2,2$  °C ou  $\pm 0,75\%$ .

A verificação da calibração do sensor foi feita em através de uma resistência onde era aumentada a temperatura gradativamente com seis valores diferentes crescentes de 100 a 600°C, e comparação com um termopar calibrado.

O outro tipo de sensor utilizado foi um termômetro digital de marca Hykari modelo HT 455, com capacidade de medição até 550 °C, emissividade ajustável de 0,10 a 1 e tempo de resposta < que 1s para medição sem contato de superfícies.

A verificação da calibração foi feita de forma similar à do termopar, aquecendo uma superfície metálica através da resistência em diferentes níveis de temperatura conforme a indicação do fabricante.

A figura 35 ilustra os dois aparelhos de medição utilizados nos ensaios.



**Figura 35** - a) Termopar tipo K e b) Termômetro infravermelho

**Fonte:** [www.Hikari.com](http://www.Hikari.com)

Nos dois casos para verificação da temperatura com o termopar calibrado foi utilizado um aparelho de medição da marca Minipa modelo MT 455.

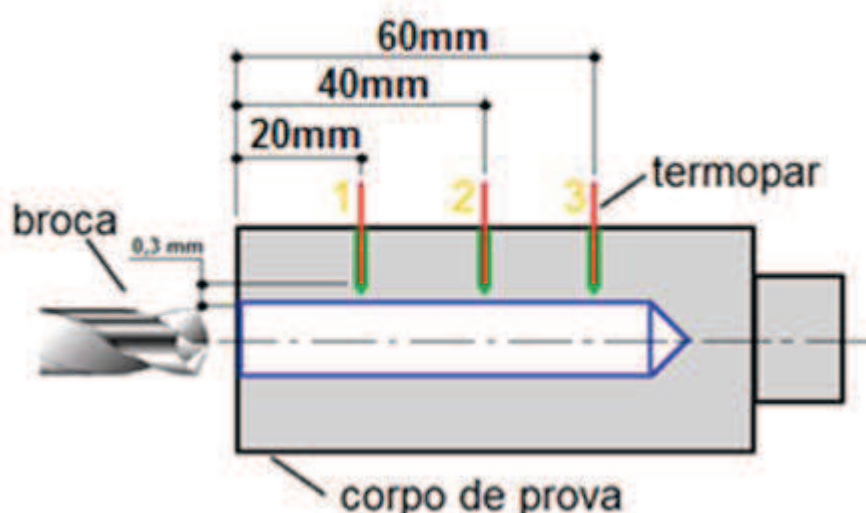
### 3.4 Metodologia dos ensaios

O tema que deu origem aos estudos teve início através de uma observação da mudança de coloração na ponta das brocas novas de aço rápido, que foram utilizadas pela primeira vez, em ensaio de esforços para furação realizados no Laboratório de Usinagem da Faculdade de Tecnologia de São Paulo. Estas brocas apresentavam uma coloração azulada mais intensa na ponta em comparação com as arestas principais. O cavaco resultante dos ensaios apresentava a mesma diferença de cores da raiz para a periferia em condições em que os avanços de corte eram modificados no decorrer destes ensaios, evidenciando uma possível diferença de temperatura entre o centro da broca onde se localiza a aresta transversal e o início do fio de corte principal da broca.

A partir desta observação iniciou-se uma pesquisa na literatura a respeito do comportamento térmico no processo de furação e como seria a sua distribuição pela ferramenta ao longo da aresta principal. A pesquisa revelou variados métodos utilizados por pesquisadores de diversos países que apresentam soluções possíveis para este questionamento, contudo, durante o estudo sobre a geometria de construção da ferramenta e sua atuação no momento do corte uma informação convergiu ao entendimento da maioria dos autores e pesquisadores que tiveram suas obras consultadas. Qual seria o local mais adequado para efetuar a medição da temperatura?

Foram adotadas duas situações possíveis para medição da temperatura sendo através da peça ou em um ponto na ferramenta, lembrando que estas condições já foram realizadas por vários autores conforme a bibliografia consultada para esta dissertação. Afim de se obter o arranjo que representaria melhor a temperatura que a ferramenta fica submetida durante a usinagem, ensaios preliminares foram realizados para comparação e escolha do método mais adequado possível.

O método inicial escolhido para realizar os ensaios preliminares foi do tipo em que os termopares são alojados na peça. Onde foi definida a uma distância de 0,3 mm entre o termopar e a região de corte da aresta secundária da broca conforme a figura 36.

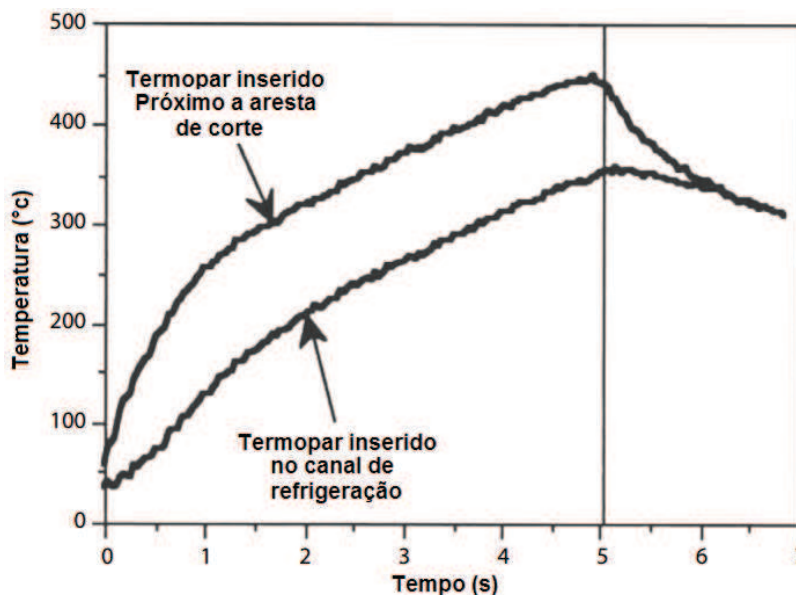


**Figura 36 -** Locação dos termopares na amostra

Este método foi escolhido por ser relativamente de simples execução e pela a possibilidade de ser inserido mais de um sensor para que efetue a medição em pontos diferentes ao longo do corpo de prova, além de evidenciar de forma razoável a temperatura da peça, os dados obtidos podem ser utilizados para uma simulação por elementos finitos ou modelamento matemático, contudo, existem alguns questionamentos que são pertinentes e podem ser discutidos como, por exemplo, o fato da medição do termopar ser pontual implica na necessidade deste estar em contato o maior tempo possível com a região de atuação da ferramenta durante a usinagem, neste método o termopar mede apenas o momento da passagem da aresta de corte da ferramenta no local onde está localizado o sensor, devida a natureza de medição do termopar aliada a rapidez com que o processo é executado, pode não conferir tempo suficiente a aquisitar a temperatura de forma adequada, uma vez que este tipo de sensor necessita de um tempo de estímulo para seu funcionamento. A peça também em função da sua característica de condutividade térmica necessita um tempo para a transferência do calor até a posição em que o sensor foi alocado.

Observando estas considerações, foi analisado um outro método que poderia oferecer uma confiabilidade maior, o método de medição com sensor alocado na ferramenta através do seu canal de refrigeração. Conforme descrito por (Agapiou e Stephenson, 2016) os resultados obtidos através deste posicionamento do sensor são satisfatórios, entretanto, observando o gráfico apresentado por eles em seu livro, nota-se que a distância entre as temperaturas obtidas com termopar no furo de refrigeração

da ferramenta e próximas a aresta de corte são diferentes, como pode se observar na figura 37.



**Figura 37-** Gráfico de Temperatura x Tempo

**Fonte:** Adaptado de (Agapiou e Stephenson, 2016).

Observando o gráfico da figura 37 nota-se que o posicionamento do sensor, influencia na medição da temperatura, onde quando o sensor é inserido no furo de lubrificação verifica-se que a temperatura é inferior em comparação a curva com o termopar posicionado mais próximo a aresta de corte, as diferenças são notáveis também para característica e formato da curva.

Além destas considerações é importante lembrar outros conceitos como, por exemplo, a participação da aresta transversal no comportamento da temperatura, que tem sido objeto de estudo constante e aprimoramento devido ao fato de inicialmente promover a deformação plástica do material até que a broca tenha penetrado na peça o suficiente para que as arestas principais possam atuar iniciando o corte. Esta deformação é fruto inicialmente da força axial e do atrito decorrente do movimento de giro feito pela peça ou pela ferramenta, dependendo da opção escolhida para execução da usinagem.

Esta constatação trouxe reflexão de que a combinação de atrito e força no centro se mantém durante todo o percurso percorrido pela broca ao longo do corte. O processo de furação tem como característica ser um processo de difícil confecção

normalmente, devido à dificuldade de escoamento do cavaco para fora da zona de usinagem, porém a geometria das arestas e canais de saída do cavaco possibilitam a troca de calor que é dissipado para outros componentes do processo conforme visto na literatura consultada durante a pesquisa.

O ponto onde ocorre a deformação plástica possui essa mesma condição em uma escala de proporção muito menor devido a atuação constante, e o acúmulo de calor na ferramenta, portanto, a temperatura poderia ser maior nesta região, que é correspondente a maior temperatura a qual a ferramenta estaria submetida.

Pensando nas condições acima citadas, a forma com o maior potencial de eficácia, capaz de quantificar a temperatura seria através da inserção de um sensor térmico no núcleo da broca o mais próximo possível da aresta transversal, pois desta maneira o mesmo estaria protegido contra fatores externos, ou estímulos que pudessem influenciar na confiabilidade e eficácia de medição da temperatura existente na ferramenta durante o processo de usinagem, para diferentes condições de trabalho em diferentes materiais. O calor é fundamentado pela agitação dos átomos e se propaga em diferentes direções, o centro da broca fornece o calor para o sensor de temperatura por meio de condução possibilitando a medição direta do fenômeno.

Outra vantagem seria que esse sensor pode ser ótico ou um termopar, a medição seria eficaz sob os dois métodos devido à ausência de influência externa, o meio ótico necessitaria de uma condição mais criteriosa por conta da refletividade do ponto de medição e o arranjo de lentes para colimarem o feixe ótico em conformidade com diâmetro do furo, o termopar age independente desta condição e mesmo o comprimento da broca não é um problema pois possui vários tamanhos disponíveis para compra, outro benefício seria o de que o termopar estaria em constante contato com o fornecimento desta energia durante todo o tempo de furação, obtendo assim o tempo necessário para que possa atuar de forma adequada.

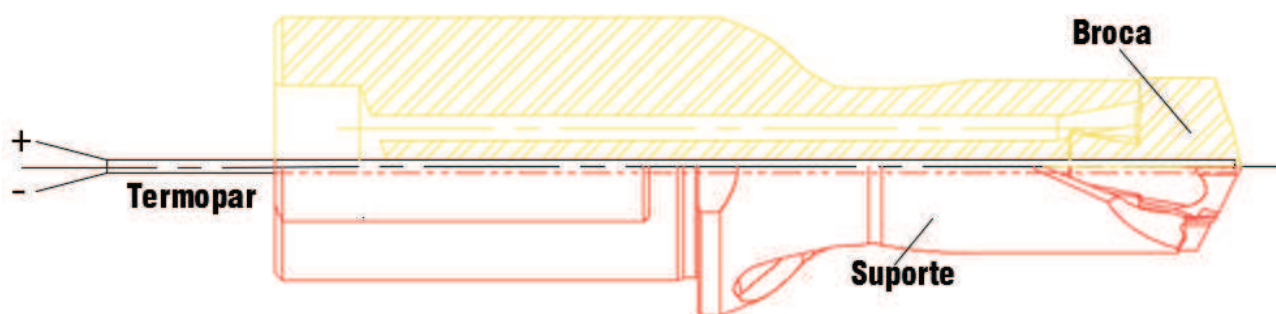
A forma que teria o melhor desempenho para circunstância imaginada, foi a de usar o processo de furação no torno mecânico universal. O motivo de ter sido escolhida esta opção foi pelo fato da ferramenta permanecer parada e a peça sofrer o movimento de giro, isso viabilizaria executar um furo na ferramenta iniciado pela haste seguindo até a ponta com uma profundidade controlada para que não extrapolasse o seu comprimento total, e assim, um sensor poderia ser introduzido neste furo transmitindo os sinais de temperatura naquela seção.

O furo na broca helicoidal, que é um dos modelos mais usuais neste tipo de operação, poderia ser feito através de uma máquina de eletro erosão mantendo-se a devida atenção ao seu diâmetro e posicionamento para que não influenciasse na rigidez da ferramenta. Esta condição seria de difícil satisfação pois o processo de eletro erosão para que cumprisse com a referida exigência demandaria de requisitos de máquinas e operacionais demasiados difíceis por conta do comprimento total das brocas.

Para minimizar este problema foi pensado então em um outro modelo de brocas muito utilizado pelas indústrias as brocas de pontas intercambiáveis, devido ao seu alto custo buscou se então parceiros que pudessem colaborar com os estudos. Uma empresa fabricante de ferramentas de corte contribuiu com a doação das brocas.

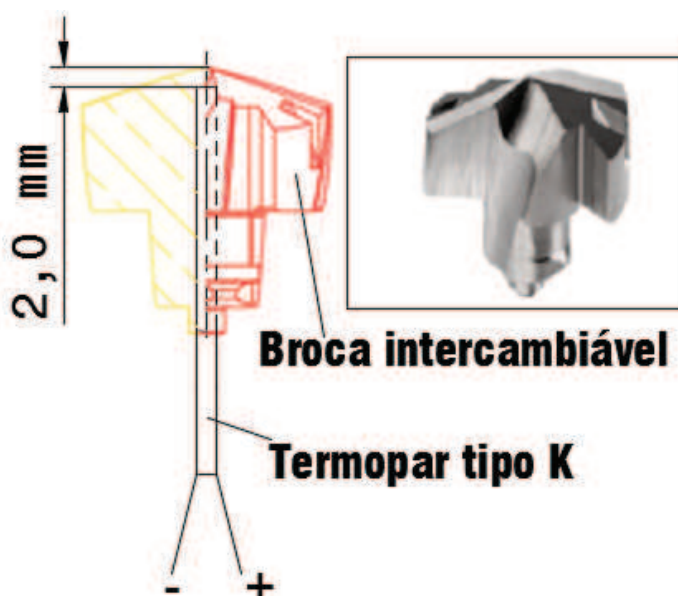
A ponta da broca utilizada é importada pela empresa. O ângulo de ponta da pastilha não é o recomendado para furação de materiais dúcteis como alumínio e Latão, porém em função do tempo de importação de uma ponta com o recomendado ângulo, não haveria tempo hábil para realização dos ensaios se tornando este um fator desconsiderado no estudo.

A escolha da ferramenta mais adequada foi efetuada com base em todos as considerações mencionadas e também no comprimento útil de furação da broca afim de minimizar erros relativos a rigidez, tornando relativamente simples os testes, conforme a figura 38.



**Figura 38** - Suporte, pastilha e termopar montados  
**Fonte:** Adaptado do catálogo ISCAR, 2016

Portanto, a configuração escolhida para o experimento compreende o uso de uma broca de pastilha intercambiável com um furo não passante no centro da pastilha possibilitando o posicionamento do sensor a 2 mm da ponta de corte conforme a figura 39.



**Figura 39** - Representação em corte da pastilha com termopar inserido  
**Fonte:** Adaptado do catálogo ISCAR, 2016

O termopar escolhido foi o tipo K pois o range de aplicação deste tipo de sensor é amplo e cobre uma gama de temperatura suficiente a solicitação dos experimentos. Segundo Agapiou e Stephenson, 2016, a tendência de crescimento da temperatura em uma furação é de aumentar até um patamar que nos trabalhos consultados não ficou quantificada, portanto, o termopar deveria cobrir uma gama de temperaturas variadas e com segurança já que três materiais foram ensaiados e cada um com um comportamento térmico diferenciado.

Outra vantagem do uso do termopar desta forma foi a fácil adaptação ao corpo da ferramenta. Para obter um melhor contato com a superfície da broca foi colocada ainda uma pasta térmica dentro do furo da broca e na ponta do termopar, afim de ajudar na captação da temperatura.

Uma preocupação seria quanto a resistência da broca, devido ao furo feito no centro a mesma poderia ser fragilizada. Pensando nesta possibilidade os ensaios seguiram uma ordem segundo a ductilidade de cada material, o primeiro material ensaiado foi o alumínio, em seguida o latão e posteriormente o aço ao carbono. Os avanços e rotações escolhidos foram baseados em recomendações feitas através dos catálogos consultados do fabricante e a potência disponível pela máquina, os avanços seguiram uma ordem crescente e as rotações uma ordem decrescente, de maneira que as duas variáveis fossem correlacionadas e obtivessem para cada um dos três avanços as três rotações escolhidas. Foram feitos testes anteriores aos ensaios que auxiliaram nesta conclusão.



Para os corpos de prova de Alumínio e Latão foram utilizadas uma ponta intercambiável nova, referente conforme as especificações acima, não se levou em consideração o fator de desgaste da broca, embora seja este um fator de importância para temperatura, o mesmo levaria um longo tempo para apresentar alterações significativas e, portanto, necessitaria de um amplo número de ensaios para que pudesse ser validado. A ponta utilizada suportou todos os ensaios sem mostrar alterações que pudessem ser significativas para o intuito deste trabalho.

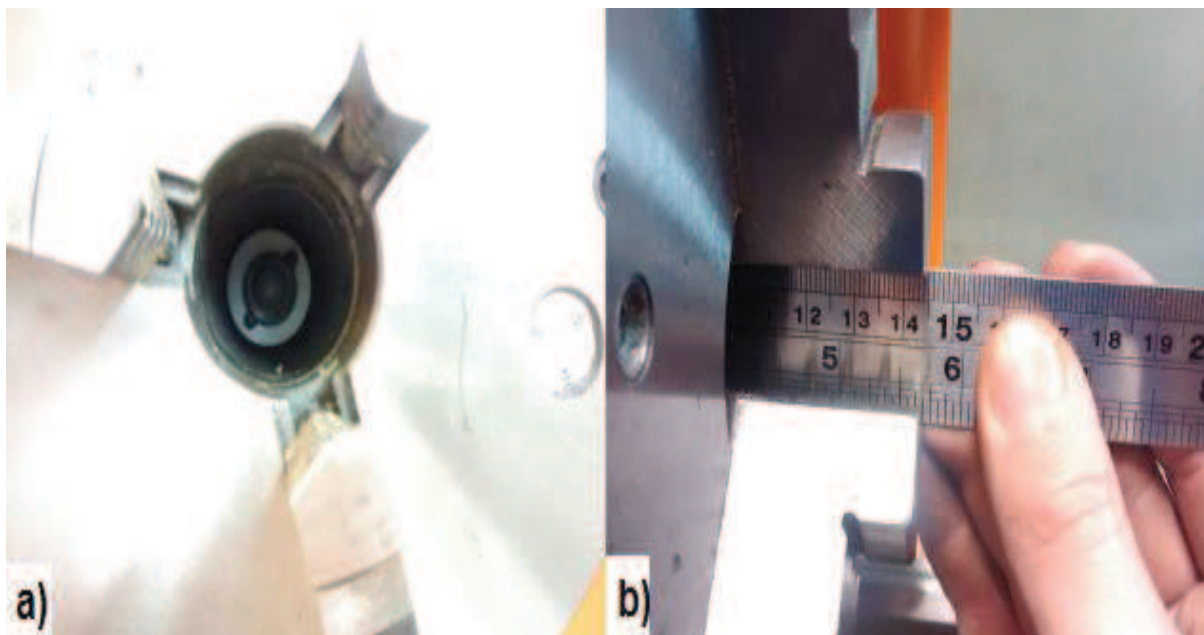
Para os corpos de prova de aço foi utilizada uma outra ponta intercambiável nova, conforme as especificações acima descritas, as rotações foram mantidas e os avanços foram reduzidos, pois, os esforços seriam aumentados devido as características do material, sob as condições escolhidas a broca manteve seu desempenho, porém, ao final do ensaio optou-se por modificar as condições de avanço afim de verificar o comportamento térmico da ferramenta e se a broca suportaria uma condição de maior esforço. Ao ser submetida a um avanço de 0,151 mm/rot e uma rotação de 1500 rpm, devido ao esforço, a peça girou na placa de três castanhas onde estava presa, este fato fez com que a ferramenta viesse a sofrer seu colapso colocando fim ao ensaio após terem sido validadas, para os três materiais, as condições mencionadas conforme a tabela 6.

Optou-se também por realizar os ensaios sem o uso de fluido de refrigeração, pois assim seria possível quantificar a real situação da ferramenta na condição proposta.

A utilização deste método permitiu ainda posicionar um sensor em outro ponto para contribuição na análise do comportamento da peça e do cavaco contribuindo com informações adicionais para o estudo, favorecendo o enriquecimento do trabalho com dados do sistema de uma forma mais ampla.

O sensor utilizado foi um termômetro infravermelho com faixa de medição de 0 a 550°C, captação de emissividade regulável de 0,1 até 1 e área de medição (spot size) variável em função da distância do sensor até a superfície aquecida. Este termômetro ótico foi alocado na parte lateral direita do torno, atrás da placa, onde a peça foi fixada, permitindo que a medição tivesse como referência a face posterior a entrada da broca fornecendo informações de temperatura naquela região. Para o posicionamento correto do sensor foi efetuada uma adaptação que permitiu a aproximação do sensor de forma controlada, com o intuito de definir um diâmetro adequado para medição preferencialmente na superfície da peça de 25mm, visando

diminuir a influência de fatores externos que por ventura interferissem no feixe de medição, conforme a figura 40.



**Figura 40** - a) Termômetro infravermelho e b) distância em mm da face da castanha até a face do sensor.

Na figura 40 é possível verificar, a) representação da forma como o sensor infravermelho ficou posicionado no centro do dispositivo de fixação das peças que seriam usinadas pela parte interna, e b) a distância de 145 mm até a face da castanha que representa 110 mm de distância até a face oposta ao início da furação fornecendo um diâmetro de atuação de aproximadamente 25 mm.

Outras informações obtidas com o experimento foram relativas a forma e os tipos dos cavacos gerado pelas condições impostas nos ensaios. Os cavacos mostraram-se variados e com seus formatos e tipos condizentes com os encontrados neste tipo de usinagem conforme mencionado nas figuras 49, 50 e 51.

Devido ao fato do processo ter sido executado apenas com um furo de centro, a condição de forma do cavaco se altera em função da vibração e alta taxa de esforço a que a ferramenta é submetida. Outro fator de grande implicância é a combinação de avanços e rotações a que os materiais foram submetidos proporcionam diferentes taxas de remoção e, portanto, diferentes temperaturas a que foram constituídos.

### 3.5 Planejamento experimental

O planejamento experimental deste trabalho foi pensado em função de se obter a real temperatura de furação no centro da ferramenta próximo a ponta da broca. Foram feitos ensaios com no mínimo uma réplica para cada material as curvas relativas aos ensaios foram discriminadas nas legendas dos gráficos pelo código MD, seguido do número do ensaio.

Conforme o mencionado anteriormente os parâmetros escolhidos para observação do fenômeno foram: Rotação do eixo árvore (RPM) e Avanço ( $f$ ), de acordo com a seguinte configuração apresentada na tabela 6.

**Tabela 6** - Relação rotação x avanços utilizados nos ensaios de Alumínio AA2011F e Latão C360.

AA 2011F/ Latão		Legenda
$\eta$ (rot/ min)	$f$ (mm/rot.)	
1500	0,063	MD1
1500	0,151	MD2
1500	0,251	MD3
1180	0,063	MD4
1180	0,151	MD5
1180	0,251	MD6
950	0,063	MD7
950	0,151	MD8
950	0,251	MD9

Em seguida a tabela que representa os parâmetros utilizados para o material Aço SAE 1020:

**Tabela 7** - Relação rotação x avanços utilizados nos ensaios do Aço SAE1020.

SAE 1020		Legenda
$\eta$ (rot/min)	$f$ (mm/rot.)	
1500	0,057	MD1
1500	0,063	MD2
1500	0,073	MD3
1180	0,057	MD4
1180	0,063	MD5
1180	0,073	MD6
950	0,057	MD7
950	0,063	MD8
950	0,073	MD9

Para cada combinação de avanço e rotação foram adquiridas seis informações de variáveis como: temperatura interna da broca, tempo, força axial, torque, temperatura da face oposta ao início da furação e temperatura ambiente. Os estímulos referentes as variáveis em questão eram enviados a placa de aquisição de dados que os transmitia a um computador através do software, onde eram organizados por uma planilha todos ao mesmo tempo, com um intervalo de captação de aproximadamente 0,037 segundos.

A variável escolhida como referência para os outros parâmetros foi a força axial já que era a que se manifestava no momento em que a ponta da ferramenta toca a peça e apresentava queda logo após ter sido alcançado o comprimento total pela ação

da ferramenta, como era de se esperar. Esse tempo de atuação da força se tornou base para comparação da temperatura.

