

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

KAMIRA MIKSZA FRAGOSO

**VALIDAÇÃO DE UMA SOLUÇÃO NUMÉRICA PARA
TRANSFERÊNCIA DE CALOR REVERSA EM UM PROCESSO
DE RETIFICAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2014

KAMIRA MIKSZA FRAGOSO

**VALIDAÇÃO DE UMA SOLUÇÃO NUMÉRICA PARA
TRANSFERÊNCIA DE CALOR REVERSA EM UM PROCESSO
DE RETIFICAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Vasconcelos Salvo

CORNÉLIO PROCÓPIO

2014



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procopio
COEME
Engenharia Mecânica



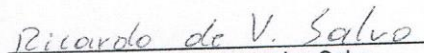
TERMO DE APROVAÇÃO


VALIDAÇÃO DE UMA SOLUÇÃO NUMÉRICA PARA TRANSFERÊNCIA DE
CALOR REVERSA EM UM PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

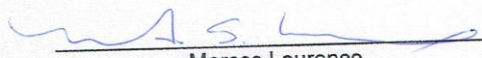
por

KAMIRA MIKSZA FRAGOSO

Este Trabalho de conclusão de curso foi apresentado em primeiro de agosto de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia mecânica. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.


Ricardo de Vasconcelos Salvo
Prof. Orientador


Rubens Gallo
Membro titular


Marcos Lourenço
Membro titular

Dedico o presente trabalho à minha família e meus amigos, meus maiores apoiadores, que estiveram presentes não apenas durante a minha graduação, mas em todos os meus momentos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus, pois sem ele nada é possível, pela força e pela oportunidade de estar concluindo a graduação.

Agradeço ao professor Dr. Ricardo de Vasconcelos Salvo, pela sua paciência em me ajudar, me orientar sempre que surgiam dúvidas, por mais banais que elas fossem ele estava sempre disposto a saná-las, o meu muito obrigado.

Agradeço aos professores Me. Rubens Gallo e Me. Henrique Cotait Hazuk, sem suas críticas construtivas durante a banca não seria possível meu crescimento pessoal e profissional durante o desenvolvimento deste trabalho.

Meu muito obrigado também a minha família, em especial a minha mãe, quem mais me apoiou e acreditou em mim durante toda a minha graduação.

E por fim, agradeço aos meus amigos, minha segunda família especialmente ao Danilo e à Paula, pelos momentos de descontração e por toda a força que me deram ao longo de todo este tempo.

“Se um dia tiver que escolher entre o mundo e o amor lembre-se... Se escolher o mundo ficará sem amor, mas se escolher o amor, com ele você conquistará o mundo.” (Albert Einstein)

Resumo

FRAGOSO, Kamira Miksza. **SOLUÇÃO NUMÉRICA PARA TRANSFERÊNCIA DE CALOR REVERSA EM UM PROCESSO DE RETIFICAÇÃO**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em engenharia mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

A usinagem é um processo muito utilizado e com grande apelo econômico. Como a maior parte das atividades de fabricação envolve uma grande quantidade de parâmetros que devem ser ajustados para se obter um ponto ótimo. Um dos fatores que possui influencia marcante neste processo, e é de difícil previsão, é a quantidade de calor transferida no mesmo. A transferência excessiva de calor pode levar a um excesso de temperatura na interface ferramenta peça, o qual provavelmente acarretará perdas. Por ser de difícil previsão, uma técnica comum na determinação do calor transferido durante o processo é a transferência reversa de calor. O presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo de validação de um código numérico, o qual, se baseia no método de volumes finitos – utilizado na solução do problema direto – e no método da seção áurea – utilizado para otimização do problema inverso. Para isto são utilizados artigos da literatura aberta onde a transferência de calor em processos de retificação plana foi estudado. Os resultados obtidos apresentam boa concordância com os artigos utilizados, validando assim a ferramenta numérica utilizada.

Palavras-chave: calor na retificação plana, transferência de calor reversa na retificação plana, método da seção aurea, estudo numérico.