### **3.5.1 Análise Fatorial**

Com o objetivo de analisar os resultados obtidos do ponto de vista estatístico, foi produzida uma análise no software comercial MINITAB, sendo possível assim verificar o comportamento das variáveis e parâmetros correlacionados entre si.

Com base nos dados citados no planejamento experimental, foi realizada uma análise fatorial do tipo completa, com dois fatores e três níveis, foi escolhido este tipo de análise pela flexibilidade oferecida em relação a outros métodos, onde podem ser definidos qualquer quantidade de fatores. Foram escolhidos como resposta para a interação as variáveis de temperatura, taxa de aquecimento, força de avanço e momento tursor, e como parâmetros de entrada a velocidade de corte e o avanço.

Gráficos de efeito, de normalidade e de curva de nível foram concebidos durante as análises, afim de se poder identificar sobre diversos pontos de vista a interação dos parâmetros com as respostas fornecidas através da análise do software.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

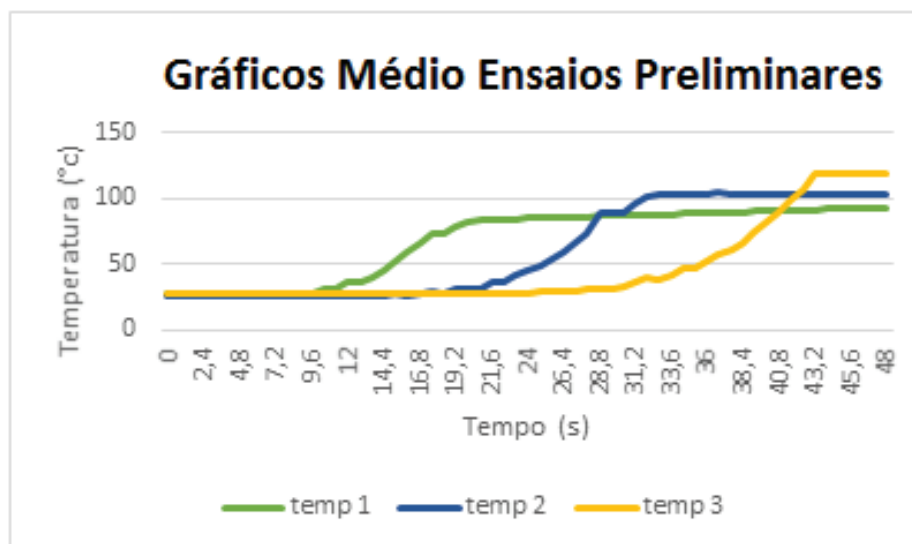
A análise dos resultados desta dissertação foi organizada de forma a verificar o funcionamento do sistema de medição da temperatura de furação proposto e avaliar a influência dos parâmetros de usinagem nos esforços de corte e no comportamento da temperatura. A análise do conjunto destas variáveis seria de grande importância para melhor compreensão dos resultados. Os resultados obtidos com esta pesquisa experimental são apresentados com dados qualitativos e quantitativos da seguinte forma:

- Ensaios preliminares
- Medição da temperatura durante a usinagem
- Análise do tipo e forma do cavaco gerado na usinagem
- Medição de força axial
- Medição do momento torçor

### **4.1 Ensaios preliminares**

Alguns ensaios preliminares foram realizados com a finalidade de verificar as possibilidades quanto ao método de ensaio mais adequado para obtenção da temperatura da ferramenta durante o processo de furação conforme o citado no capítulo anterior. Estes ensaios serviram apenas como método comparativo afim de se estudar o comportamento da temperatura quando medido na peça e posteriormente medido diretamente na ferramenta e através destes resultados foi possível verificar também o funcionamento do sistema proposto. Para a confecção destes ensaios onde a temperatura seria medida na peça, a ferramenta foi fixada na placa do torno e a peça com os termopares inseridos conforme a figura 36, presa ao dinamômetro. Vale ressaltar que o objetivo principal deste trabalho, é a medição na ferramenta, porém uma outra situação, neste caso, possível de ser efetuada foi feita com o intuito de aumentar o conhecimento sobre o estudo.

O gráfico da figura 41 apresenta a média dos ensaios preliminares feitos com os termopares inseridos na peça apenas como resultado destes ensaios iniciais.



**Figura 41** - Dados médios obtidos durante os ensaios para comportamento da temperatura em função do tempo.

O gráfico da figura 41, apresenta que o comportamento identificado através dos termopares foi similar diferenciando-se apenas nos valores máximos de temperatura alcançado entre eles. Observa-se através da velocidade de medição dos sensores de temperatura, que o crescimento da mesma é similar nas três condições e atinge um valor limite constante a partir de uma certa temperatura, estando este valor sob uma variação de pico menor do primeiro termopar em comparação ao terceiro.

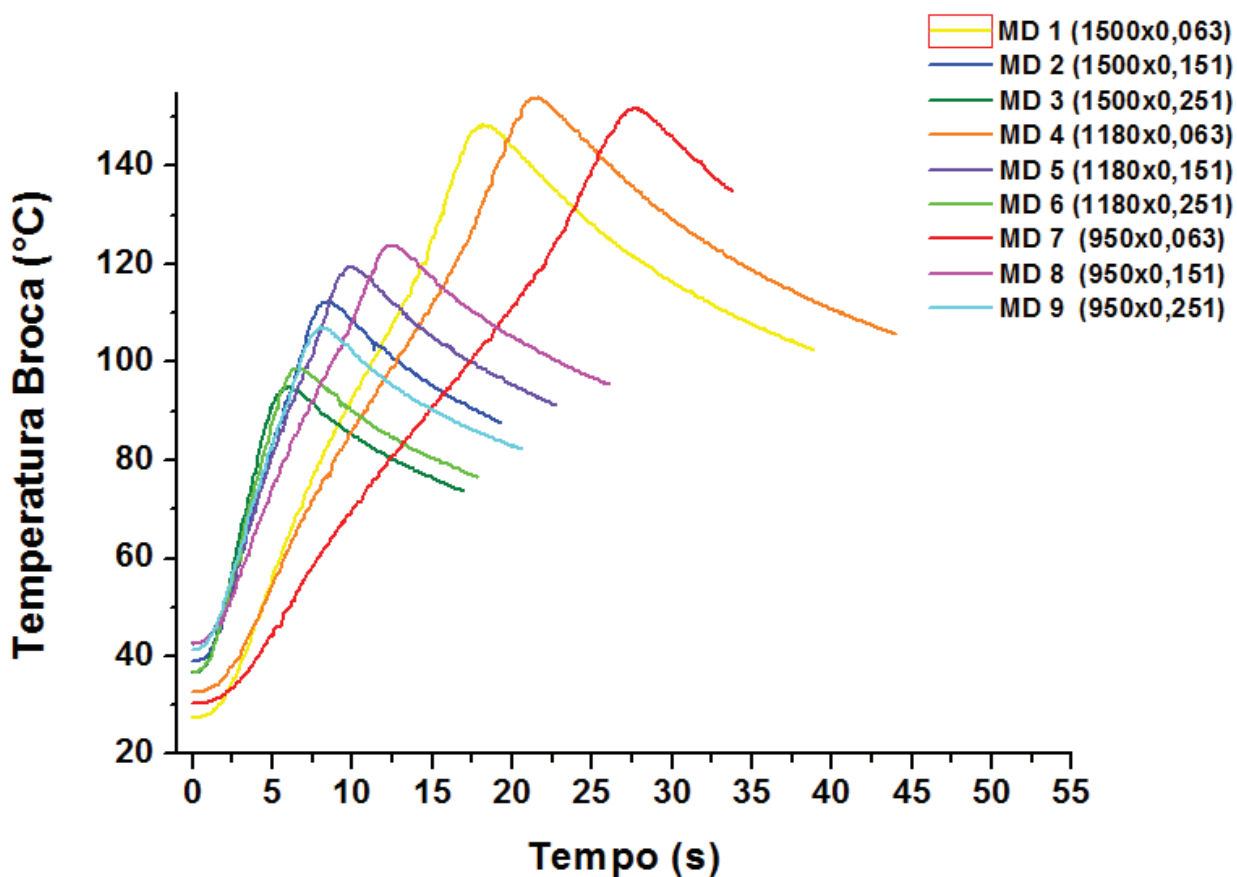
Entretanto o ensaio não revelou o formato da curva de aquecimento mesmo percorrendo um comprimento de usinagem relativamente alto, esse formato seria possível de quantificar talvez através da inserção de um número maior de termopares, o que encareceria o procedimento e o deixaria mais suscetível a erros durante o processo. Outro fator observado foi devido ao fato do sensor ficar mais próximo da região de corte durante um breve instante, uma vez que, a passagem da aresta da broca na zona de medição pode não ter tido tempo o suficiente para registrar a correta temperatura que esta aresta estará submetida. Não é possível quantificar com certeza se a temperatura registrada na peça é a mesma obtida na ferramenta e também em qual região da ferramenta o calor está sendo gerado, para a ferramenta o calor é prejudicial pois acelera o seu desgaste e para a peça o aumento da temperatura pode



ser útil, pois reduz a resistência do material ao corte e minimiza os esforços, mas também pode causar imperfeições ao furo devido a dilatação térmica e ainda causar mudanças microestrutura (KALIDAS e KAPOOR, 2001).

## 4.2 Análise da temperatura durante a usinagem

Durante os ensaios foi observado o comportamento térmico da ferramenta durante sua ação contra a peça. Para o material de alumínio AA 2011 F, foram variados os parâmetros durante a usinagem e os resultados de temperatura são apresentados na figura a seguir:



**Figura 42** - Gráfico Temperatura x Tempo para o material de Alumínio AA2011F

Na figura 42 pode-se observar os valores descritos pelo código MD na legenda, correspondem à média dos ensaios feitos respectivamente os experimentos inicial, réplica e tréplica e se repetirá o referido código MD para os demais gráficos das grandezas apresentadas.

Observa-se através do gráfico da figura 43 um maior valor de temperatura para os mesmos valores de avanços conforme os parâmetros MD4 (1180x 0,063), MD7 (950x0,063) e MD1 (1500x0,063), onde a rotação foi variada e manteve-se o menor avanço ao qual o ensaio foi exposto. Essa condição pode ter sido ocasionada devido ao atrito causado pela ferramenta na peça por um maior tempo de ação.

Sob a mesma observação as temperaturas menores que estão indicadas no gráfico, são para valores de avanço mais elevados conforme os parâmetros MD3 (1500x0,251), MD6 (1180x0,251) e MD9 (950x0,251) evidenciando possivelmente a mudança na temperatura em função da variação da rotação.

As curvas intermediárias representadas pelas curvas MD2 (1500x0,151), MD5 (1180x0,151) e MD8 (950x0,151) obtiveram temperaturas máximas medianas em comparação com as demais curvas, porém, com uma diferença entre elas que pode estar relacionada à rotação, onde a maior temperatura foi expressa pela menor rotação imposta nos ensaios.

A observação destes fatores pode indicar que mudanças mais acentuadas de avanço tem maior representação na temperatura em comparação com as variações de rotação, possivelmente pelo tempo que a ferramenta permanece dentro da peça. Outro fator que pode ser relevante ao caso, é devido a permanência do cavaco no canal de saída da broca, fato que pode contribuir para o aumento da temperatura da ferramenta.

Embora as condições MD 3, MD 6 e MD 9 correspondam as maiores temperaturas em comparação com as outras obtidas com este ensaio, a taxa de crescimento da temperatura se mostrou maior nas condições MD4, MD7 e MD1 respectivamente, esta representação pode ser explicada possivelmente devido ao menor tempo que os ensaios aconteceram em comparação aos ensaios feitos com avanços menores.

As curvas das temperaturas apresentadas no gráfico seguem os mesmos formatos, mesmo com variação dos parâmetros e a temperatura teve constante crescimento até o final da usinagem (Cuesta *et al.* 2016). O sistema de medição para estas situações as quais os componentes dos experimentos foram expostos, mostrou sensibilidade durante a captação da curva, pois indicou resultados e comportamentos parecidos com os de outros trabalhos consultados durante a construção deste estudo (AGAPIOU e STEPHENSON, 2016); (OZCELIK e BAGCI, 2004).

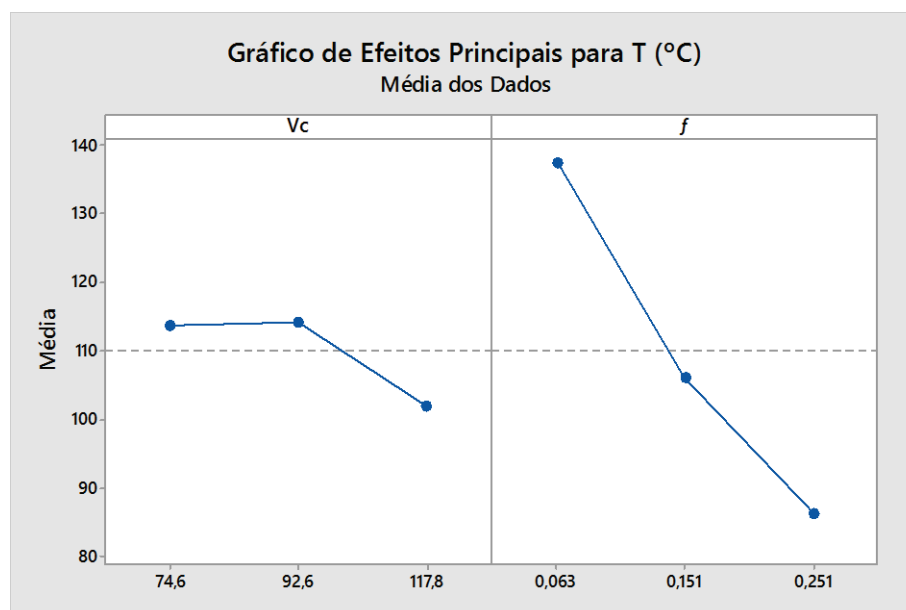
Nota-se através da figura 43 que o aumento da temperatura é mais rápido nas condições MD3, MD6 e MD9. Essa velocidade tem significativa influência nos tempos de usinagem, e o gráfico aponta para mesma combinação de avanços com a variação apenas da rotação um tempo de execução do furo até três vezes maior para a rotação de 950 rpm em comparação com a rotação de 1500 rpm, onde com a maior rotação se tem, provavelmente, a diminuição do atrito e consequente diminuição da temperatura. Essa informação coincide com a recomendação de avanço e rotação feita pelo fabricante da ferramenta.

O aumento da inclinação na parte inicial da curva no gráfico caracteriza o momento em que a ferramenta começa sua efetiva atuação, logo em seguida esta inclinação tem uma queda. Uma possibilidade para essa representação pode ser devido a eficiência de remoção de cavaco da ferramenta aliado ao maior tempo de formação que este cavaco possui, assumindo uma forma mais adequada a sua retirada da zona de usinagem e transportando uma maior parcela do calor que está sendo produzido pela usinagem em situações com menores avanços (BOROIU *et al.*, 2012).

Nas ocasiões em que os avanços foram maiores, o tempo que o cavaco teria para constituir o formato que facilitaria sua remoção é reduzido, expulsando este cavaco de forma menos efetiva e com tamanhos menores para os canais de saída do cavaco fazendo com que o mesmo se acumule, e também não tenha o tempo necessário para troca térmica que possibilita que este cavaco receba uma parcela de calor maior, resultando no aumento de temperatura da ferramenta oriundo do acúmulo deste calor (JINDAL, 2012).

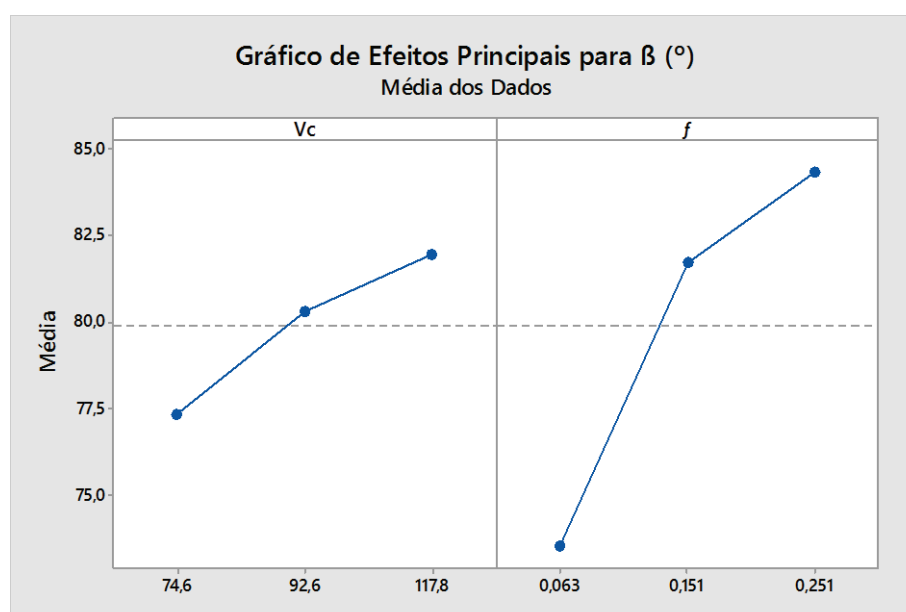
A adição de cobre na composição da liga de alumínio normalmente tem a ação fragilizadora do cavaco tornando o mesmo quebradiço para o processo de furação este fator pode influenciar de forma negativa, pois dificulta a remoção deste material da área de usinagem.

Com o intuito de se ter uma visão estatística foram construídos gráficos de influência para os valores de temperatura da broca, ângulo de inclinação, força de avanço e momento torsor obtidos com os ensaios durante a variação do avanço e da velocidade de corte. Este estudo serviu para que se pudesse verificar através de um outro modelo gráfico os resultados obtidos com os ensaios melhorando assim o entendimento sobre o fenômeno. A figura 43 apresenta o gráfico de influência da temperatura da broca na liga de alumínio AA2011F.



**Figura 43** - Gráficos de efeitos para a liga de alumínio AA2011F.

A figura 43 apresenta a influência da velocidade de corte e avanço na variável temperatura da ferramenta ( $T$ ), observa-se uma maior influência do avanço em relação a velocidade de corte para a temperatura da ferramenta, pois, conforme o avanço é aumentado existe uma tendência de queda para temperatura. Quanto a velocidade de corte não foi possível verificar uma clara influência do parâmetro. A figura 44 apresenta o gráfico de influência feito para a taxa de crescimento da temperatura representada por  $\beta$ .

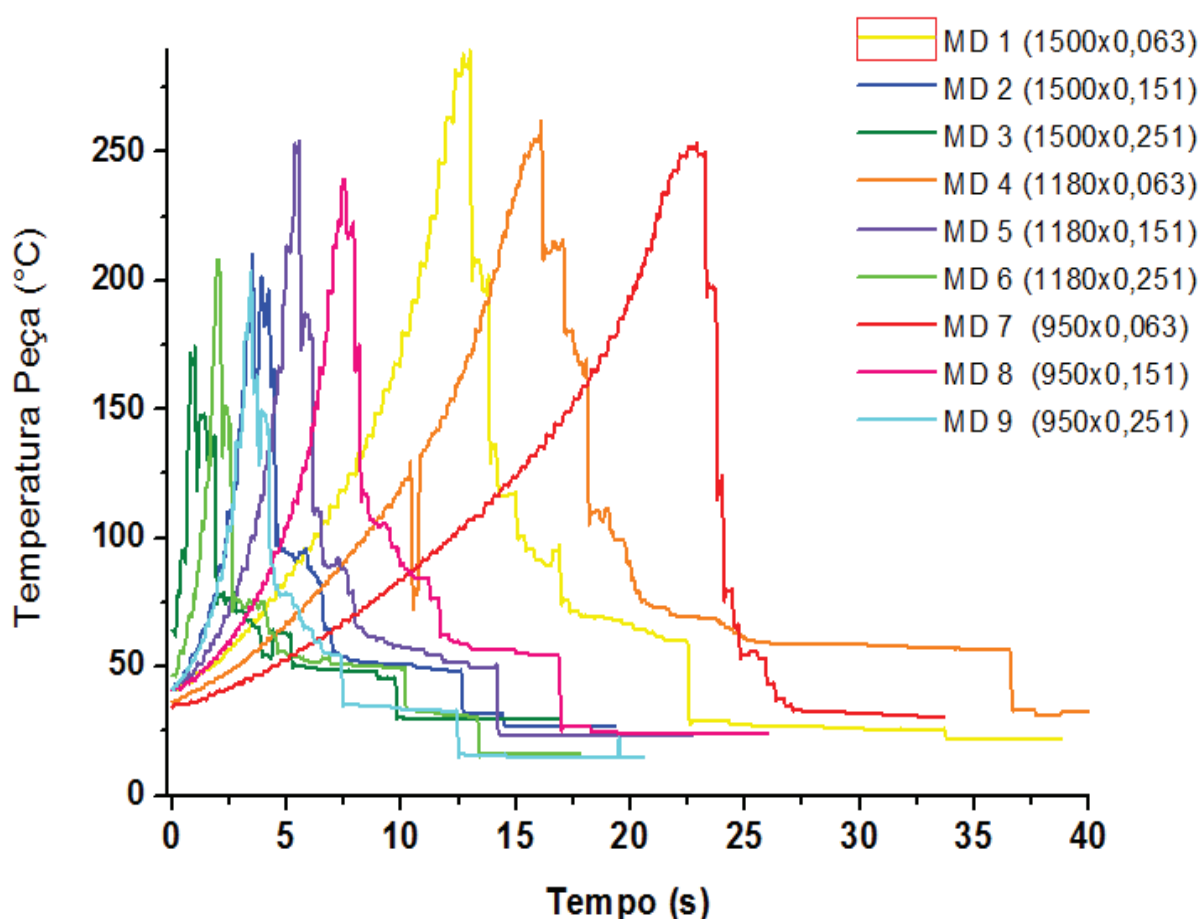


**Figura 44** - Gráficos de efeitos para a liga de alumínio AA2011F.

Nesta figura pode-se perceber que os dois fatores tiveram influência sobre o ângulo porem fica de difícil detecção qual o que possui maior representatividade, mas é possível notar que o aumento da velocidade de corte provoca o aumento do ângulo assim como o aumento do avanço produz o mesmo efeito.

O sensor posicionado no centro da broca registrou o aumento da temperatura em constante crescimento seguindo por todo tempo de usinagem até o final dos experimentos com os três materiais.

As temperaturas dos cavacos gerados na superfície oposta ao início da furação foram quantificadas através de um termômetro infravermelho conforme o mencionado anteriormente e deram origem ao seguinte gráfico:



**Figura 45** -Gráfico Temperatura da superfície oposta ao início da furação x Tempo para o material de Alumínio AA 2011F

No gráfico 45 observa-se um aumento no valor da temperatura conforme o esperado devido ao material da ferramenta ter uma resistência a temperatura elevada em comparação ao material da peça, o alumínio tem como característica a fácil

dissipação de calor devido a sua condutividade térmica, o gráfico mostra ainda as temperaturas de pico as quais o cavaco atinge ao final do furo.

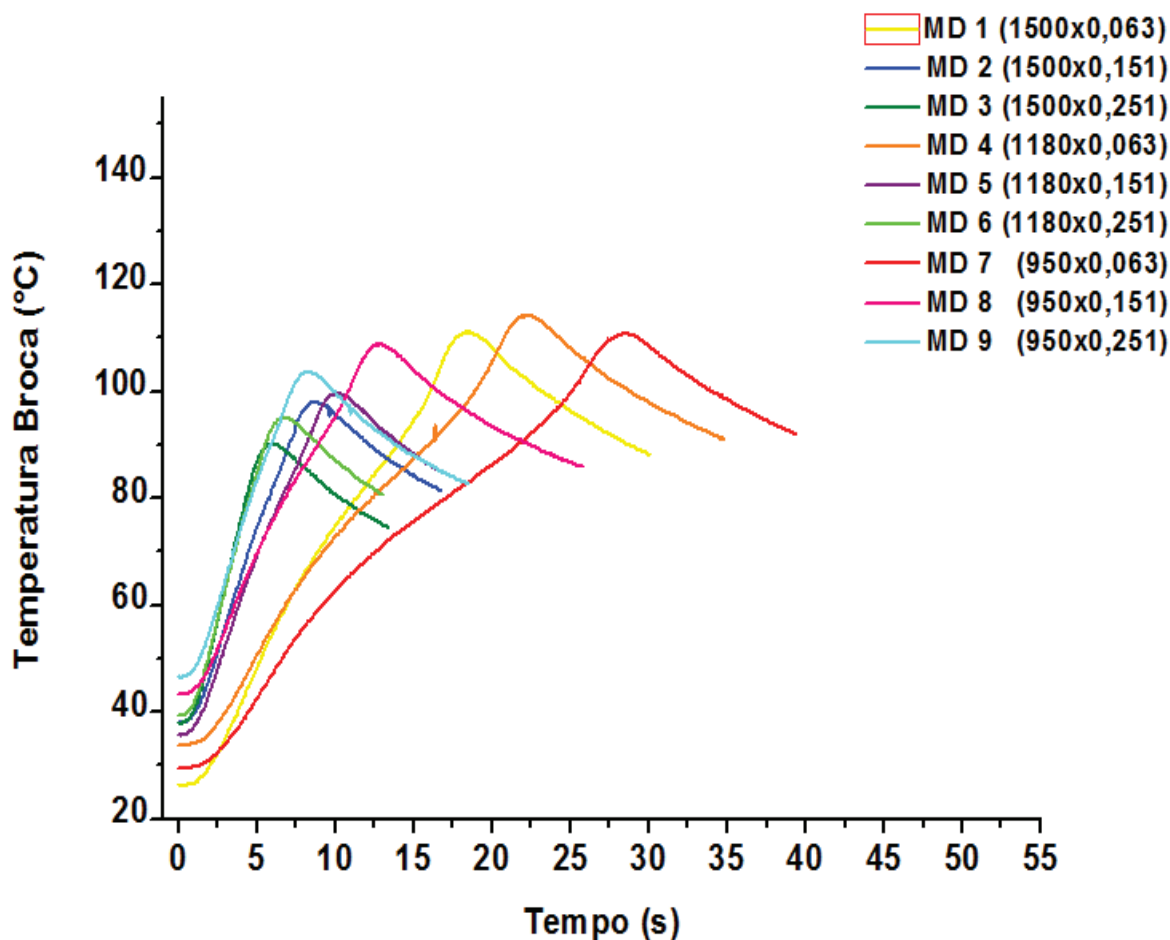
É possível analisar ainda a coerência dos resultados do primeiro gráfico apresentado, onde, para valores maiores de temperatura na ferramenta obteve-se, uma inversão da ordem progressiva da temperatura para a superfície medida na peça, onde as condições que apresentaram maiores temperaturas continuaram sendo as mesmas condições MD4, MD7 e MD1, entretanto, com uma inversão de valores máximos assumindo a seguinte ordem MD1, MD4 e MD7.

Uma possível explicação para esta inversão pode ter sido em função da transferência de calor ocorrida durante cada condição e do tempo de exposição, por exemplo, a condição MD1 submeteu a ferramenta a uma temperatura em torno de 140°C, representou na superfície da peça uma temperatura em torno de 228°C, indicando que o calor pode ter sido transferido, possivelmente, naquela condição, em uma parcela maior para peça em relação a parcela recebida pela ferramenta, o que explica a inversão de valores, ocorrendo de forma semelhante para as outras duas condições MD4 e MD7. O mesmo efeito é observado nos testes MD6, MD9 e MD3.

As variações das temperaturas máximas para as mesmas condições de avanço não mostram grandes oscilações nos valores.

A medição do aquecimento da ferramenta mostrou resultados também para liga de Latão C360 e seus efeitos são apresentados a seguir em acordo com os mesmos critérios da liga de alumínio.

Para a liga de Latão C 360 os resultados das temperaturas medidas na ferramenta são mostrados no gráfico da figura 46.



**Figura 46** - Gráfico Temperatura x Tempo para o material de Latão C360

**Fonte:** própria autoria

Semelhante ao alumínio, as temperaturas maiores foram referentes as combinações MD4, MD1 e MD7, possivelmente devido a mesma atuação do atrito. Os valores máximos de temperatura são menores, supostamente alterados pela diminuição dos esforços de corte, que serão discutidos no texto futuramente.

De forma similar, as médias dos ensaios MD3, MD6 e MD9, obtiveram os menores picos de temperatura, porém, com uma diferença de inclinação das curvas muito mais próxima mantendo essa proximidade para o aumento da temperatura, essa proximidade pode ter sido influenciada devido a temperatura inicial ter um valor de partida maior, especialmente para a combinação MD9, a explicação para esta temperatura inicial ter sido maior pressupõe um acúmulo de temperatura na ferramenta, baseado no fato dos ensaios terem sido feitos de forma consecutiva, não restando o tempo hábil para o resfriamento da broca.



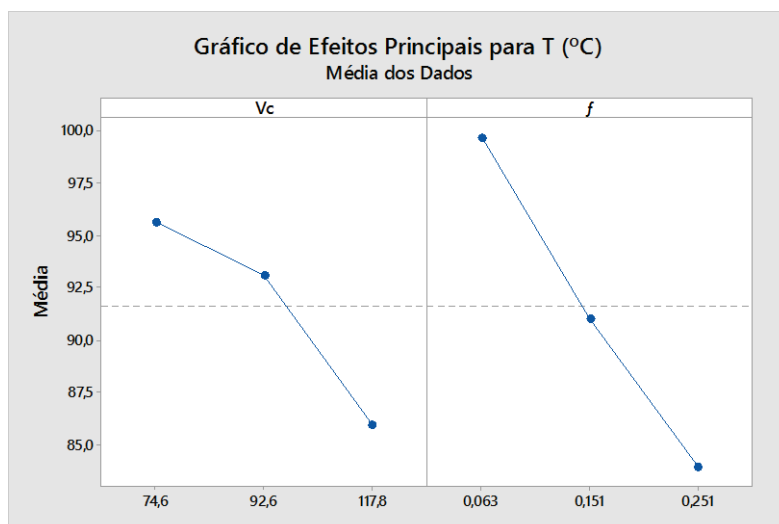
O comportamento dos arranjos MD2, MD5 e MD8, se mantiveram com temperaturas máximas intermediárias com expressão maior para a combinação MD8, ficando próxima, em valores de temperatura da condição MD1. Provavelmente o valor da rotação utilizada de 950 rpm indica uma variação na temperatura máxima atingida, ocorrendo de forma similar para os três valores de avanço 0,063, 0,151 e 0,251, esta observação pode ser constatada de forma similar para a liga de alumínio. Esta rotação corresponde a um valor de velocidade de corte aproximadamente 7,5% menor do que a velocidade mínima recomendada pelo fabricante, obstaculizando a efetivação plena do uso da ferramenta.

É importante ressaltar que este parâmetro foi adotado devido à ausência de uma rotação que englobasse a velocidade de corte proposta pelo fabricante além dos valores de 1500 rpm e 1180 rpm, já utilizados como base nos estudos, sendo que, para rotação máxima disponível pela máquina de 2360 rpm o valor correspondente de velocidade de corte seria de 185 m/min superior aos 120 máximos recomendados, o que demandaria de uma exigência de rigidez do sistema elevada.

As inclinações referentes as taxas de crescimento da temperatura apresentaram pequenas particularidades, motivadas pelas diferenças de velocidade de crescimento da temperatura com variadas inclinações apresentadas em todas as condições dos ensaios, notadas de forma mais evidente para a condição MD7 (950x0,063), com um comportamento análogo ao ensaio feito com alumínio, porém, com maior expressividade. A inclinação inicial é mais acentuada e vai se modificando ao longo da usinagem seguindo um formato sigmoide voltando a ser mais pronunciada à medida que a temperatura de pico tende a ser atingida.

O percentual de chumbo existente no Latão C 360 que foi utilizado nos ensaios pode ter influenciado nos picos de temperaturas obtidos, isto devido ao motivo que justifica o seu uso neste tipo de material. Normalmente o chumbo tem no latão a função parecida com o cobre no alumínio, onde, cada material tem propriedades específicas e, portanto, comportamentos diferentes. No caso do comportamento térmico o chumbo introduzido na liga com a finalidade de facilitar a usinagem contribuiu para a quebra dos cavacos, como a condutividade térmica do alumínio é maior que a do latão, os cavacos da usinagem do alumínio poderiam dissipar mais calor para o ambiente, já os cavacos de latão podem ter removido uma porcentagem de calor maior por ter uma menor dissipação para o meio ambiente (VILARINHO *et al*, 2005) e (NOBEL *et*

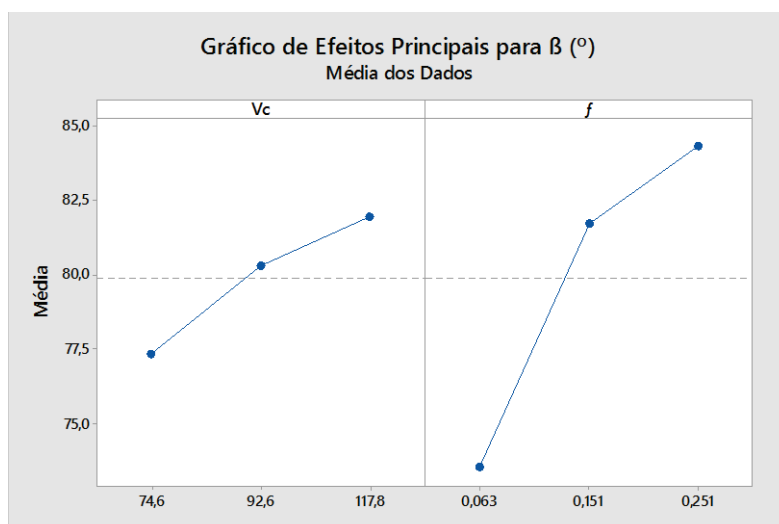
al, 2014). Na figura 47 é apresentado o gráfico de influência da temperatura da ferramenta (T) para o material Latão C360.



**Figura 47** - Gráfico de influência Temperatura para o material de Latão C360

Semelhante ao que aconteceu com o alumínio o avanço parece ter contribuído com uma maior parcela de crescimento da temperatura, a velocidade de corte participa com uma influência menor em relação ao avanço, porém um pouco mais expressiva quando comparada com a do gráfico de alumínio.

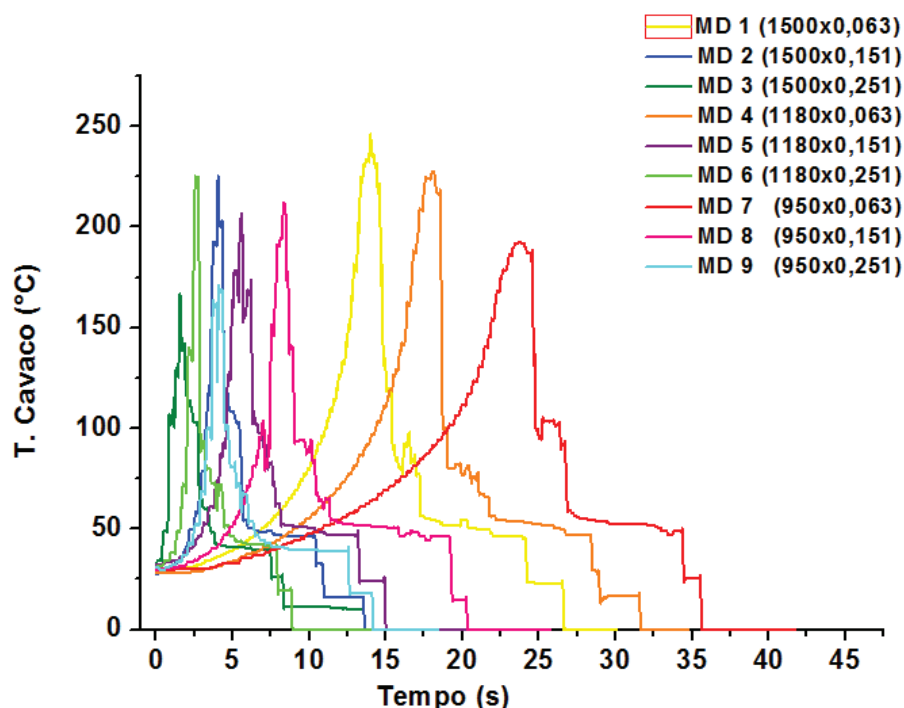
Quanto a inclinação  $\beta$ , pode-se verificar os seus resultados de acordo com a figura 48.



**Figura 48** - Gráfico de influência Temperatura para o material de Latão C360

Nesta figura nota-se que a inclinação de  $\beta$  foi pouco influenciada pelas alterações da velocidade de corte e obteve uma maior modificação durante variação

do avanço. Na figura 49 a seguir pode-se verificar o comportamento da superfície oposta ao início da furação.



**Figura 49** - Gráfico Temperatura da superfície oposta ao início da furação x Tempo para o material de Latão C 360

Pelo gráfico da imagem 49 nota-se um comportamento semelhante nas temperaturas obtidas durante a medição dos ensaios dos corpos de prova de latão se comparados com os valores obtidos com a medição das amostras de alumínio. Os valores de pico de temperatura são próximos para os dois materiais, entretanto percebe-se que para alumínio este pico de temperatura foi ligeiramente maior.

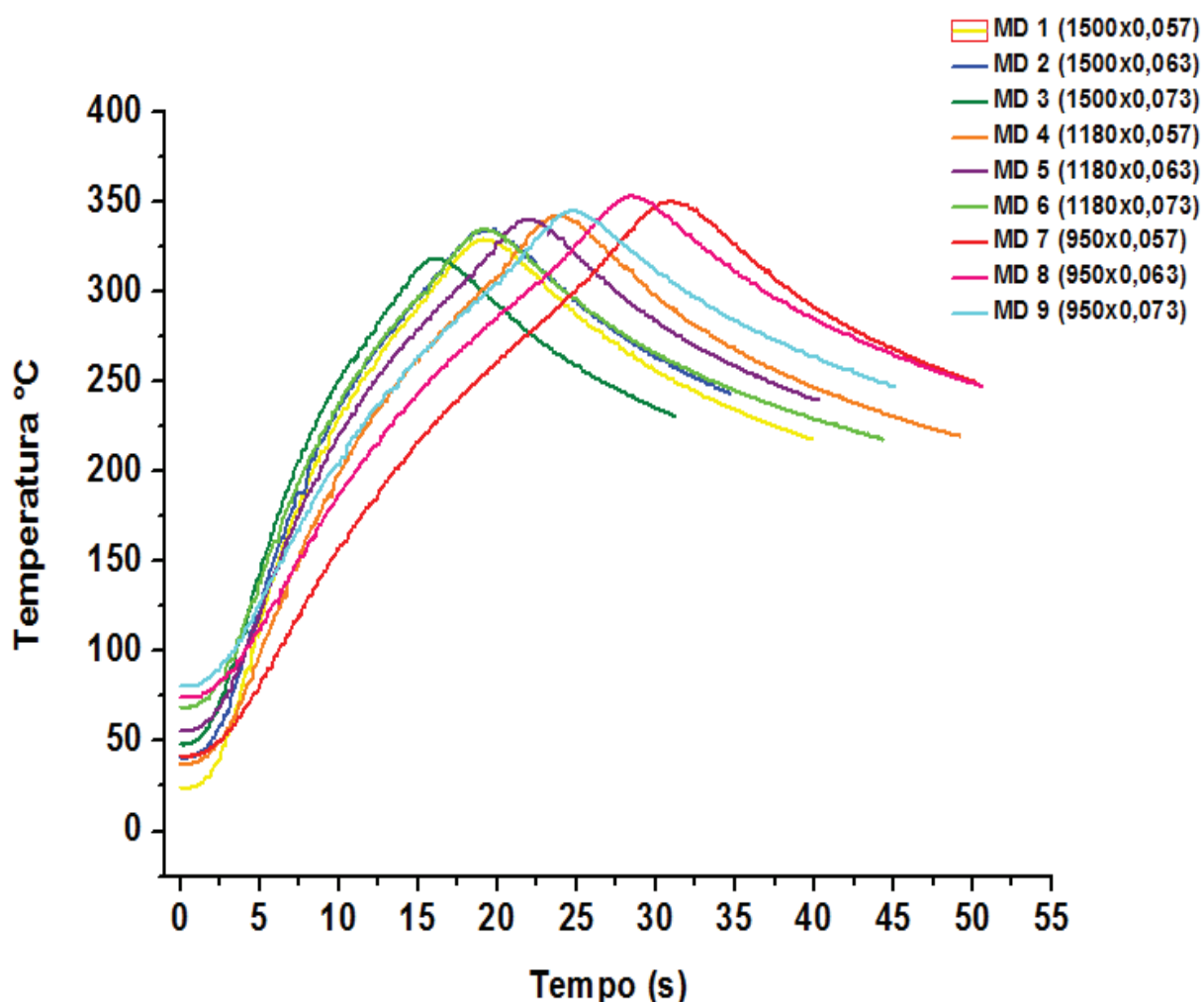
Existe também uma diferença nos tempos de subida da temperatura para os ensaios, onde o alumínio segue a frente do latão por uma diferença pequena porem notável no gráfico.

As diferenças sutis apresentadas podem possivelmente ter como fundamentação os diferentes coeficientes de dilatação térmica dos dois materiais que apresentam uma variação pequena, para o alumínio é de  $23 \cdot 10^{-6} \text{ L}^{\circ}\text{C}$  e do latão  $20,5 \cdot 10^{-6} \text{ L}^{\circ}\text{C}$ .

A condutividade térmica dos dois materiais tem uma representação numérica mais expressiva se comparadas quando expostas a temperaturas de  $25^{\circ}\text{C}$ , onde o alumínio corresponde a  $0,53 \text{ Cal/cm}^{\circ}\text{C}$  e para o latão  $0,28 \text{ Cal/cm}^{\circ}\text{C}$ .

Para os ensaios dos corpos de prova dos materiais de aço os avanços foram reduzidos devido a exigência maior dos esforços necessários para furação deste material e essa comprovação foi efetuada em ensaios preliminares e definida em função de preservar a ferramenta e verificar a resistência da ferramenta as condições expostas em razão do furo feito na região central da mesma abaixo da aresta transversal (Spur e Masuha, 1981).

As temperaturas encontradas nas medições da ferramenta para os ensaios feitos para o aço SAE 1020 também apresentaram resultados que tem semelhança aos outros dois materiais ensaiados, observadas algumas características próprias conforme o gráfico 50 exibe.

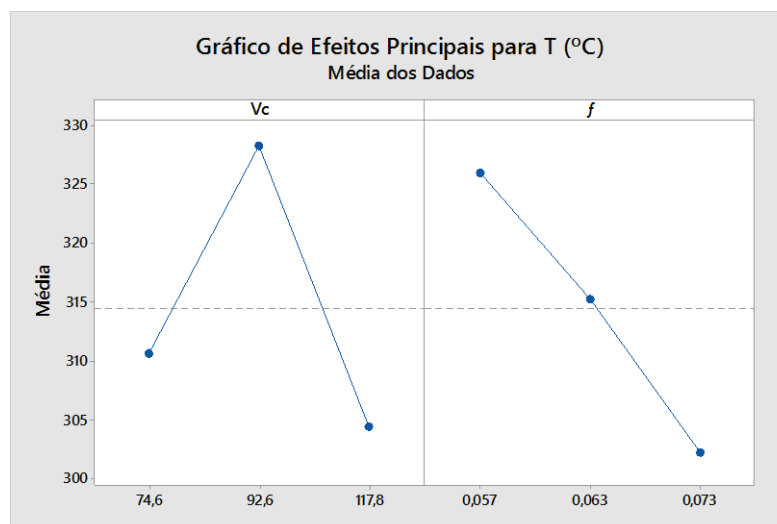


**Figura 50** - Gráfico Temperatura x Tempo para o material Aço SAE 1020

Para as condições impostas ao aço, as temperaturas máximas encontradas apresentam valores máximos superiores e diferenças entre os parâmetros de avanço

e rotação escolhidos menores muito próximas onde a temperatura máxima encontrada foi de 365°C, para condição MD8 (950x0,063). As inclinações das curvas são semelhantes para todas as condições e demonstram também um comportamento que se repete similarmente para os outros materiais ensaiados. Os diferentes avanços originaram variações dos tempos de aquecimento da ferramenta durante o processo, mesmo sem grandes alterações nas temperaturas de pico.

Outra observação foi por conta da diferença das propriedades térmicas dos materiais, o aço possui uma condutividade térmica aproximadamente 4 vezes menor em comparação com o alumínio e duas vezes menor em comparação com o latão, esse fator pode ser um dos indicadores de que os corpos de prova de alumínio dissipam maior porcentagem de calor durante a usinagem em comparação as amostras em aço. O cavaco remove a quantidade de calor que sua área comporta, o restante permanece para a ferramenta e a peça em quantidades diferentes que podem, aliadas ao fato do ponto de fusão do aço ser maior em comparação as outras ligas, ter sido a razão das temperaturas para o aço serem mais elevadas. Na figura 51 é possível acompanhar o estudo feito através do gráfico de influência



**Figura 51** - Gráfico de influência da temperatura para o material Aço SAE 1020

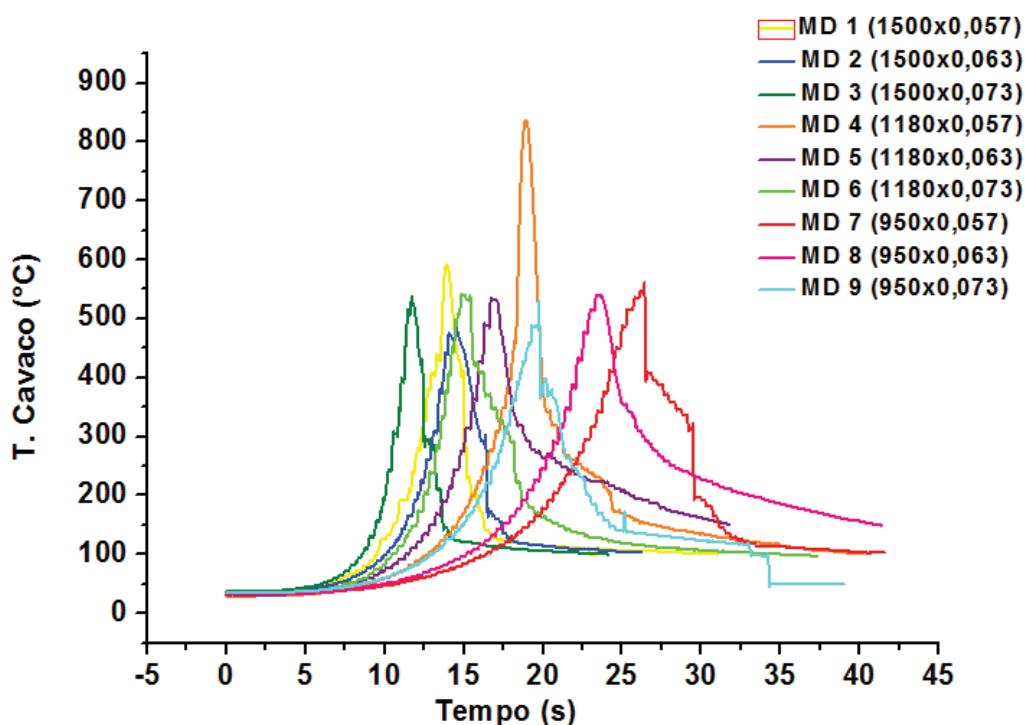
Seguindo com a mesma análise para a liga de aço, podemos observar através da figura 51, que não é possível obter uma conclusão sobre qual parâmetro tem maior efeito, entretanto da mesma forma que nos gráficos anteriores nota-se uma queda da temperatura com o aumento do avanço, figura b) verifica-se um comportamento

diferente dos outros materiais apresentados onde a velocidade de corte tem uma maior influência do que o avanço, no qual existe um aumento da variável  $\beta$  com o aumento do seu valor. Outras informações podem ser encontradas no capítulo anexo.

As temperaturas nas medidas na superfície opostas a furação durante os ensaios tiveram uma peculiaridade para este material, devido a capacidade de medição restrita a até 550°C do pirômetro infravermelho, a temperatura da maioria dos ensaios feitos com a liga de aço superou ao valor nominal máximo do aparelho indicado pelo fabricante. Durante as medições o aparelho registrou temperaturas próximas a 510°C e para temperaturas acima o mesmo não conseguiu registrar efetivamente o crescimento da temperatura.

Em função da continuidade do estudo como alternativa para tentar observar melhor as curvas, foi utilizado o software ORINGIN para a extrapolação das curvas aproveitando os pontos captados até o momento em que o registro deixou de ser feito pelo aparelho e os pontos em que o aparelho retomava a medição logo após indicando a queda das temperaturas.

O gráfico gerado através desta extrapolação das curvas é apresentado na figura 52.

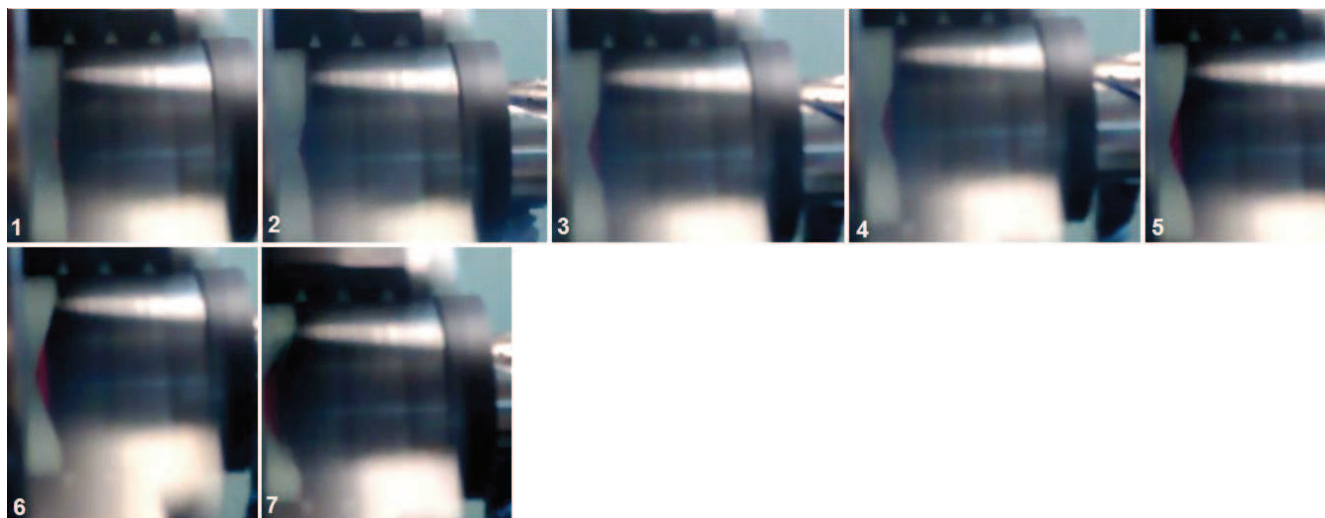


**Figura 52** - Gráfico Temperatura da superfície oposta ao início da furação x Tempo para o material Aço SAE 1020

As temperaturas máximas extrapoladas mostradas neste gráfico permaneceram próximas umas das outras com exceção da condição MD4 (1180x0,057), onde a temperatura máxima foi um pouco maior que 850°C, que possivelmente é um ponto que fugiu a realidade dos ensaios podendo possivelmente ser desconsiderado.

O comportamento das curvas permaneceu coerente em todas as condições não ultrapassando em geral os 600°C, com disparidade maior apenas na condição referida acima.

Estes gráficos que são mencionados como temperatura da superfície oposta ao início da furação receberão esta denominação na construção deste trabalho pois representa uma área referente a temperatura superficial dos materiais ensaiados apenas, de modo, que pode inclusive ao final do furo ser considerada como cavaco devido a espessura fina de uma rebarba que tem origem a uma determinada distância do final do furo e que se desprende da peça ao final da atuação da força de avanço, ocasionada provavelmente pelas temperaturas e pressões geradas devido as combinações de avanços e rotações para os diferentes materiais. Este material, também conhecido como *cap burr* pode ser traduzido como rebarba tampa, é também possivelmente fruto da deformação plástica do material aliada a geometria da ferramenta de corte e temperatura. Foi notada a formação desta rebarba em todos os ensaios de todos os materiais ensaiados, e para o aço foi possível observar a mudança de coloração desde o início da formação desta rebarba, partindo da região central da peça e propagando-se para a periferia até o momento do seu desprendimento da peça, a sequência segue conforme a figura 53.

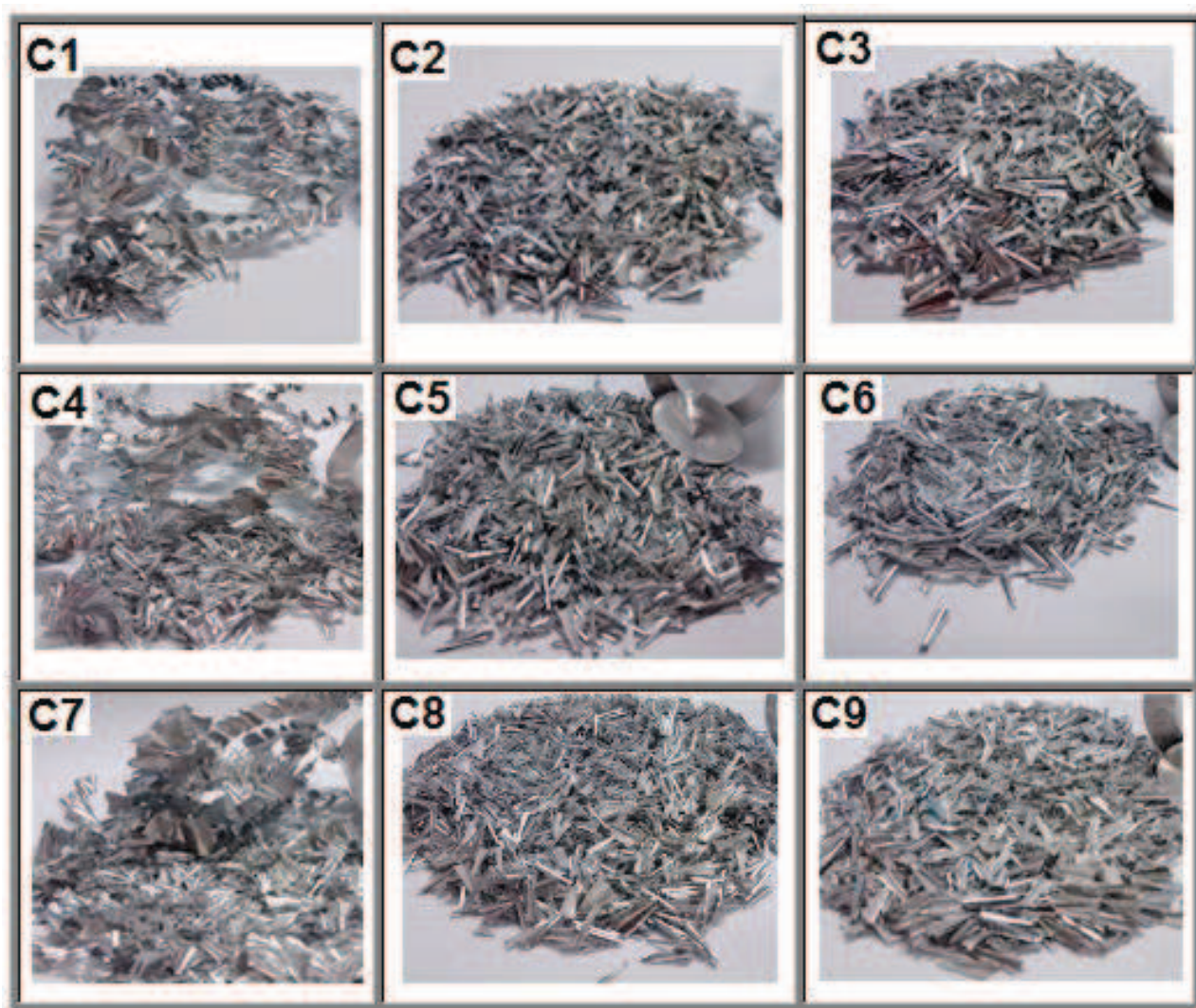


**Figura 53** - Sequência de formação da rebarba tampa (cap burr)



Outro ponto importante possível de se observar nesta imagem é a coloração avermelhada que se inicia no centro da peça juntamente com formação da rebarba, se propagando para periferia, da superfície que oposta ao início da furação, provavelmente devido a espessura de corte constante e a variação da velocidade de corte nesta região, deformando a mesma até o seu desprendimento total ou parcial da peça (BOROIU *et al.*, 2012).

Os cavacos obtidos através da usinagem dos três materiais apresentam variados tipos e formas e podem ser vistos nas figuras 54, 55 e 56.

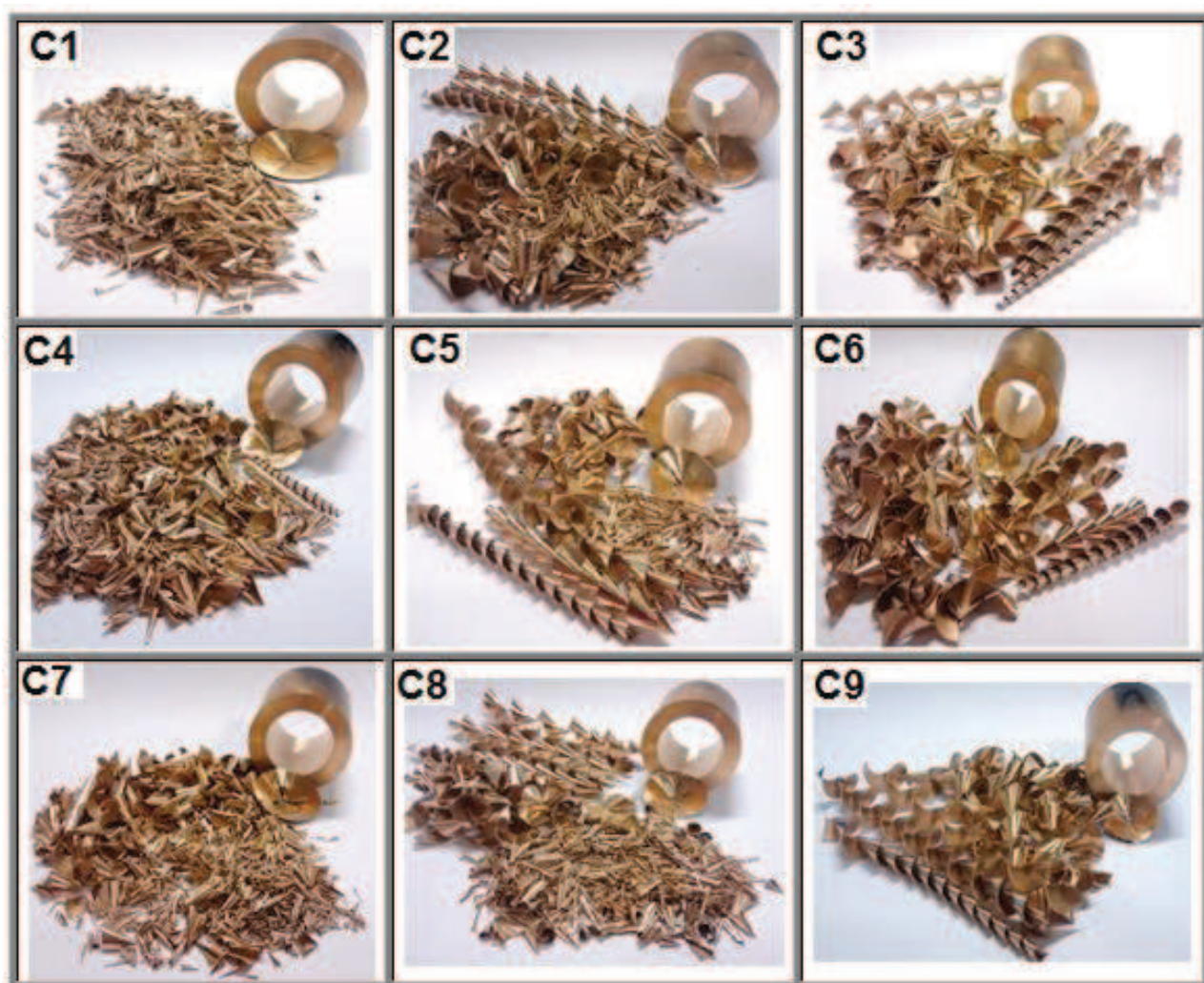


**Figura 54** - Formas de cavacos dos ensaios de Alumínio obtidos durante a furação

Para a liga de alumínio estudada o cavaco apresenta pequenas alterações de tipos, onde se alternou basicamente entre fita longa e agulha com a presença de alguns cavacos em leque em algumas combinações de avanço e rotação. A maioria

das imagens exibe cavacos do tipo agulha (lascas ou pedaços), que podem ser vistos nas imagens de C2, C3, C5, C6, C8 e C9. Um dos prováveis motivos principais pode ser devido a maior porcentagem de cobre encontrada no material, esse percentual adicionado tem influência na facilitação da quebra do cavaco e tem propriedade lubrificante para usinagem (DINIZ *et al.* 2008). As demais imagens apresentaram fita longa, leque e zigzag. Junto aos cavacos todas as amostras tiveram a formação da rebarba de tampa.

O segundo material ensaiado durante os estudos foi o latão, onde as amostras de cavacos podem ser visualizadas na imagem 55.



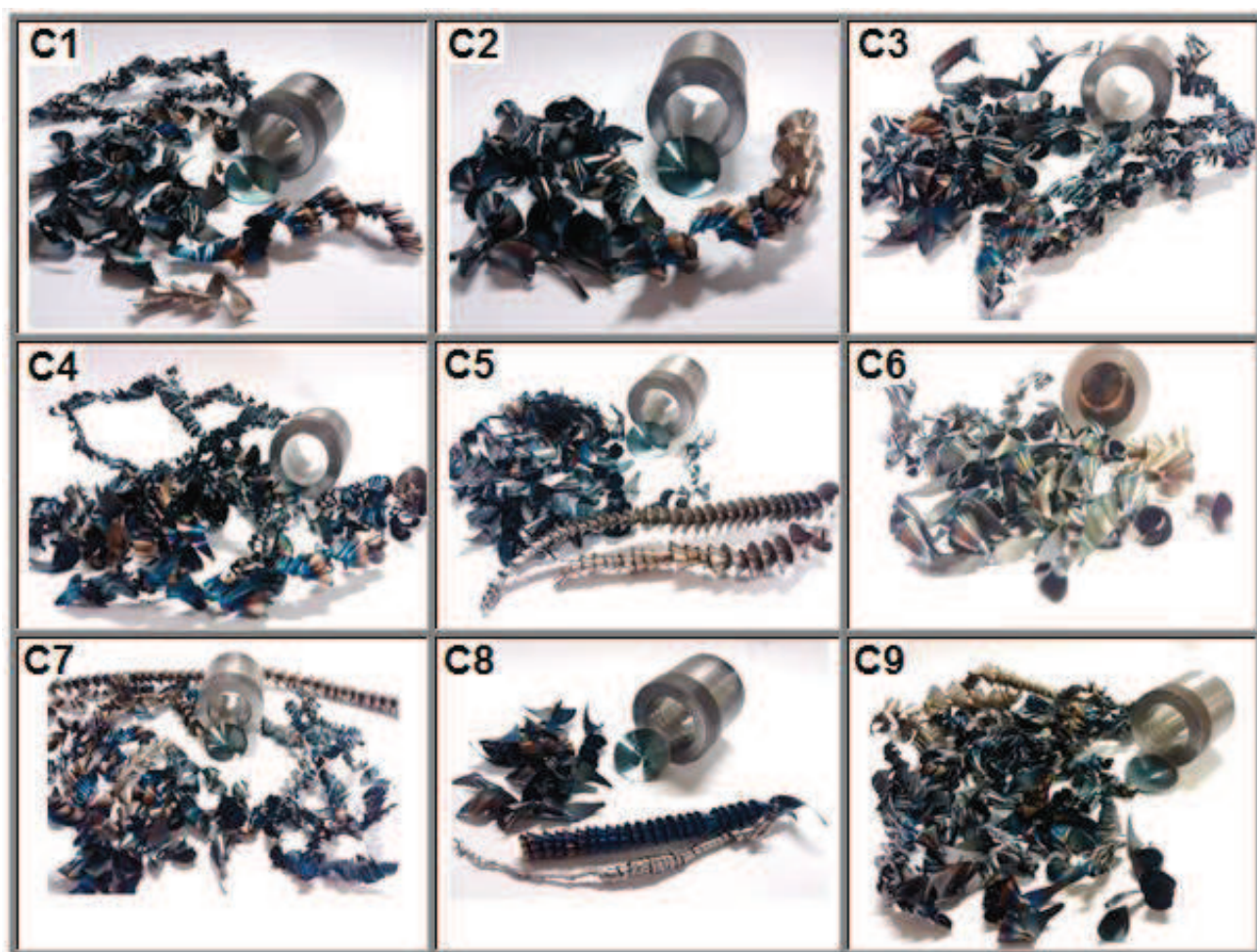
**Figura 55** - Formas de cavacos das ligas de Latão obtidos durante a furação



Semelhante aos ensaios feitos com o alumínio, os ensaios feitos com o latão obtiveram basicamente os mesmos tipos de cavaco vistos nos ensaios de alumínio, com a particularidade para os ensaios C2, C3, C5, C6 e C9, onde a principal forma foi a helicoidal com variação dos ângulos de hélice dos cavacos ao longo da usinagem.

Pode-se observar nas demais figuras que houve alternância das formas e tipos ao longo da usinagem, com maior expressividade para agulhas e leque. Novamente pode-se constatar a remoção da rebarba de tampa.

O último material ensaiado foi o aço SAE 1020, e pode-se comparar os cavacos obtidos durante os ensaios na figura 56.



**Figura 56** - Formas de cavacos de aço obtidos durante a furação

Mesmo com a redução dos avanços para estes ensaios observa-se através da coloração que as temperaturas as quais foram submetidos foram relativamente altas,

e sua classificação se torna dificultosa em função deste aumento aliado as altas pressões que foram submetidos.

Podem ser visualizadas em maior quantidade o cavaco contínuo praticamente em todos os ensaios, alternando para leque, uma possível explicação pode estar relacionada a característica dos aços de baixo carbono, que normalmente apresenta esse tipo de cavaco em usinagens que utilizam esse material (JINDAL, 2012).

Uma característica observada em todos os ensaios é em relação a coloração azulada mais acentuada, na região do cavaco que foi originada na parte central da broca. Fato esse que pode indicar que a temperatura nesta região foi maior em comparação a região periférica da broca.

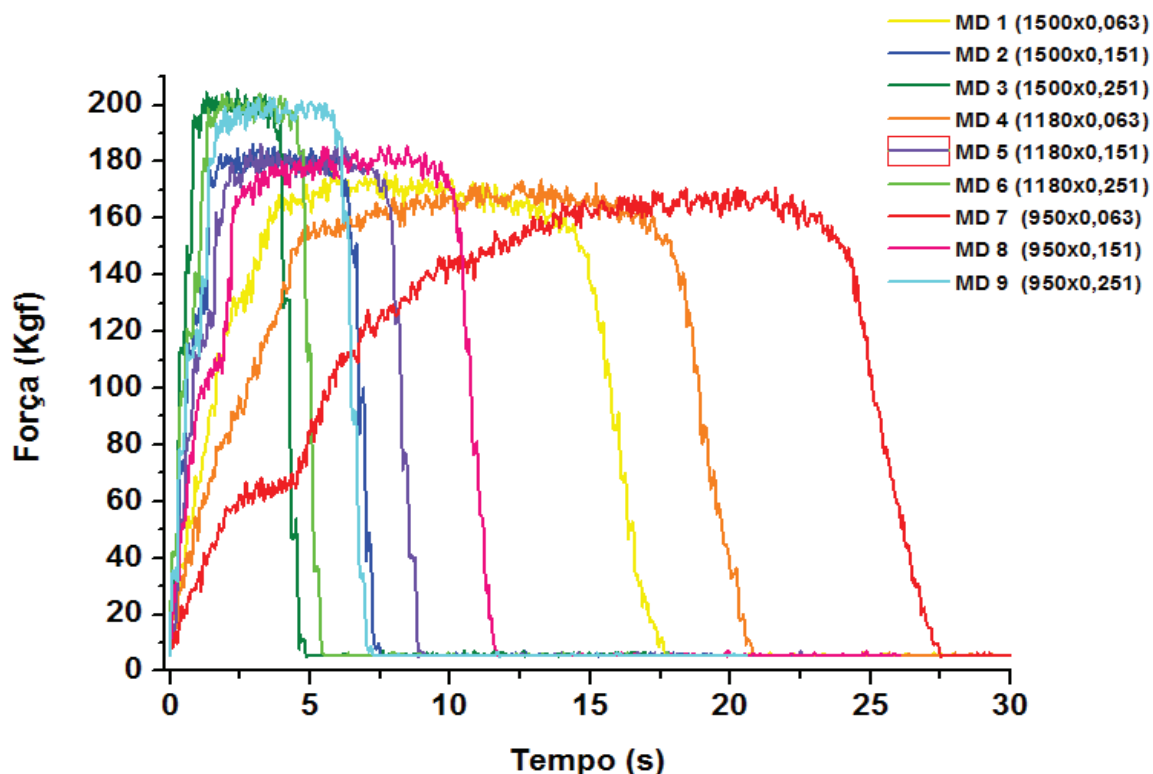
Essa observação vai de encontro à observada durante a formação da rebarba de tampa (*cap burr*) apresentada na figura 56.

A análise feita observando os cavacos dos três materiais é baseada no fato que a característica de cada material influencia na forma e tipo de cavaco que vai ser formado, o cobre presente na liga de alumínio e o chumbo presente na liga de latão facilitaram a quebra dos cavacos durante estes ensaios, para o aço os cavacos predominantes foram os de fita, da mesma forma, as condições de avanço e rotação também influenciam nestes fatores, observou-se que a temperatura foi maior onde foram obtidos cavacos contínuos com o formato de fita, essa característica está presente para rotações maiores (DINIZ *et al.* 2008). A justificativa para este fato está relacionada a difícil condição de quebra do cavaco com o aumento da temperatura, permitindo uma maior deformação plástica do material.

### **4.3 Esforços de corte**

Os esforços de corte são fatores de grande influência na geometria e acabamento dos furos, juntamente com a características dos materiais a serem furados e a geometria da ferramenta (PIRTINI e LAZOGLU, 2005).

Durante os ensaios experimentais dos três materiais foram coletadas as informações de força axial e momento torçor, nas figuras a seguir são apresentados os gráficos referentes a estes ensaios na figura 57 com os respectivos gráficos de influência.

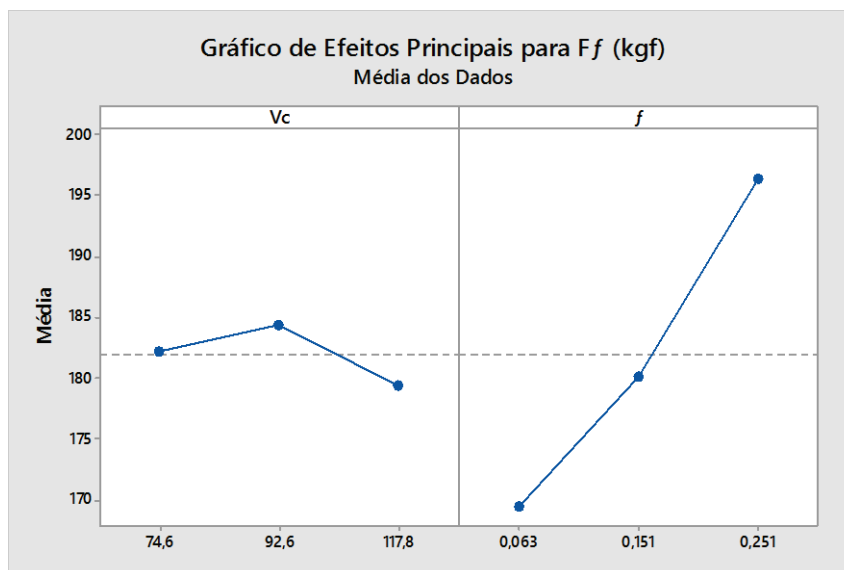


**Figura 57** - Representação de força axial para o material de Alumínio

O gráfico 57 representa os valores de força axial obtido durante os ensaios de alumínio, pode-se observar que as condições MD 3, MD 6, MD 9 (1500x251; 1180x251; 950x251) respectivamente obtiveram valores de força maiores em comparação as outras condições, estas mesmas combinações representaram as menores temperaturas da ferramenta durante a usinagem e as taxas de crescimento das forças foram expressivas.

Observa-se também que as forças se alteraram significativamente quando submetidas a valores de avanço maiores, e tiveram alterações discretas quando foram variadas as rotações. A taxa de variação para as condições com menores valores de avanço tem uma inclinação maior em comparação as de maiores avanços, implicando em aumento do atrito e do tempo, e esse fato pode estar relacionado ao aumento da temperatura nesta condição devido ao maior tempo de exposição.

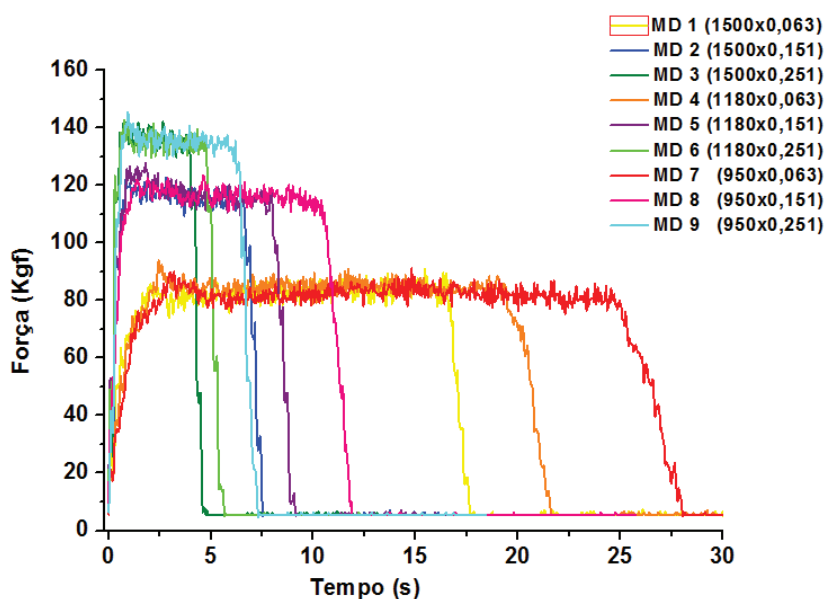
A seguir na figura 58 observa-se o gráfico de influência para a variável de força de avanço.



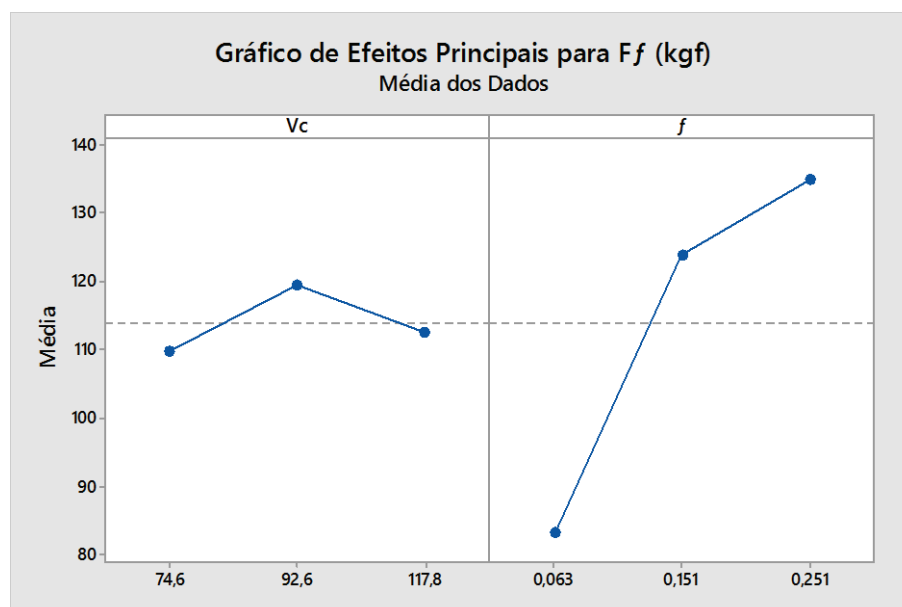
**Figura 58** – Gráfico de efeitos principais para força de avanço no material de Alumínio AA2011F.

É possível se notar que conforme o evidenciado no gráfico 57 a mudança do avanço teve uma influência maior em comparação a velocidade de corte.

Um segundo gráfico referente a força de avanço apresentado na figura 59, revela um comportamento similar para o material de latão com relação a força de avanço, porem com valores de pico menores, possivelmente devido a ação fragilizadora do percentual de chumbo que compõe a liga. Outra observação é referente a inclinação da taxa de subida da força do latão, o ângulo tem uma variação muito menor para os três valores de avanços, apesar de mostrarem uma variação em função da rotação muito pequena.



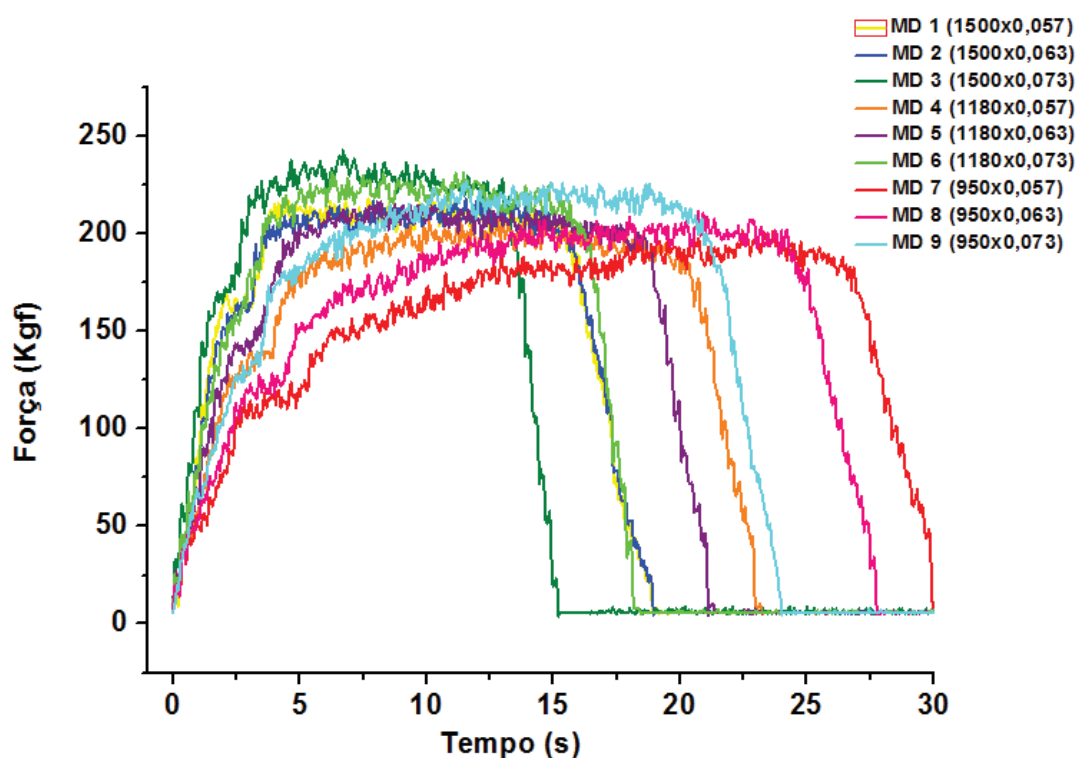
**Figura 59** - Representação de força axial para o material de Latão



**Figura 60** - Gráfico de efeitos principais para força de avanço no material de Latão C360.

Novamente nota-se a influência predominante do avanço durante a usinagem da liga de Latão C360 se comparado a velocidade de corte.

A seguir na figura 61 o gráfico mostra os resultados obtidos com a usinagem do material de aço SAE 1020.

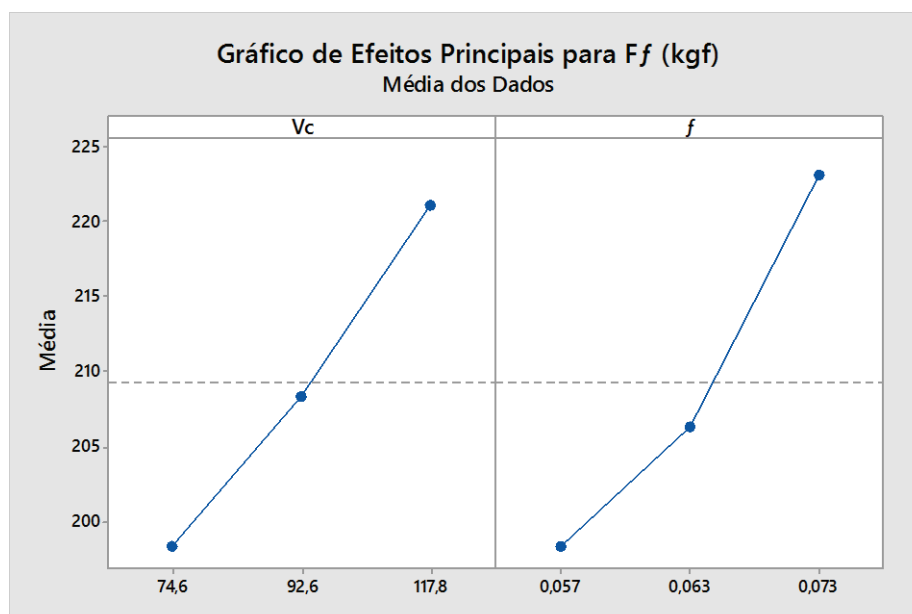


**Figura 61** - Representação de força para o material de aço



Para os corpos de prova de aço o comportamento dos esforços de força axial e torque permaneceram muito próximos entre as combinações de avanços e rotações conforme ocorrido nos gráficos de temperatura. Desconsiderando esse fato pode-se averiguar que os comportamentos seguiram conforme o ocorrido nos outros materiais com valores superiores, explicados pela maior resistência do material ao corte. Percebe-se que diferente do latão e do alumínio é notada uma influência maior da rotação nas inclinações das curvas, possivelmente pela otimização da condução do cavaco contínuo para fora da região de corte que pode ter sido facilitada pela sua formação em fita. Outro ponto importante que é possível destacar refere-se ao fato da geometria da ferramenta ser adequada para este tipo de material.

O gráfico 62 expõe as influências captadas nos ensaios de aço SAE 1020.

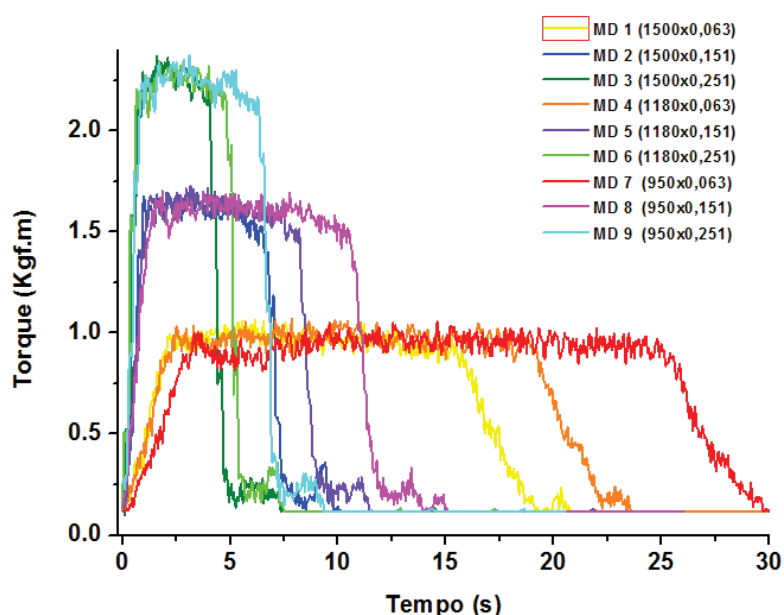


**Figura 62** - Gráfico de efeitos principais para força de avanço no material de Aço SAE 1020.

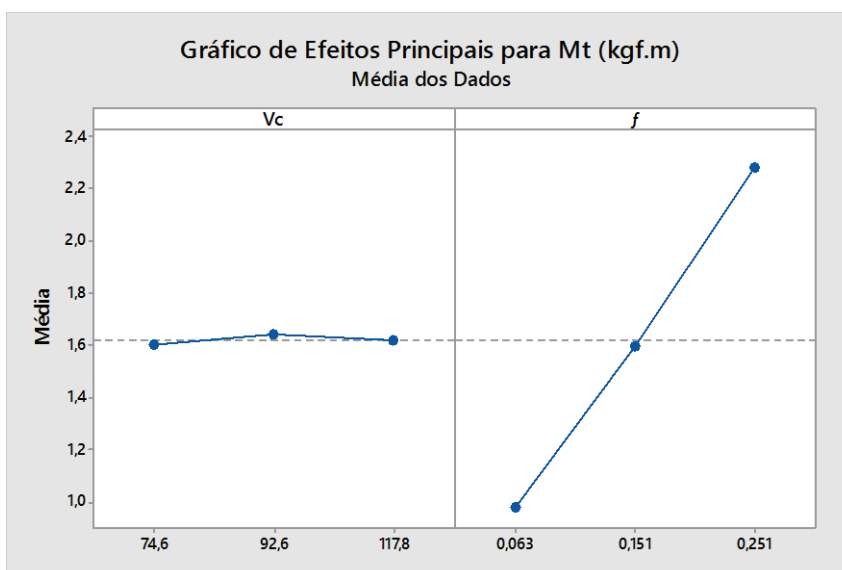
Neste gráfico não se pode dizer com certeza qual o parâmetro de maior influência para o aumento da força de avanço, devido à proximidade dos resultados embora a análise de variância feita também no software MINITAB está disponível no anexo deste trabalho, onde existe segundo os resultados fornecidos pelo software uma maior porcentagem de contribuição para a velocidade de corte em comparação ao avanço.

Também foi analisado o comportamento do momento torçor, nos três materiais ensaiados conforme a figura 63. Os resultados são apresentados em sequência seguindo a ordem já iniciada com os gráficos de força.

Analogamente a representação das forças os valores de torque possibilitam as mesmas observações, entretanto, verifica-se para os mesmos avanços três grupos distintos, onde a atuação da rotação é praticamente desprezível e o avanço possui uma grande influência podendo chegar da menor rotação e menor avanço para maior rotação e maior avanço a uma diferença de quase três vezes o valor. Pode-se verificar os resultados para o material de alumínio no gráfico 63.

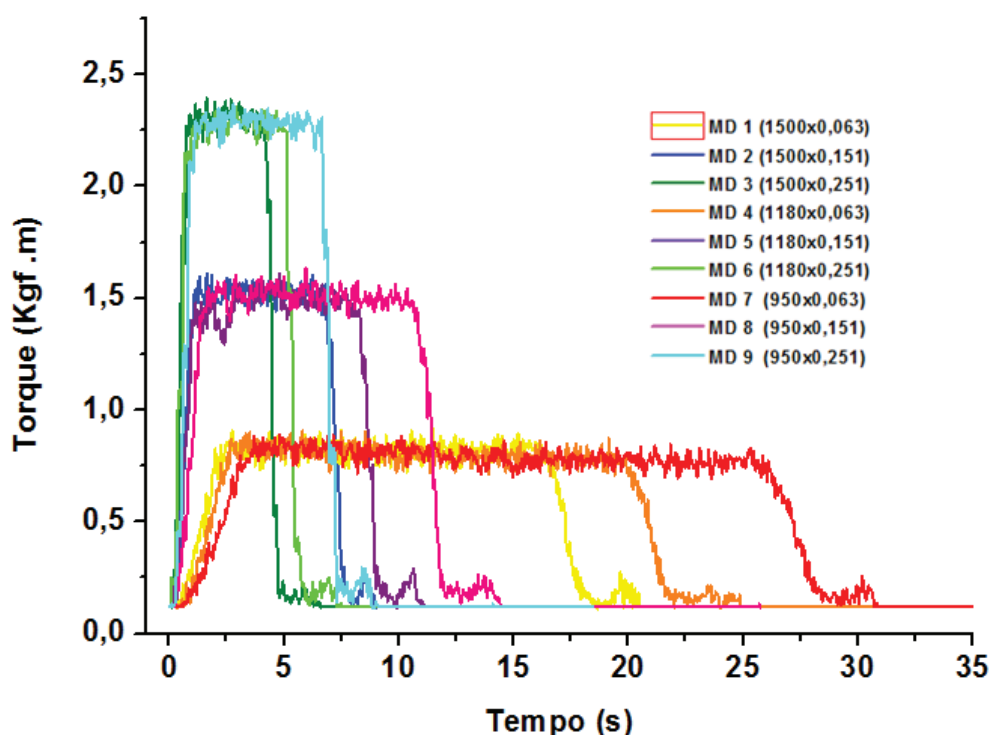


**Figura 63** - Representação de torque para o material de Alumínio



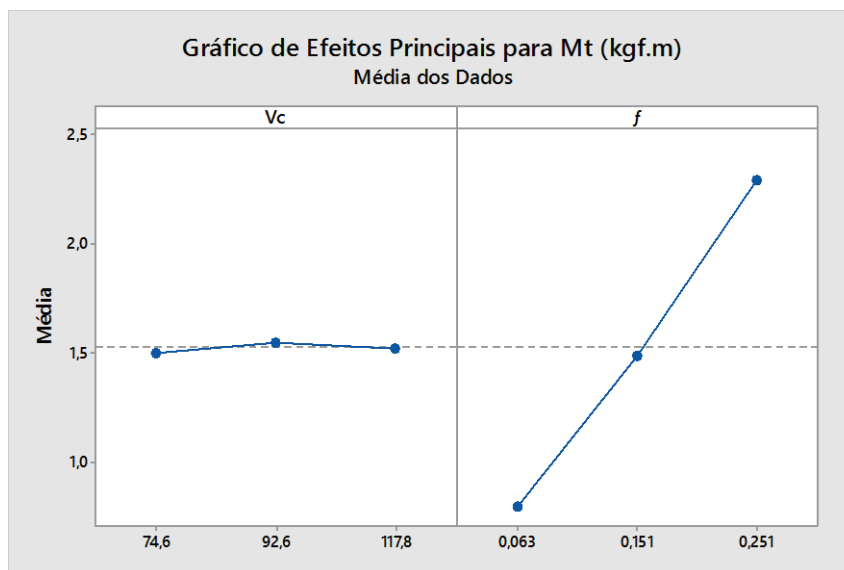
**Figura 64** - Gráfico de efeitos principais para Torque no material de Alumínio.

Nos ensaios feitos com latão o torque expressou uma constância durante o uso de avanços ainda mais próxima em comparação aos ensaios de alumínio. Os valores de torque se mantiveram com diferenças sutis para os dois materiais podendo ser melhor comparado quando verificadas as condições MD1 (1500x0,063; MD4 (1180x0,063) e MD7 (950x0,063), onde o latão apresenta valores em torno de 0,8 Kgf.m enquanto o alumínio demandou algo próximo de 1,0 Kgf.m. Esta diferença se dá provavelmente pelas características de usinagem dos dois materiais, onde o alumínio tende a aderir na ferramenta durante o processo de furação, resultando em esforços maiores de corte, para o latão temos como característica a facilitada quebra de cavaco e o escorregamento do material pela superfície de saída devido a ação lubrificante da combinação dos elementos em sua composição química. Conforme poder ser visualizado na figura 65.



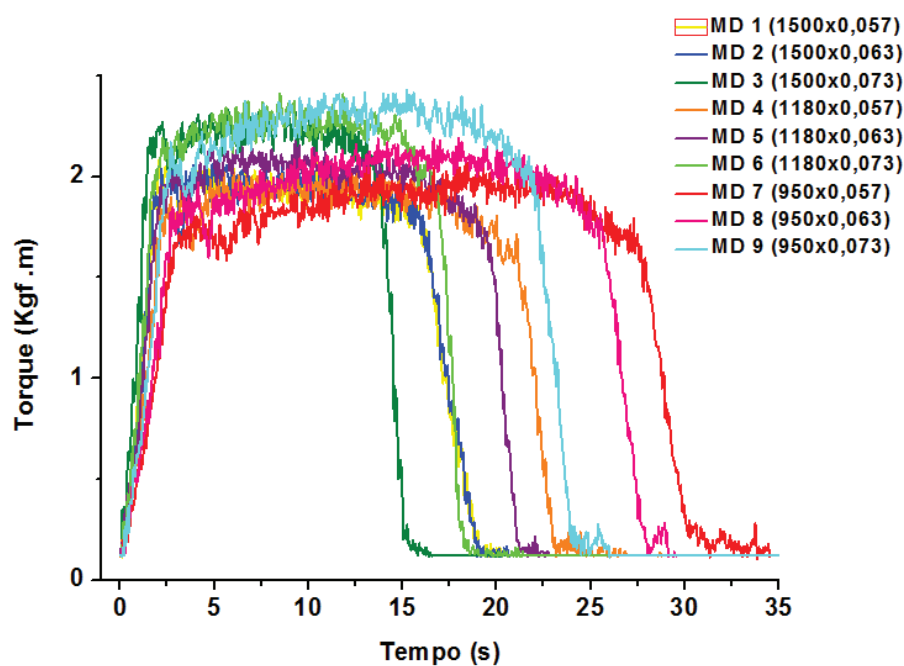
**Figura 65** - Representação de torque para o material de latão

A seguir na figura 66 apresenta-se o gráfico de influência para os parâmetros em relação ao momento torsor.

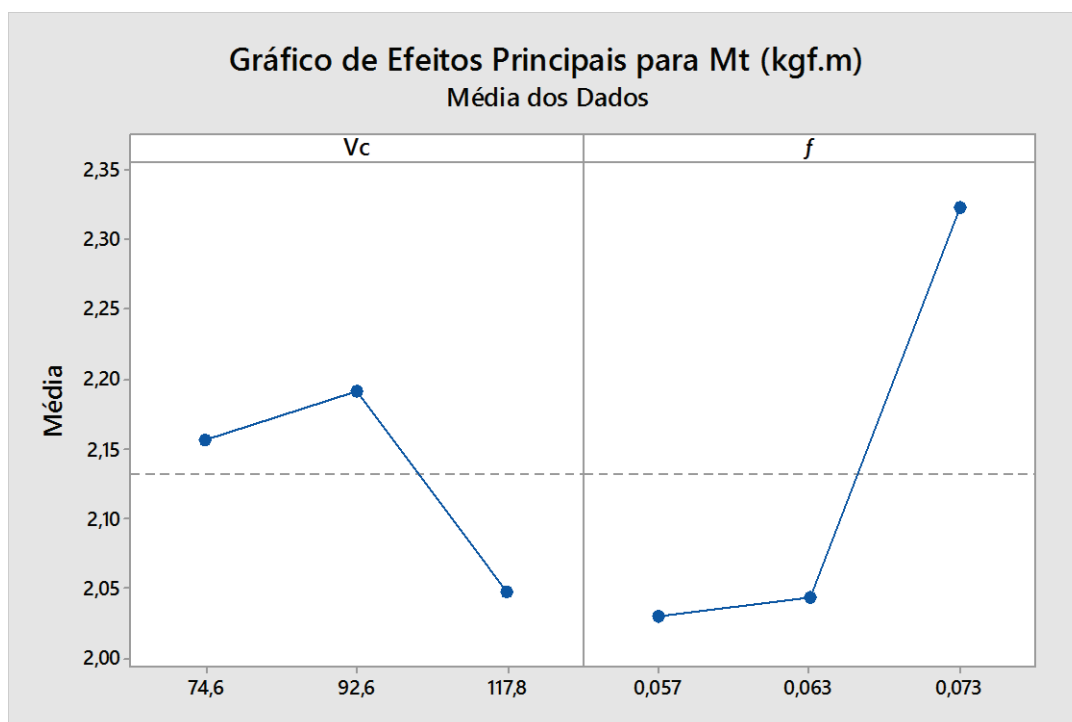


**Figura 66** - Gráfico de efeitos principais para Torque no material de Latão.

Os parâmetros de torque seguem os mesmos mecanismos de avaliação que foram utilizados para as forças ignorando a proximidade dos avanços. Desta maneira podem ser avaliados com a mesma interpretação, ficando evidente apenas a diferença da inclinação na curva de torque máximo no parâmetro MD3 (1500x0,063) que apresenta um crescimento quase que instantâneo do torque de pico em relação aos outros parâmetros. Os resultados referentes ao momento torçor do aço podem ser vistos no gráfico da figura 67.



**Figura 67** - Representação de torque para o material de aço



**Figura 68** - Gráfico de efeitos principais para Torque no material de Aço.

Semelhante ao já observado nos gráficos de força, os gráficos de momento torsor para o aço não são muito claros quanto ao fator de maior representação para o aumento desta variável.

Contudo, conforme o mencionado anteriormente pode-se observar o estudo de variância feito, bem como os resultados obtidos no anexo desta dissertação.

## 5. CONCLUSÕES

Com base nos estudos realizados durante os experimentos é possível apresentar as seguintes conclusões:

- O sistema de medição montado com o termopar no centro da ferramenta revelou resultados satisfatórios e confiáveis no intuito de se quantificar a temperatura de usinagem na ferramenta durante o processo.
- O método de medição de temperatura na ferramenta apresentou melhores resultados para quantificação das temperaturas de pico do processo e revelou a taxa de crescimento da temperatura.
- Foi notado que o avanço de corte tem maior influência no aumento da temperatura do que a rotação.
- Existem variações no aumento da temperatura ao longo do processo de forma que o mesmo não segue um formato linear.
- Com valores maiores de avanço e rotação o calor não teve tempo para se propagar para ferramenta sendo este direcionado para o cavaco e a peça resultando em menores temperaturas de pico, nestas condições, valores menores de avanço e rotação alcançaram as maiores temperaturas de pico.
- O cobre presente na liga de alumínio e o chumbo na liga de latão, favoreceram a quebra dos cavacos resultando nos tipos lascas ou pedaços, ocasionando maior dificuldade para expulsão da região de corte.
- O Minitab demonstrou um método de análise interessante para a verificação estatística dos dados experimentais.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Instrumentar a broca com outros pontos de medição da temperatura, afim de verificar o gradiente de temperatura ao longo do diâmetro.
- Verificar a possibilidade da implantação de um sistema de medição da temperatura que possa trabalhar em conjunto com o sistema de refrigeração da broca.
- Fazer um modelamento matemático capaz de simular a condição real de trabalho da broca, com o intuito de verificar o comportamento térmico da ferramenta.
- Utilizar o sistema de medição utilizado neste trabalho para medição em outros tipos de geometrias de brocas.
- Implantar uma análise pelo método de elementos finitos em softwares comerciais como: ABAQUS, MARC e ANSYS.



## 7. BIBLIOGRAFIA

ABAL: Associação Brasileira do Alumínio. **Fundamentos do alumínio e suas aplicações**. São Paulo: ABAL, 2012.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6023: Informação e Documentação Referências** - elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2002, 24p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12611:1999: Alumínio e suas ligas – Tratamento de superfície - Determinação da espessura da camada anódica pelo método de microscopia óptica** - Referências - elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 1992, 2p.

Ambroziak, A., Korzeniowski, M., **Using Resistance Spot Welding for Joining Aluminum Element in Automotive Industry**. Wroclaw University of Technology, Lukasiewicz, Wroclaw, Poland, 2010.

Arduino, site: <https://www.arduino.cc/en/Main/Products>, acessado em 26/09D/2016.

Baroiu, N. Berbinschi, S., Teodor, T., Oancea, N., **Experimental research regarding the temperature along the cutting edge of drills**, The annals of “Dunărea de Jos” University of Galați Fascicle v, Technologies in Machine Building, 2012.

Biermann, D. I. Iovkov. **Investigations on the thermal workpiece distortion in MQL deep hole drilling of an aluminium cast alloy**, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2015.

Bogovic V., A. Svete, K. Rupnik, I. Bajsic. **Experimental analysis of the temperature rise during the simulation of an implant drilling process using experimental design**, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering 2016.

Callister, William D. Jr. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5ª edição. São Paulo: LTC, 2000.

Cabral G.P., Reis, R. Polini, E. Titus, N. Ali, J.P. Davim, J. Grácio, **Cutting performance of time-modulated chemical vapour deposited diamond coated tool inserts during machining graphite**, Diam. Relat. Mater, p.1753–1758, 1996.

Çakıroğlu R., A. Acir. **Optimization of cutting parameters on drill bit temperatures drilling by Taguchi method**, Measurement, 2013.

Chern, G. L, **Development of a New and Simple Quick-Stop Device for the Study of Chip Formation**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.45, pp. 789 – 794., 2005.

Denkena, B., Tönshoff, H.K. **Spanen Grundlagen**. editora VDI Springer, 2009.

De Sousa P. F.B., V. L. Borges, I. C. Pereira, M. B. da Silva, G. Guimarães. **Estimation of heat flux and temperature field during drilling process using dynamic observers based on Green's function**, Applied Thermal Engineering jornal, 2012.

Diniz, A.E., Marcondes, F.C., Coppini, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. Editora Artliber, 7ª ed., 2010.

Ferraresi, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda., 751p., 1977.

Galloway, D. F., **Some experiments on the influence of various factors on drill performance**, Transactions ASME, 1957.

Heinz, A., Haszler, A., Keidel, C., Moldenhauer, S., Benedictus, R. e Miller, W. S. **Recent development in aluminum alloys for aerospace applications**. Materials Science & Engineering, n. 280, 2000.

Jareo, J. E.; Bradbury J. **Tool Coating for Dry Machining Conditions. Modern Machine Shop**, March 1999.

Klujzo, Colembergue L. A.; Soares, Belloc R. **Aços de usinabilidade melhorada corfac** na gerdau Açominas S.A Aços Finos piratini, 2012.

König, W., Rummenhöller, S. **As Indústrias estão tendo que Orientar Ecologicamente seus Processos Produtivos. Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 387, abril 1998.

Le Coz, M. Marinescu, A. Devillez, D. Dudzinski, L. Velnom. **Measuring temperature of rotating cutting tools: Application to MQL drilling and dry milling of aerospace alloys**, thermal science: year 2014, vol. 18, suppl. 1, 2011.

Li, R., Albert J. Shih. **Spiral point drill temperature and stress in high-throughputdrilling of titanium**, International Journal of Machine Tools & Manufacture. V.47, p.2005–2017, 2007.

Libeliumworld, site <http://www.libelium.com/libeliumworld/waspmote>, acessado em 26/09/2016.

Lopes, C. F. T. **Estudo do tratamento de solubilização da liga de Al 354.0**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto 2008. 70f. Tese (Doutorado em engenharia metalúrgica e materiais).

Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T., Silva, M.B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**, Editora Blucher 1ª ed., 2009.

Merino-Pérez, R. Royer, S. Ayvar-Soberanis, E. Merson, A. Hodzic, **On the temperatures developed in CFRP drilling using uncoated WC-Co tools Part I: Workpiece constituents, cutting speed and heat dissipation**. Composite Structures, V.123, p.161-168, 2015.

Metalworking. Site: <http://www.canadianmetalworking.com/products/slam-dunk-products/canadian-metalworking>, acessado em 10/2016.

Montgomery, D. C. **Design and Analysis of Experiments**, John Wiley & Sons, 7th ed., New York, 2009.

Novaski, O. **Contribuições ao processo de Furação com Brocas Helicoidais**. Texto de Livre Docência apresentado à Universidade Estadual de Campinas, 1996.

Oliveira, V. V., Berkenbrock, M.L.A., Souza, F.A., Beltrão, P. C.A. **Influência do revestimento na vida útil de brocas de metal duro na usinagem do aço AISI p20**. Artigo apresentado no Vi Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010

Ohlweiler, O. A. **Química inorgânica**. São Paulo, Edgard Blücher, 1973.

Oxley, P.L.B., **Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability**, John Wiley & Sons, New York, US, 1989.

Pal, P., & Gautam, D. **Experimental Analysis of Cutting Forces and Temperature in Orthogonal Machining of AISI 1045 Steel** International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 451–457 2015.

Paul, A.; Kapoor, S. G.; Devor, R. E. **Chisel edge and cutting lip shape optimization for improved twist drill point design**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 45, n. 4–5, p. 421–431, 2005.

Pirtini M., I. Lazoglu **Forces and hole quality in drilling**, International Journal of Machine Tools & Manufacture 45., 2005.

Ramirez, C. G. Poulachon, F. Rossia, R. M'Saoubi. **Tool wear monitoring and hole surface quality during CFRP drilling**, 2nd CIRP 2nd CIRP Conference on Surface Integrity (CSI) Tool, 2014.

Santos, C.S. Sales, W.F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. Editora Artliber, 1ª ed., 2007.

Saigal A, Rohatgi P. **Machinability of cast lead free yellow brass containing graphite particles**. AFS Trans; 1996.

Sato M., T. Aoki, H. Tanaka, S. Takeda. **Variation of temperature at the bottom surface of a hole during drilling and its effect on tool wear**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012.

Souza, A.J. **Apostila de Processos de Fabricação por Usinagem Parte1**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

Souza, A.C. **Condições Econômicas no Processo de Usinagem: Uma Abordagem para Consideração dos Custos**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia Mecânica, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 1997.

Souza, A. C., Novaski, O., Oliveira, E.P., Batocchio, A. **Condições econômicas no processo de usinagem: uma abordagem para consideração dos custos**. Artigo apresentado à universidade de Lion, VII Congresso Del Instituto Internacional De Costos, 2009.

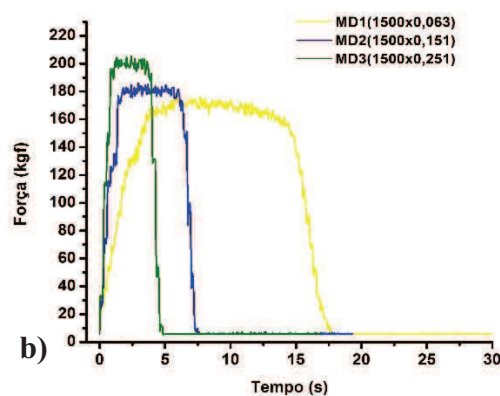
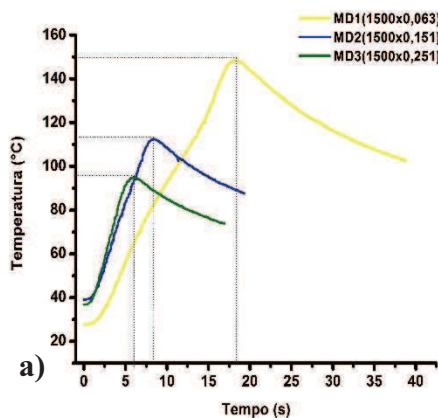
Taskesen, A., Kutukde, K. **Non-contact measurement and multi-objective analysis of drilling temperature when drilling B4C reinforced aluminum composites**. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, V.25, p.271-283, 2014.

Trent, E. M.; Wright, P. K. **Metal Cutting**. 4a ed. Butterworth Heinemann, Oxford, 2000.  
Weingaertner, W. L.; Schroeter, R. B.; Cúrsio, F. **Comparação das ligas de Al e Cu quanto às forças de usinagem**. Revista Máquinas e Metais, maio 1994.

TOOL TEC. Site: <http://www.ferramentasdeusinagem.com.br/ferramentas/brocas-de-metal-duro/broca-de-metal-duro-21-105-21.html>, acessado em 07/2016.

Wu, S.M.; Ermer, D.S. **Maximum Profit as the Criterion in the Determination of the Optimum Cutting Conditions**. Journal of Engineering for Industr, 1996.

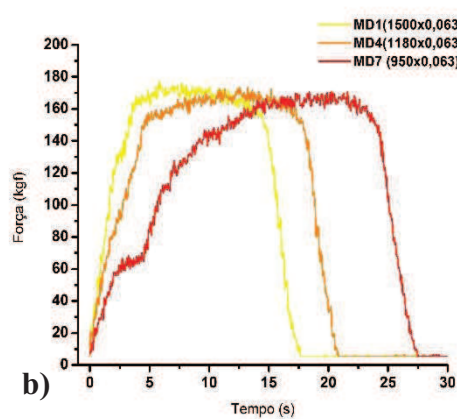
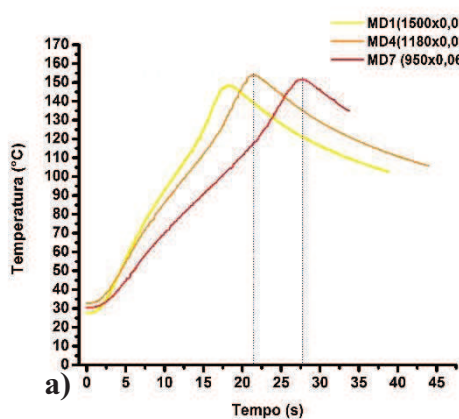
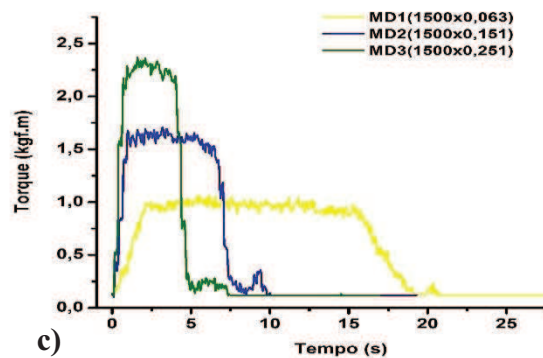
## ANEXOS



Gráficos comparativos de:

Temperatura (a), Força (b) e Torque (c)

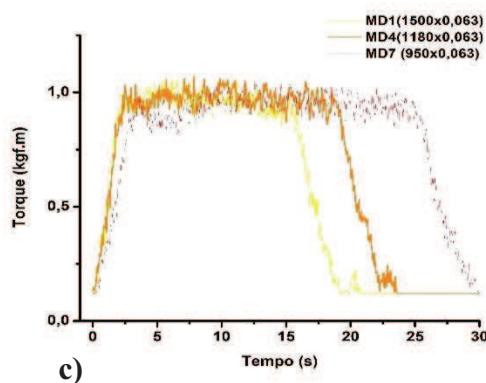
Rotações fixas e avanços variados  
Liga AA2011F

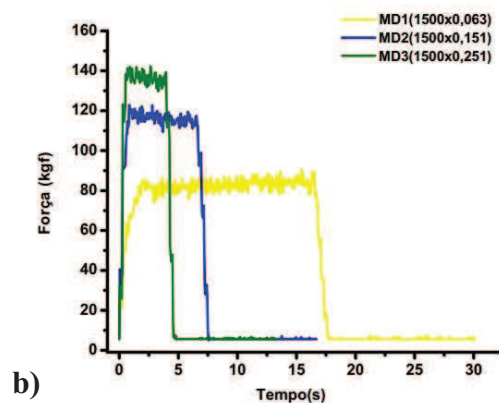
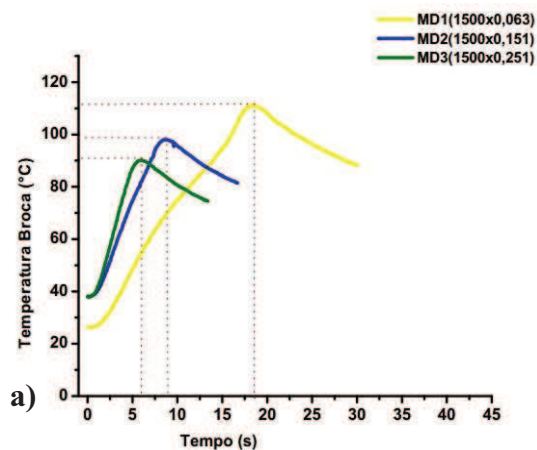


Gráficos comparativos de:

Temperatura (a), Força (b) e Torque (c)

Avanços fixos e Rotações variadas  
Liga AA2011F

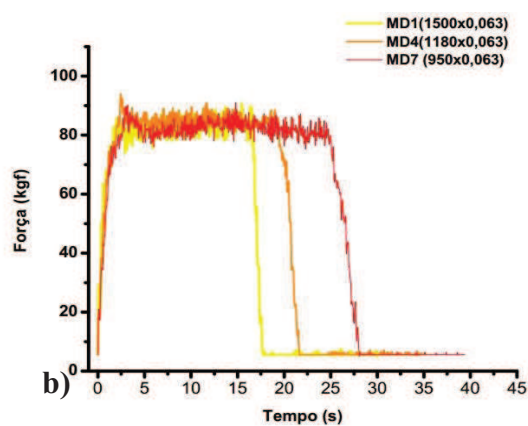
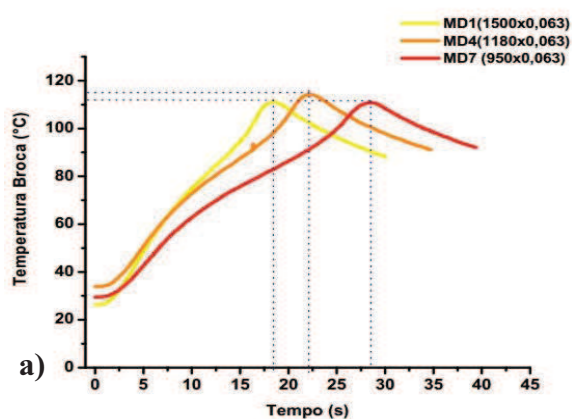
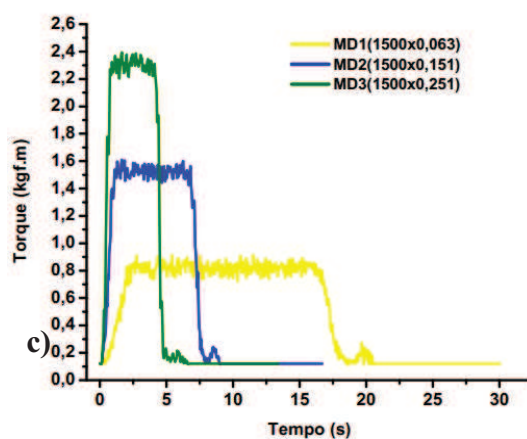




Gráficos comparativos de:

Temperatura (a), Força (b) e Torque (c)

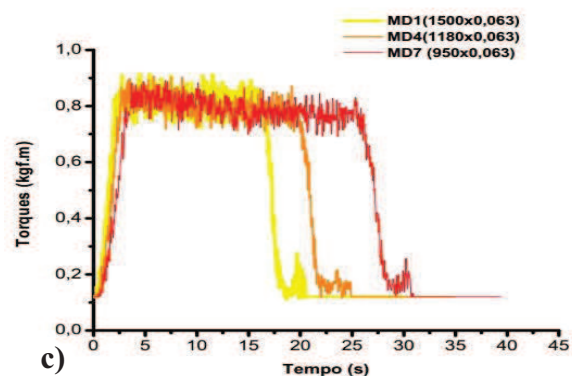
Rotações fixas e avanços variados  
Latão C360



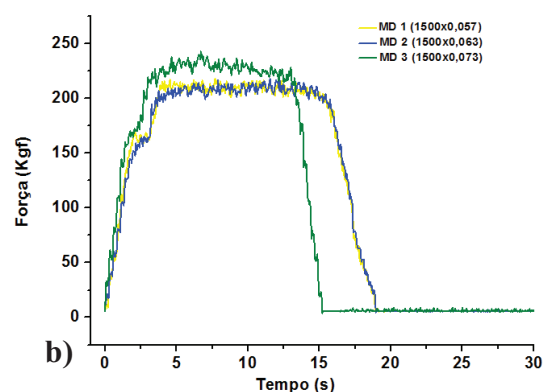
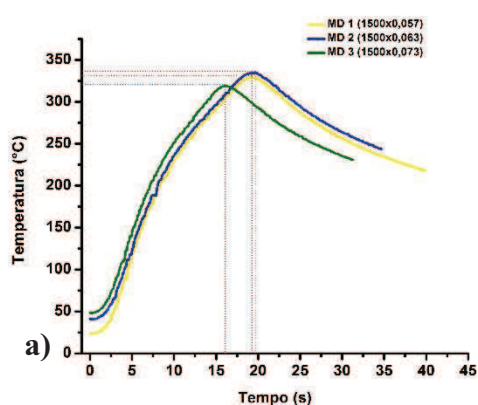
Gráficos comparativos de:

Temperatura (a), Força (b) e Torque (c)

Avanços fixos e Rotações variadas  
Latão C360



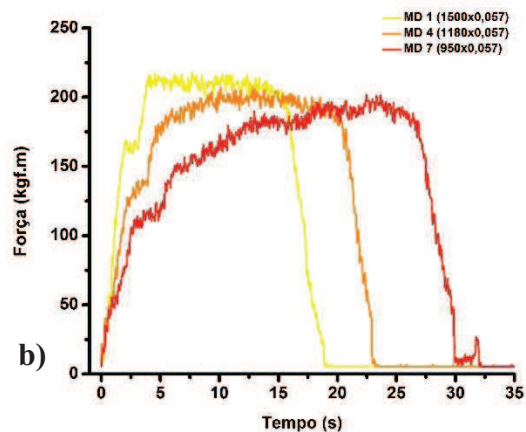
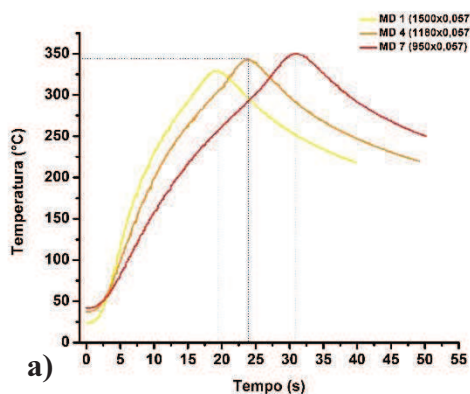
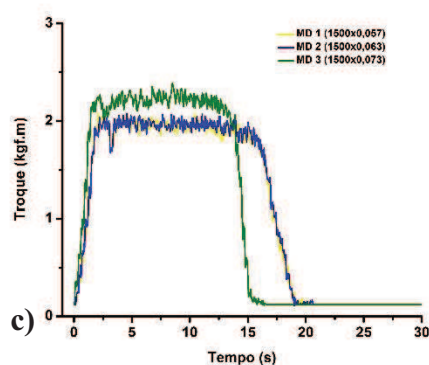




Gráficos comparativos de:

Temperatura (a), Força (b) e Torque (c)

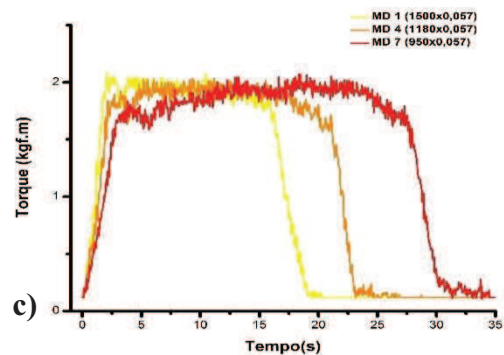
Rotações fixas e Avanços variados  
Aço SAE 1020



Gráficos comparativos de:

Temperatura (a), Força (b) e Torque (c)

Avanços fixos e Rotações variadas  
Aço SAE 1020



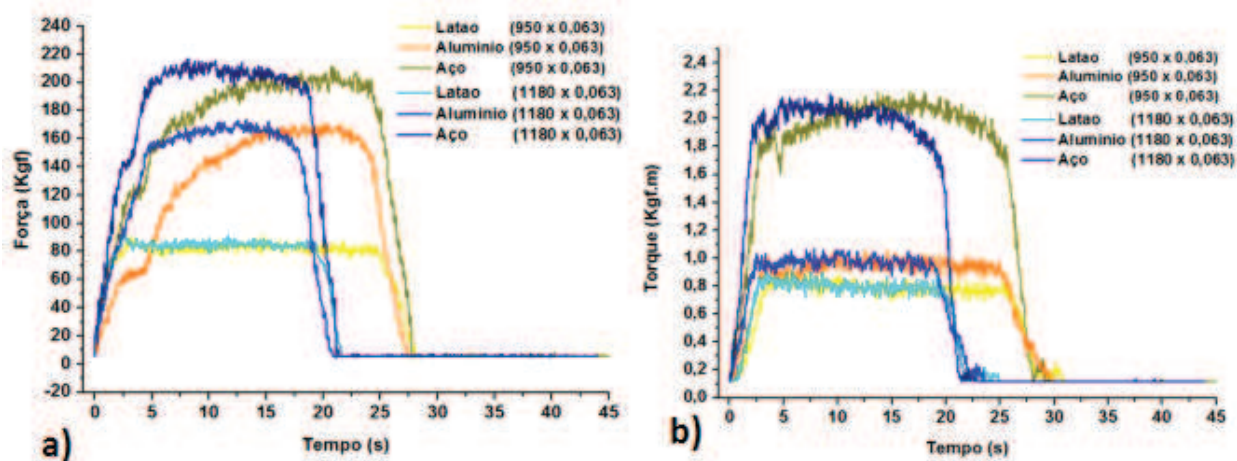


Figura 62 – Representação de força e torque para os materiais de aço, alumínio e latão

Fonte: própria autoria

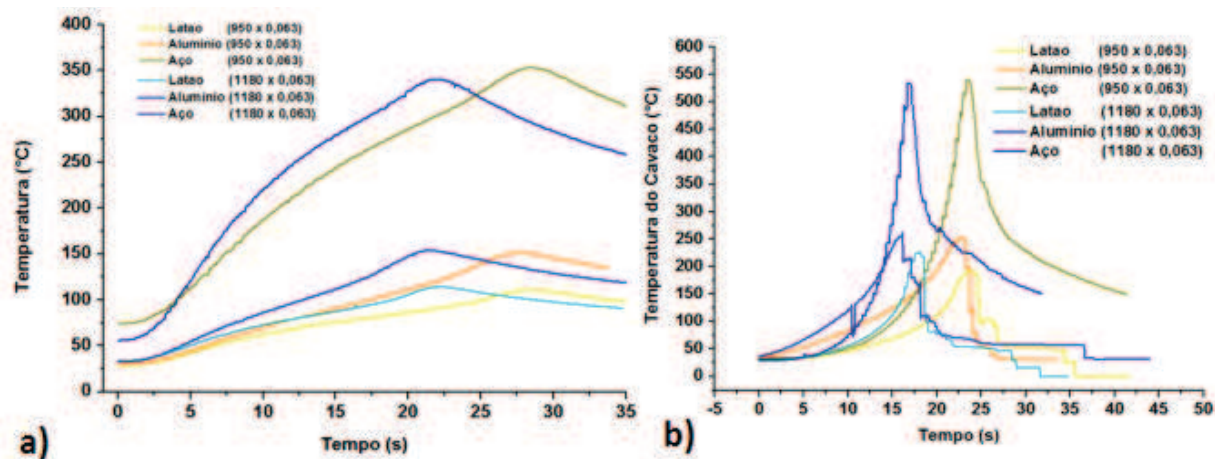


Figura 63 – Representação de temperatura da ferramenta e temperatura do cavaco para os materiais de aço, alumínio e latão

Fonte: própria autoria

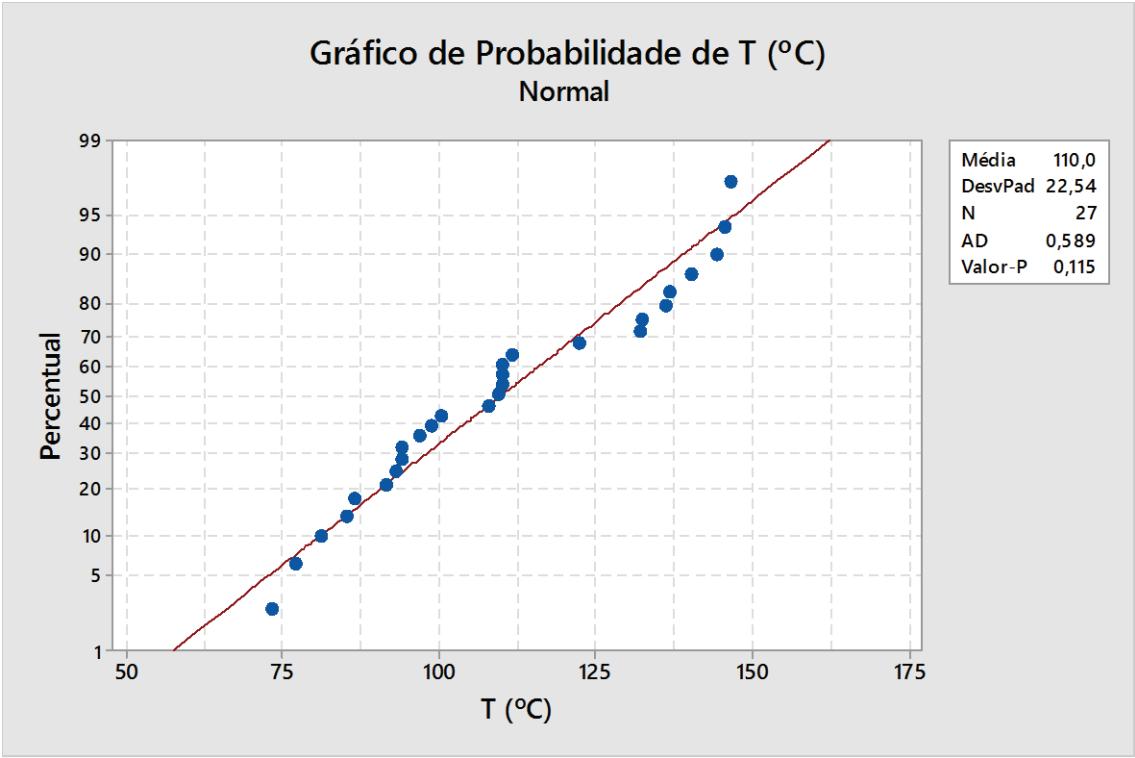
Planejamento Fatorial da Temperatura para Alumínio AA2011F

Análise de Variância							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	10	13082,7	99,02%	13082,7	1308,27	162,25	0,000
Blocos	2	67,9	0,51%	67,9	33,97	4,21	0,034
Linear	4	12827,3	97,09%	12827,3	3206,82	397,72	0,000
Vc	2	851,6	6,45%	851,6	425,79	52,81	0,000
f	2	11975,7	90,64%	11975,7	5987,84	742,62	0,000
Interações de 2 fatores	4	187,5	1,42%	187,5	46,86	5,81	0,004
Vc*f	4	187,5	1,42%	187,5	46,86	5,81	0,004
Erro	16	129,0	0,98%	129,0	8,06		
Total	26	13211,7	100,00%				

Sumário do Modelo					
S	R2	R2 (aj)	PRESQ	R2 (pred)	
2,83956	99,02%	98,41%	367,374	97,22%	

Equação de Regressão	
$T \text{ (}^{\circ}\text{C)} = 109,991 + 3,676 \text{ Vc}_{86,55} + 4,259 \text{ Vc}_{107,50} - 7,935 \text{ Vc}_{136,66} + 27,481 \text{ f}_{0,063}$ $- 3,796 \text{ f}_{0,151} - 23,685 \text{ f}_{0,251} - 4,56 \text{ Vc*f}_{86,55 \text{ } 0,063} + 0,63 \text{ Vc*f}_{86,55 \text{ } 0,151}$ $+ 3,94 \text{ Vc*f}_{86,55 \text{ } 0,251} + 3,85 \text{ Vc*f}_{107,50 \text{ } 0,063} - 1,04 \text{ Vc*f}_{107,50 \text{ } 0,151}$ $- 2,81 \text{ Vc*f}_{107,50 \text{ } 0,251} + 0,71 \text{ Vc*f}_{136,66 \text{ } 0,063} + 0,41 \text{ Vc*f}_{136,66 \text{ } 0,151}$ $- 1,12 \text{ Vc*f}_{136,66 \text{ } 0,251}$	

Gráfico de Normalidade

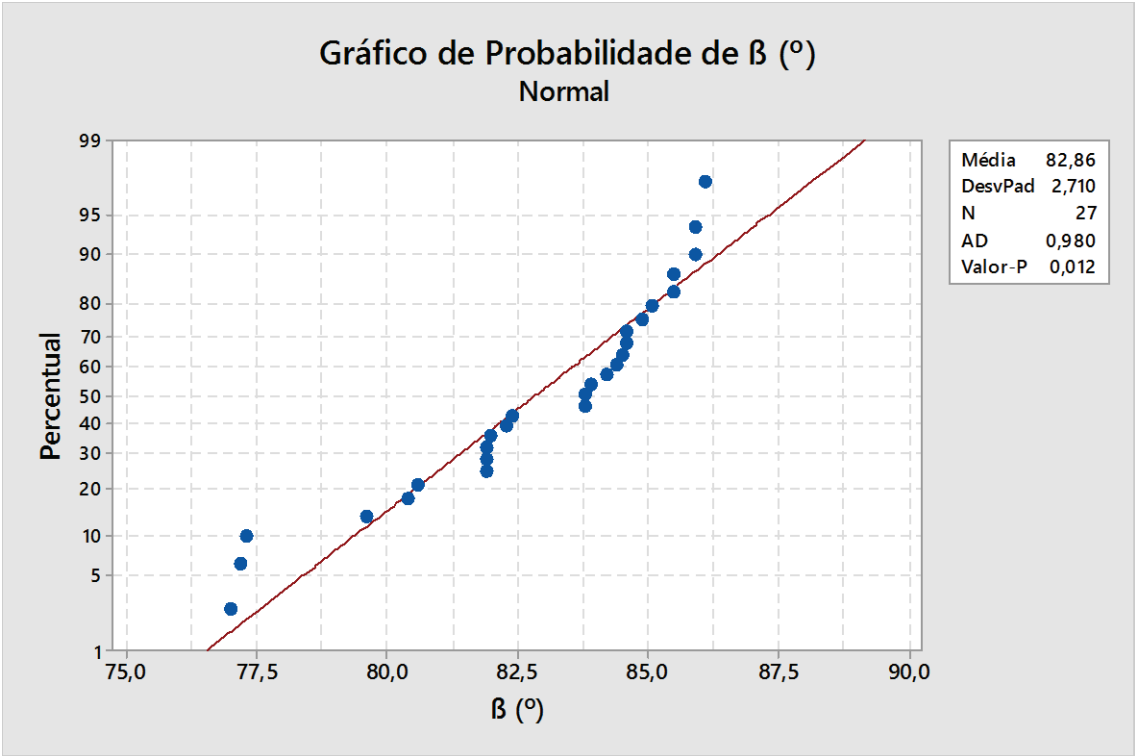


Planejamento Fatorial do Alumínio AA2011F para Inclinação

Análise de Variância							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	10	190,046	99,52%	190,046	19,0046	330,78	0,000
Blocos	2	0,081	0,04%	0,081	0,0404	0,70	0,510
Linear	4	181,695	95,15%	181,695	45,4237	790,61	0,000
Vc	2	39,150	20,50%	39,150	19,5748	340,71	0,000
f	2	142,545	74,64%	142,545	71,2726	1240,52	0,000
Interações de 2 fatores	4	8,270	4,33%	8,270	2,0676	35,99	0,000
Vc*f	4	8,270	4,33%	8,270	2,0676	35,99	0,000
Erro	16	0,919	0,48%	0,919	0,0575		
Total	26	190,965	100,00%				

Sumário do Modelo					
S	R2	R2 (aj)	PRESQ	R2 (pred)	
0,239695	99,52%	99,22%	2,61773	98,63%	

Equação de Regressão	
$\begin{aligned} B \text{ (}^\circ\text{)} = & 82,8593 - 1,5926 \text{ Vc}_{86,55} + 0,2741 \text{ Vc}_{107,50} + 1,3185 \text{ Vc}_{136,66} - 3,1037 \text{ f}_{0,063} \\ & + 0,7185 \text{ f}_{0,151} + 2,3852 \text{ f}_{0,251} - 0,9963 \text{ Vc*f}_{86,55 \text{ } 0,063} + 0,2481 \text{ Vc*f}_{86,55 \text{ } 0,151} \\ & + 0,7481 \text{ Vc*f}_{86,55 \text{ } 0,251} + 0,1704 \text{ Vc*f}_{107,50 \text{ } 0,063} - 0,0185 \text{ Vc*f}_{107,50 \text{ } 0,151} \\ & - 0,1519 \text{ Vc*f}_{107,50 \text{ } 0,251} + 0,8259 \text{ Vc*f}_{136,66 \text{ } 0,063} - 0,2296 \text{ Vc*f}_{136,66 \text{ } 0,151} \\ & - 0,5963 \text{ Vc*f}_{136,66 \text{ } 0,251} \end{aligned}$	



## Planejamento Fatorial do Alumínio AA2011F para Força de avanço

### Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	10	3459,85	87,12%	3459,85	345,98	10,83	0,000
Blocos	2	10,62	0,27%	10,62	5,31	0,17	0,848
Linear	4	3420,14	86,12%	3420,14	855,03	26,76	0,000
Vc	2	115,18	2,90%	115,18	57,59	1,80	0,197
f	2	3304,96	83,22%	3304,96	1652,48	51,71	0,000
Interações de 2 fatores	4	29,09	0,73%	29,09	7,27	0,23	0,919
Vc*f	4	29,09	0,73%	29,09	7,27	0,23	0,919
Erro	16	511,30	12,88%	511,30	31,96		
Total	26	3971,15	100,00%				

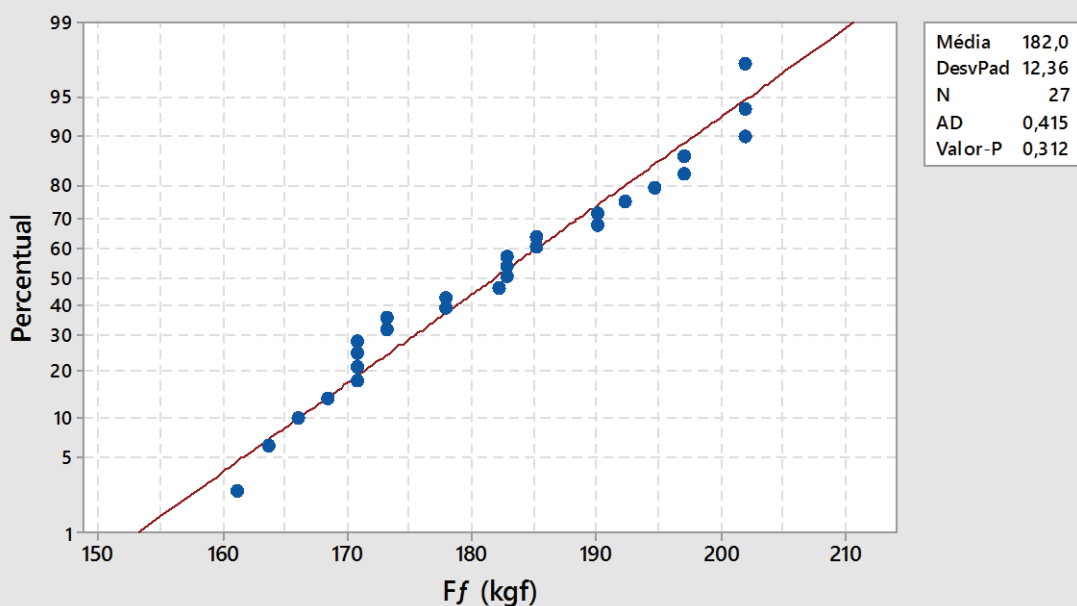
### Sumário do Modelo

S	R2	R2 (aj)	PRESQ	R2 (pred)
5,65298	87,12%	79,08%	1456,01	63,34%

### Equação de Regressão

$F_f \text{ (kgf)} = 182,01 + 0,22 \text{ Vc}_{86,55} + 2,41 \text{ Vc}_{107,50} - 2,63 \text{ Vc}_{136,66} - 12,49 \text{ f}_{0,063}$   
 $- 1,92 \text{ f}_{0,151} + 14,41 \text{ f}_{0,251} - 0,49 \text{ Vc*f}_{86,55 \text{ } 0,063} - 0,89 \text{ Vc*f}_{86,55 \text{ } 0,151}$   
 $+ 1,38 \text{ Vc*f}_{86,55 \text{ } 0,251} - 1,08 \text{ Vc*f}_{107,50 \text{ } 0,063} + 1,12 \text{ Vc*f}_{107,50 \text{ } 0,151}$   
 $- 0,04 \text{ Vc*f}_{107,50 \text{ } 0,251} + 1,57 \text{ Vc*f}_{136,66 \text{ } 0,063} - 0,22 \text{ Vc*f}_{136,66 \text{ } 0,151}$   
 $- 1,35 \text{ Vc*f}_{136,66 \text{ } 0,251}$

Gráfico de Probabilidade de  $F_f$  (kgf)  
Normal

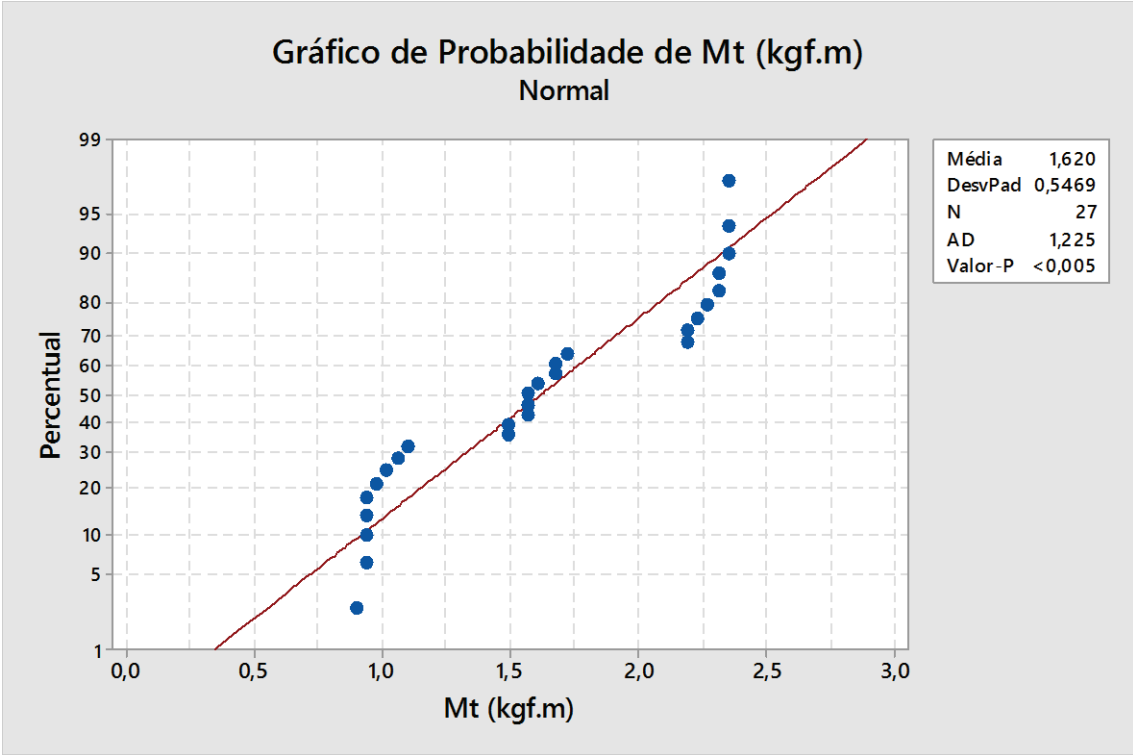


Planejamento Fatorial do Alumínio AA2011F para Momento torsor

Análise de Variância							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	10	7,68450	98,83%	7,68450	0,76845	135,12	0,000
Blocos	2	0,01934	0,25%	0,01934	0,00967	1,70	0,214
Linear	4	7,65817	98,49%	7,65817	1,91454	336,65	0,000
Vc	2	0,00723	0,09%	0,00723	0,00361	0,64	0,542
f	2	7,65094	98,40%	7,65094	3,82547	672,66	0,000
Interações de 2 fatores	4	0,00699	0,09%	0,00699	0,00175	0,31	0,869
Vc*f	4	0,00699	0,09%	0,00699	0,00175	0,31	0,869
Erro	16	0,09099	1,17%	0,09099	0,00569		
Total	26	7,77550	100,00%				

Sumário do Modelo					
S	R2	R2 (aj)	PRESQ	R2 (pred)	
0,0754124	98,83%	98,10%	0,259116	96,67%	

Equação de Regressão	
$Mt \text{ (kgf.m)} = 1,6204 - 0,0193 Vc_{86,55} + 0,0207 Vc_{107,50} - 0,0015 Vc_{136,66} - 0,6404 f_{0,063} - 0,0226 f_{0,151} + 0,6630 f_{0,251} - 0,0074 Vc*f_{86,55 \ 0,063} + 0,0148 Vc*f_{86,55 \ 0,151} - 0,0074 Vc*f_{86,55 \ 0,251} + 0,0193 Vc*f_{107,50 \ 0,063} + 0,0015 Vc*f_{107,50 \ 0,151} - 0,0207 Vc*f_{107,50 \ 0,251} - 0,0119 Vc*f_{136,66 \ 0,063} - 0,0163 Vc*f_{136,66 \ 0,151} + 0,0281 Vc*f_{136,66 \ 0,251}$	



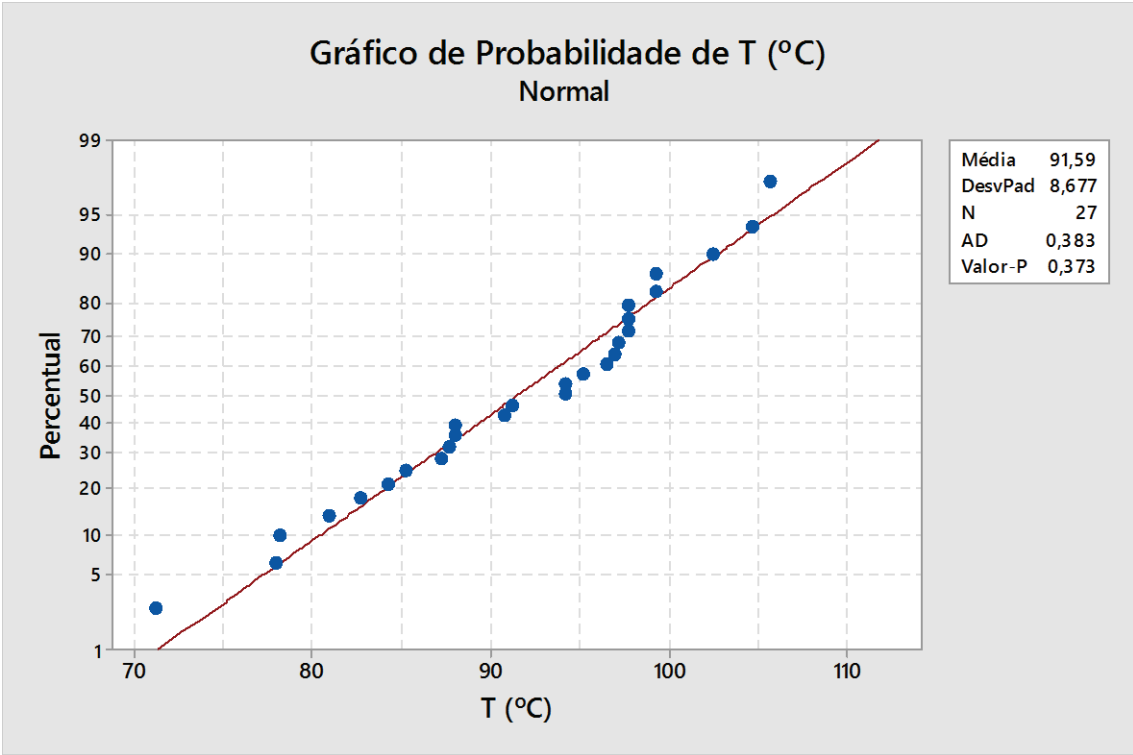
Planejamento fatorial Latão C360 para temperatura

Análise de Variância							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	10	1850,47	94,52%	1850,47	185,047	27,59	0,000
Blocos	2	56,70	2,90%	56,70	28,350	4,23	0,034
Linear	4	1567,12	80,05%	1567,12	391,780	58,42	0,000
Vc	2	455,20	23,25%	455,20	227,600	33,94	0,000
f	2	1111,92	56,80%	1111,92	555,961	82,90	0,000
Interações de 2 fatores	4	226,65	11,58%	226,65	56,662	8,45	0,001
Vc*f	4	226,65	11,58%	226,65	56,662	8,45	0,001
Erro	16	107,30	5,48%	107,30	6,706		
Total	26	1957,77	100,00%				

Sumário do Modelo					
S	R2	R2 (aj)	PRESQ	R2 (pred)	
2,58965	94,52%	91,09%	305,556	84,39%	

Equação de Regressão

$$T \text{ (}^{\circ}\text{C)} = 91,593 + 4,074 \text{ Vc}_{86,55} + 1,546 \text{ Vc}_{107,50} - 5,620 \text{ Vc}_{136,66} + 8,102 \text{ f}_{0,063}$$
  
$$- 0,509 \text{ f}_{0,151} - 7,593 \text{ f}_{0,251} - 5,519 \text{ Vc*f}_{86,55 \text{ } 0,063} + 1,509 \text{ Vc*f}_{86,55 \text{ } 0,151}$$
  
$$+ 4,009 \text{ Vc*f}_{86,55 \text{ } 0,251} + 3,093 \text{ Vc*f}_{107,50 \text{ } 0,063} - 1,630 \text{ Vc*f}_{107,50 \text{ } 0,151}$$
  
$$- 1,463 \text{ Vc*f}_{107,50 \text{ } 0,251} + 2,426 \text{ Vc*f}_{136,66 \text{ } 0,063} + 0,120 \text{ Vc*f}_{136,66 \text{ } 0,151}$$
  
$$- 2,546 \text{ Vc*f}_{136,66 \text{ } 0,251}$$





## Planejamento fatorial Latão C360 para inclinação da curva

### Análise de Variância

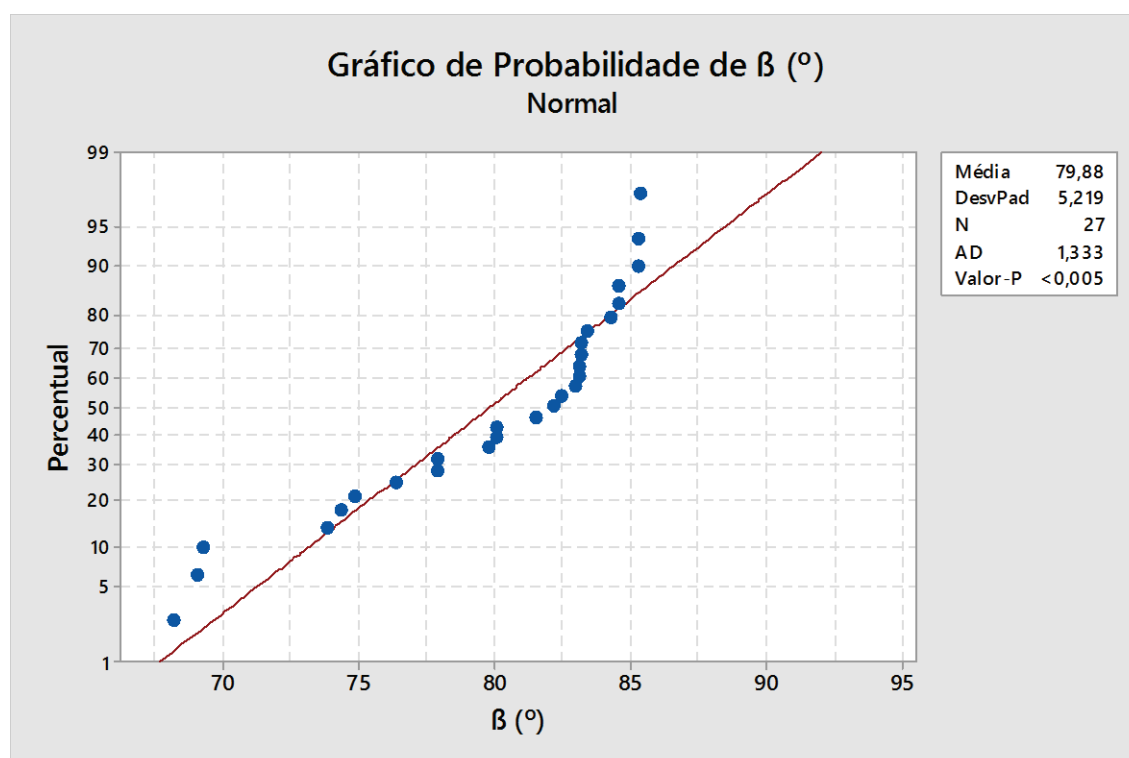
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	10	705,649	99,62%	705,649	70,565	424,81	0,000
Blocos	2	0,776	0,11%	0,776	0,388	2,33	0,129
Linear	4	668,571	94,39%	668,571	167,143	1006,21	0,000
Vc	2	98,809	13,95%	98,809	49,404	297,42	0,000
f	2	569,762	80,44%	569,762	284,881	1715,00	0,000
Interações de 2 fatores	4	36,302	5,13%	36,302	9,076	54,64	0,000
Vc*f	4	36,302	5,13%	36,302	9,076	54,64	0,000
Erro	16	2,658	0,38%	2,658	0,166		
Total	26	708,307	100,00%				

### Sumário do Modelo

S	R2	R2 (aj)	PRESQ	R2 (pred)
0,407567	99,62%	99,39%	7,56844	98,93%

### Equação de Regressão

$$\begin{aligned} \beta \text{ (}^\circ\text{)} = & 79,8778 - 2,533 \text{ Vc}_{86,55} + 0,444 \text{ Vc}_{107,50} + 2,089 \text{ Vc}_{136,66} - 6,322 \text{ f}_{0,063} \\ & + 1,867 \text{ f}_{0,151} + 4,456 \text{ f}_{0,251} - 2,156 \text{ Vc*f}_{86,55 \text{ } 0,063} + 0,789 \text{ Vc*f}_{86,55 \text{ } 0,151} \\ & + 1,367 \text{ Vc*f}_{86,55 \text{ } 0,251} + 0,400 \text{ Vc*f}_{107,50 \text{ } 0,063} - 0,122 \text{ Vc*f}_{107,50 \text{ } 0,151} \\ & - 0,278 \text{ Vc*f}_{107,50 \text{ } 0,251} + 1,756 \text{ Vc*f}_{136,66 \text{ } 0,063} - 0,667 \text{ Vc*f}_{136,66 \text{ } 0,151} \\ & - 1,089 \text{ Vc*f}_{136,66 \text{ } 0,251} \end{aligned}$$



## Planejamento fatorial Latão C360 para força de avanço

### Análise de Variância

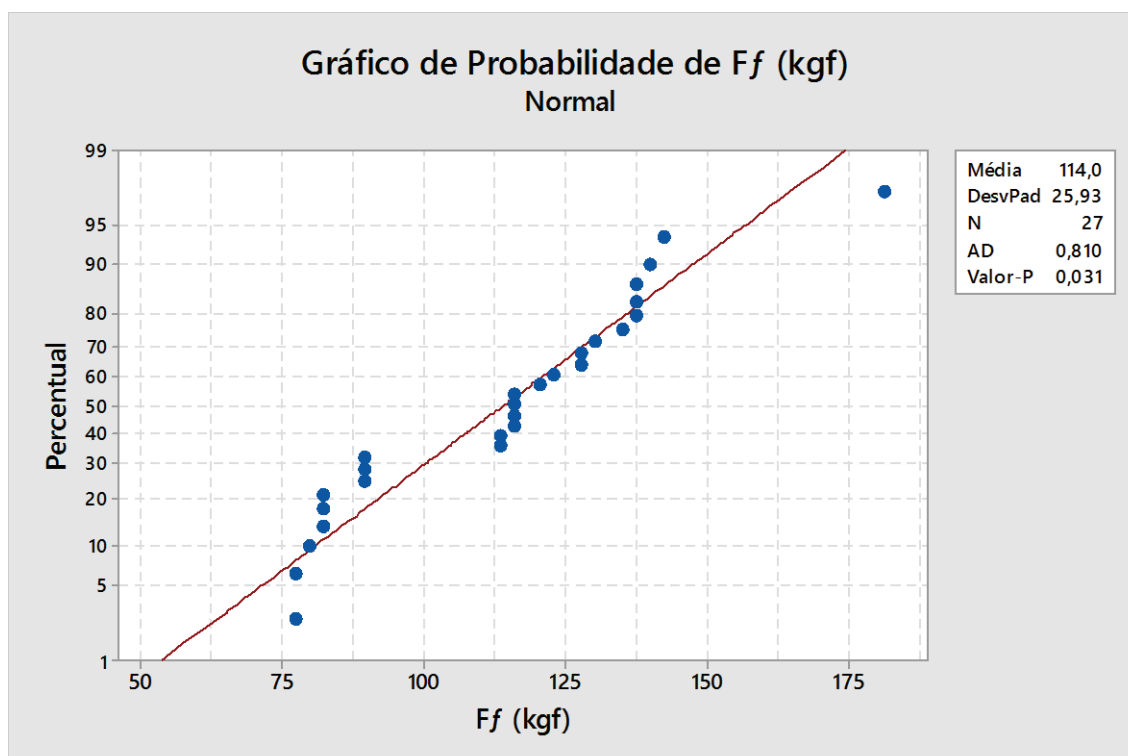
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	10	14606,3	83,53%	14606,3	1460,63	8,12	0,000
Blocos	2	56,6	0,32%	56,6	28,32	0,16	0,856
Linear	4	13741,8	78,59%	13741,8	3435,45	19,09	0,000
Vc	2	448,4	2,56%	448,4	224,21	1,25	0,314
f	2	13293,4	76,03%	13293,4	6646,69	36,94	0,000
Interações de 2 fatores	4	807,8	4,62%	807,8	201,95	1,12	0,381
Vc*f	4	807,8	4,62%	807,8	201,95	1,12	0,381
Erro	16	2879,1	16,47%	2879,1	179,95		
Total	26	17485,4	100,00%				

### Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)
13,4144	83,53%	73,24%	8198,75	53,11%

### Equação de Regressão

$$\begin{aligned}
 Ff \text{ (kgf)} = & 114,02 - 4,11 Vc_{86,55} + 5,55 Vc_{107,50} - 1,45 Vc_{136,66} - 30,72 f_{0,063} \\
 & + 9,81 f_{0,151} + 20,91 f_{0,251} + 0,65 Vc*f_{86,55 \ 0,063} - 4,75 Vc*f_{86,55 \ 0,151} \\
 & + 4,11 Vc*f_{86,55 \ 0,251} - 5,82 Vc*f_{107,50 \ 0,063} + 10,58 Vc*f_{107,50 \ 0,151} \\
 & - 4,75 Vc*f_{107,50 \ 0,251} + 5,17 Vc*f_{136,66 \ 0,063} - 5,82 Vc*f_{136,66 \ 0,151} \\
 & + 0,65 Vc*f_{136,66 \ 0,251}
 \end{aligned}$$



## Planejamento fatorial Latão C360 para momento torsor

### Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	10	10,0446	99,07%	10,0446	1,00446	170,18	0,000
Blocos	2	0,0078	0,08%	0,0078	0,00391	0,66	0,529
Linear	4	10,0083	98,71%	10,0083	2,50207	423,91	0,000
Vc	2	0,0103	0,10%	0,0103	0,00516	0,87	0,436
f	2	9,9980	98,61%	9,9980	4,99898	846,95	0,000
Interações de 2 fatores	4	0,0285	0,28%	0,0285	0,00712	1,21	0,346
Vc*f	4	0,0285	0,28%	0,0285	0,00712	1,21	0,346
Erro	16	0,0944	0,93%	0,0944	0,00590		
Total	26	10,1390	100,00%				

### Sumário do Modelo

S	R2	R2 (aj)	PRESQ	R2 (pred)
0,0768265	99,07%	98,49%	0,268924	97,35%

### Equação de Regressão

$$Mt \text{ (kgf.m)} = 1,5263 - 0,0230 Vc_{86,55} + 0,0248 Vc_{107,50} - 0,0019 Vc_{136,66} - 0,7241 f_{0,063}$$

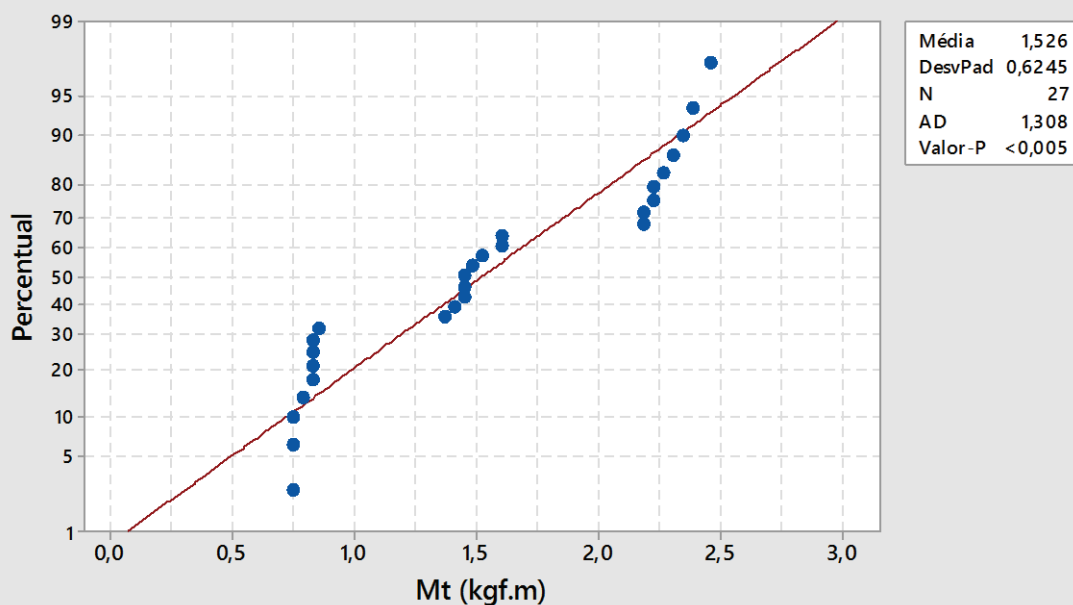
$$- 0,0407 f_{0,151} + 0,7648 f_{0,251} + 0,0241 Vc*f_{86,55} 0,063 + 0,0141 Vc*f_{86,55}$$

$$0,151 - 0,0381 Vc*f_{86,55} 0,251 - 0,0137 Vc*f_{107,50} 0,063 + 0,0330 Vc*f_{107,50}$$

$$0,151 - 0,0193 Vc*f_{107,50} 0,251 - 0,0104 Vc*f_{136,66} 0,063 - 0,0470 Vc*f_{136,66}$$

$$0,151 + 0,0574 Vc*f_{136,66} 0,251$$

Gráfico de Probabilidade de Mt (kgf.m)  
Normal

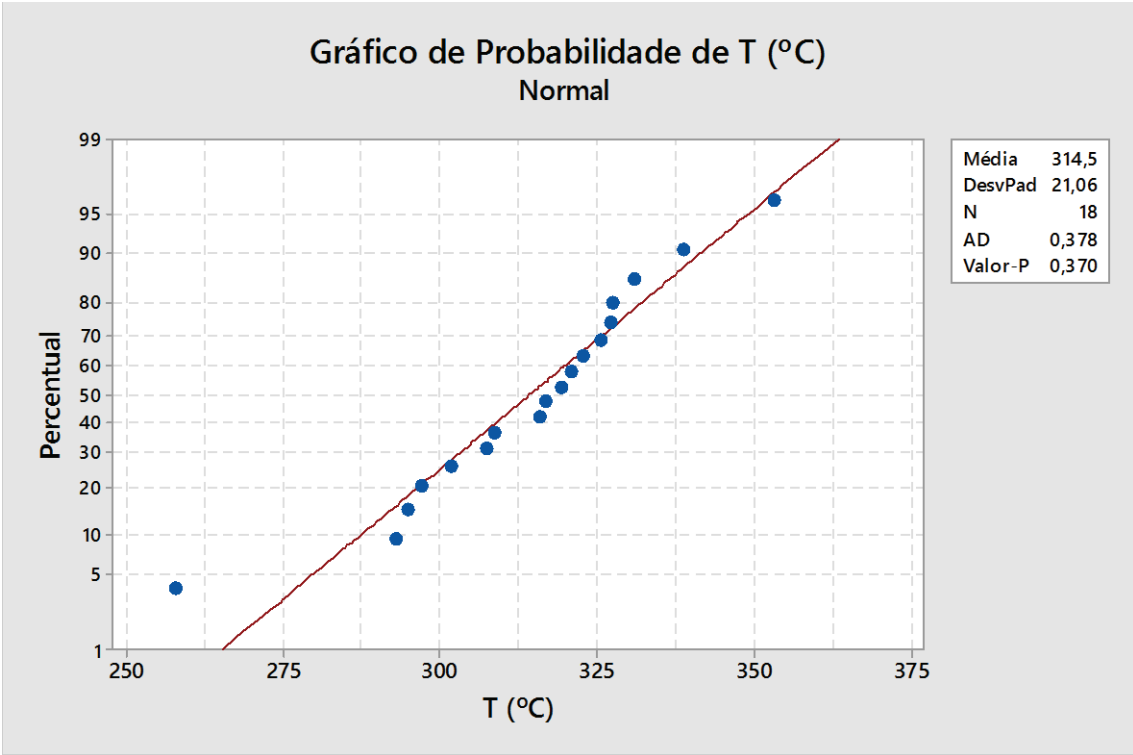


Planejamento Fatorial do Aço 1020 para Temperatura

Análise de Variância								
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	
Modelo	9	4984,5	66,10%	4984,5	553,8	1,73	0,225	
Blocos	1	854,9	11,34%	854,9	854,9	2,68	0,141	
Linear	4	3520,5	46,68%	3520,5	880,1	2,75	0,104	
Vc	2	1827,0	24,23%	1827,0	913,5	2,86	0,116	
f	2	1693,4	22,46%	1693,4	846,7	2,65	0,131	
Interações de 2 fatores	4	609,1	8,08%	609,1	152,3	0,48	0,753	
Vc*f	4	609,1	8,08%	609,1	152,3	0,48	0,753	
Erro	8	2556,5	33,90%	2556,5	319,6			
Total	17	7541,0	100,00%					

Sumário do Modelo					
S	R2	R2 (aj)	PRESQ	R2 (pred)	
17,8763	66,10%	27,96%	12942,3	0,00%	

Equação de Regressão	
$T\text{ (}^{\circ}\text{C)} = 314,48 - 3,77\text{ Vc}_{86,55} + 13,78\text{ Vc}_{107,50} - 10,02\text{ Vc}_{136,66} + 11,45\text{ f}_{0,057} + 0,82\text{ f}_{0,063} - 12,27\text{ f}_{0,073} - 1,16\text{ Vc*f}_{86,55\text{ }0,057} + 10,10\text{ Vc*f}_{86,55\text{ }0,063} - 8,94\text{ Vc*f}_{86,55\text{ }0,073} + 0,69\text{ Vc*f}_{107,50\text{ }0,057} - 7,82\text{ Vc*f}_{107,50\text{ }0,063} + 7,13\text{ Vc*f}_{107,50\text{ }0,073} + 0,47\text{ Vc*f}_{136,66\text{ }0,057} - 2,27\text{ Vc*f}_{136,66\text{ }0,063} + 1,81\text{ Vc*f}_{136,66\text{ }0,073}$	



## Planejamento Fatorial do Aço 1020 para Inclinação

### Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	9	13,9250	99,35%	13,9250	1,54722	135,85	0,000
Blocos	1	0,2939	2,10%	0,2939	0,29389	25,80	0,001
Linear	4	13,5356	96,57%	13,5356	3,38389	297,12	0,000
Vc	2	13,3011	94,90%	13,3011	6,65056	583,95	0,000
f	2	0,2344	1,67%	0,2344	0,11722	10,29	0,006
Interações de 2 fatores	4	0,0956	0,68%	0,0956	0,02389	2,10	0,173
Vc*f	4	0,0956	0,68%	0,0956	0,02389	2,10	0,173
Erro	8	0,0911	0,65%	0,0911	0,01139		
Total	17	14,0161	100,00%				

### Sumário do Modelo

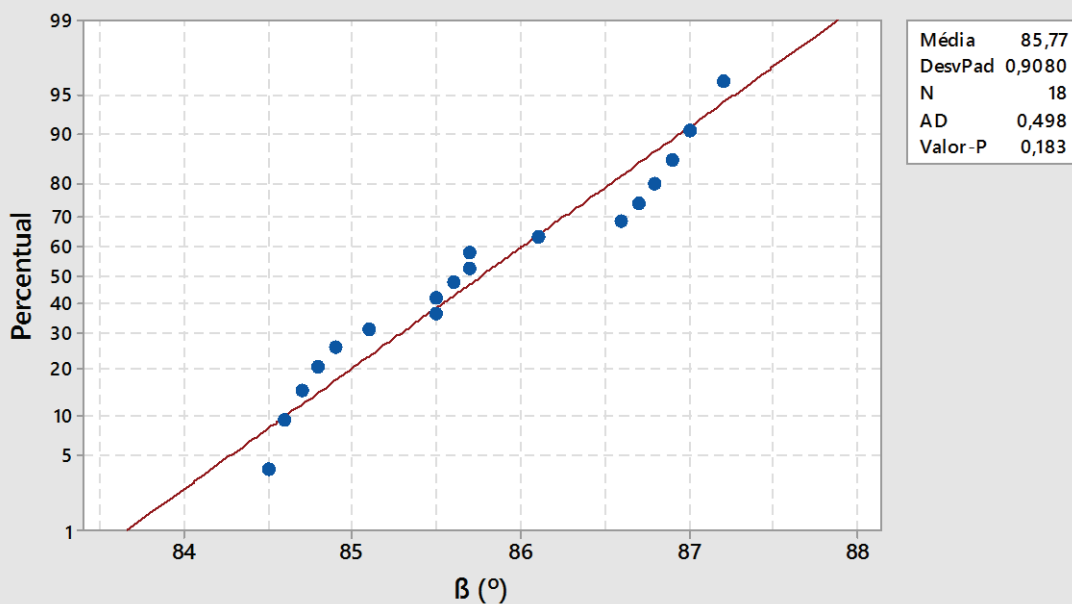
S	R2	R2 (aj)	PRESQ	R2 (pred)
0,106719	99,35%	98,62%	0,46125	96,71%

### Equação de Regressão

$$\begin{aligned}
 \beta (^{\circ}) = & 85,7722 - 1,0056 Vc_{86,55} - 0,0889 Vc_{107,50} + 1,0944 Vc_{136,66} - 0,0722 f_{0,057} \\
 & - 0,0889 f_{0,063} + 0,1611 f_{0,073} + 0,0056 Vc*f_{86,55 \ 0,057} + 0,1222 Vc*f_{86,55 \ 0,063} \\
 & - 0,1278 Vc*f_{86,55 \ 0,073} - 0,0111 Vc*f_{107,50 \ 0,057} - 0,0444 Vc*f_{107,50 \ 0,063} \\
 & + 0,0556 Vc*f_{107,50 \ 0,073} + 0,0056 Vc*f_{136,66 \ 0,057} - 0,0778 Vc*f_{136,66 \ 0,063} \\
 & + 0,0722 Vc*f_{136,66 \ 0,073}
 \end{aligned}$$

### Gráfico de Probabilidade de $\beta (^{\circ})$

Normal



## Planejamento Fatorial do Aço 1020 para Força de avanço

### Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	9	3716,46	88,87%	3716,46	412,94	7,10	0,006
Blocos	1	168,61	4,03%	168,61	168,61	2,90	0,127
Linear	4	3475,78	83,12%	3475,78	868,94	14,94	0,001
Vc	2	1560,95	37,33%	1560,95	780,47	13,42	0,003
f	2	1914,83	45,79%	1914,83	957,42	16,46	0,001
Interações de 2 fatores	4	72,07	1,72%	72,07	18,02	0,31	0,864
Vc*f	4	72,07	1,72%	72,07	18,02	0,31	0,864
Erro	8	465,21	11,13%	465,21	58,15		
Total	17	4181,67	100,00%				

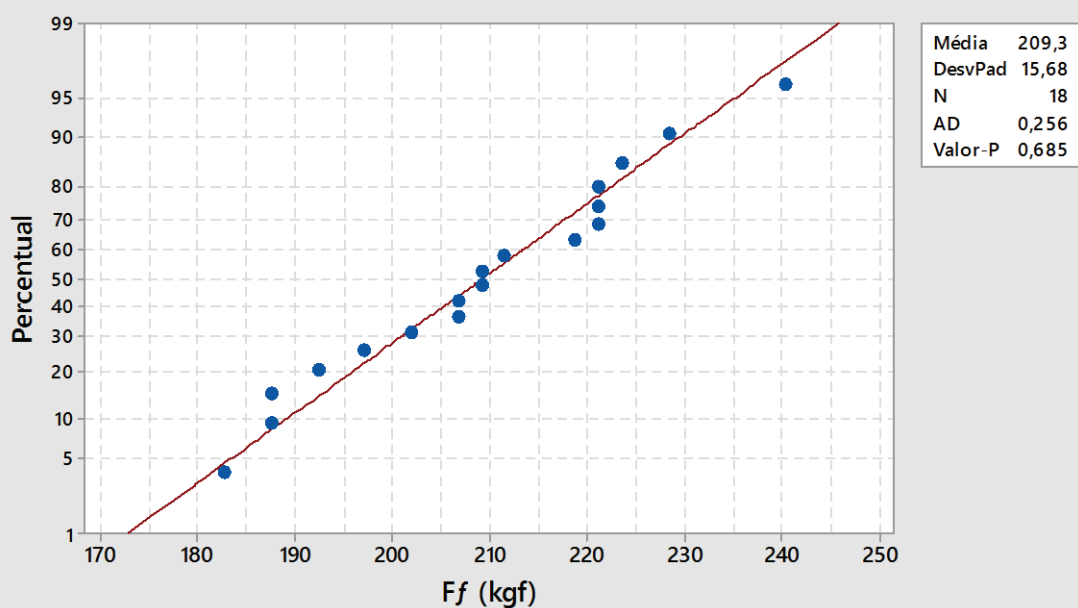
### Sumário do Modelo

S	R2	R2 (aj)	PRESQ	R2 (pred)
7,62572	88,87%	76,36%	2355,14	43,68%

### Equação de Regressão

$F_f \text{ (kgf)} = 209,30 - 10,91 Vc_{86,55} - 0,93 Vc_{107,50} + 11,84 Vc_{136,66} - 10,91 f_{0,057}$   
 $- 2,93 f_{0,063} + 13,84 f_{0,073} - 2,26 Vc*f_{86,55 \ 0,057} - 0,67 Vc*f_{86,55 \ 0,063}$   
 $+ 2,93 Vc*f_{86,55 \ 0,073} - 0,27 Vc*f_{107,50 \ 0,057} + 2,53 Vc*f_{107,50 \ 0,063}$   
 $- 2,26 Vc*f_{107,50 \ 0,073} + 2,53 Vc*f_{136,66 \ 0,057} - 1,86 Vc*f_{136,66 \ 0,063}$   
 $- 0,67 Vc*f_{136,66 \ 0,073}$

### Gráfico de Probabilidade de $F_f$ (kgf) Normal



Planejamento Fatorial do Aço 1020 para Momento torsor

Análise de Variância							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	9	0,68877	67,14%	0,68877	0,07653	1,82	0,206
Blocos	1	0,13176	12,84%	0,13176	0,13176	3,13	0,115
Linear	4	0,39626	38,62%	0,39626	0,09906	2,35	0,141
Vc	2	0,06701	6,53%	0,06701	0,03351	0,80	0,484
f	2	0,32924	32,09%	0,32924	0,16462	3,91	0,066
Interações de 2 fatores	4	0,16076	15,67%	0,16076	0,04019	0,95	0,482
Vc*f	4	0,16076	15,67%	0,16076	0,04019	0,95	0,482
Erro	8	0,33714	32,86%	0,33714	0,04214		
Total	17	1,02591	100,00%				

Sumário do Modelo					
S	R2	R2 (aj)	PRESQ	R2 (pred)	
0,205288	67,14%	30,17%	1,70679	0,00%	

Equação de Regressão	
$Mt \text{ (kgf.m)} = 2,1322 + 0,0244 \text{ Vc}_{86,55} + 0,0594 \text{ Vc}_{107,50} - 0,0839 \text{ Vc}_{136,66} - 0,1022 \text{ f}_{0,057} - 0,0889 \text{ f}_{0,063} + 0,1911 \text{ f}_{0,073} - 0,1144 \text{ Vc*f}_{86,55 \text{ } 0,057} + 0,0922 \text{ Vc*f}_{86,55 \text{ } 0,063} + 0,0222 \text{ Vc*f}_{86,55 \text{ } 0,073} + 0,1806 \text{ Vc*f}_{107,50 \text{ } 0,057} - 0,0878 \text{ Vc*f}_{107,50 \text{ } 0,063} - 0,0928 \text{ Vc*f}_{107,50 \text{ } 0,073} - 0,0661 \text{ Vc*f}_{136,66 \text{ } 0,057} - 0,0044 \text{ Vc*f}_{136,66 \text{ } 0,063} + 0,0706 \text{ Vc*f}_{136,66 \text{ } 0,073}$	