Abstract

FRAGOSO, Kamira Miksza. **NUMERICAL SOLUTION FOR REVERSE HEAT TRANSFER IN A PROCESS OF GRINDING**. Graduation Project (Bachelor in Mechanical Engineering) – Federal Technology University of Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

Machining is a very using process and with great economic appeal. As most manufacturing activities involving a large number of parameters which must be adjusted to obtain an optimal point. One factor that has remarkable influence this process, and is difficult to predict, is the amount of heat transferred in the same. Excessive heat transfer may lead to an excess temperature at the interface tool part, which probably will result in losses. Because it is difficult to predict, a common technique in determining the heat transferred during the process is the reverse heat transfer. This paper aims to present a validation study of a numerical code, which is based on finite volume method - used in the solution of the direct problem - and the golden section method - used for optimization of the inverse problem. For this we using the open literature articles where the heat transfer in flat grinding processes was studied are used. The results show good agreement with the articles used, thus validating the numerical tool used.

Keywords: heat in the flat griding process, reverse transfer of heat in the flat griding process, the golden section method, numerical study.

Lista de Figuras

Figura 1: Retificação plana tangencial.....	12
Figura 2: Comparação dos resultados experimentais rebolo A60.....	22
Figura 3: Comparação dos resultados experimentais rebolo A60.....	22
Figura 4: Comparação dos resultados experimentais rebolo B60.....	23
Figura 5: Comparação dos resultados experimentais rebolo B60.....	23
Figura 6: Comparação dos resultados experimentais e modelados.....	25
Figura 7: Comparação dos resultados experimentais e modelados.....	25
Figura 8: Seleção dos eixos no software Engauge.....	26
Figura 9: Seleção dos pontos no gráfico.....	27
Figura 10: Dados obtidos pelo Engauge.....	28
Figura 11: Alteração das condições de contorno.....	29
Figura 12: Interface com o usuário apresentada pelo código numérico utilizado durante a execução do mesmo.....	30
Figura 13: Distribuição de temperatura na peça durante um processo de retificação.....	31
Figura 14: Comparação nas malhas.....	33
Figura 15: Dados experimentais e teóricos.....	34
Figura 16: Dados experimentais e teóricos.....	35
Figura 17: Dados experimentais e teóricos.....	36
Figura 18: Dados experimentais e teóricos.....	37
Figura 19: Dados experimentais e teóricos.....	38
Figura 20: Dados experimentais e teóricos.....	39

Lista de Tabelas

Tabela 1: Dados no formato correto – tempo [s] na coluna da esquerda e temperatura [°C] na coluna da direita.....	28
Tabela 2: Dados de entrada para o rebolo 30SA4618VWEB2.....	32
Tabela 3: Dados de entrada para o rebolo 2A4618VWEB2.....	34
Tabela 4: Dados de entrada.....	36
Tabela 5: Dados de entrada.....	37
Tabela 6: Dados de entrada.....	38
Tabela 7: Dados de entrada.....	39

Sumário

1 – Introdução.....	11
2 – Justificativa.....	13
3 – Objetivo.....	14
3.1 – Objetivos específicos.....	14
4 – Revisão Teórica.....	15
4.1 – O Processo de Retificação.....	15
4.2 – Transferência de Calor.....	16
4.2.1 – Problemas Inversos em Transferência de Calor.....	17
4.3 – Solução Numérica.....	18
4.3.1 – O Método dos Volumes Finitos.....	18
4.3.2 – O Método da Seção Áurea.....	19
4.4 – Revisão Bibliográfica.....	20
5 – Metodologia.....	26
6 – Resultados.....	32
7 – Conclusão.....	40
Referência.....	41

1 INTRODUÇÃO

A fabricação é um processo que está presente na maior parte das atividades humanas. Seja em qualquer processo, é preciso conhecer os parâmetros que afetam de alguma maneira, o produto a ser feito. Na usinagem isto não é diferente, e um fator extremamente importante nesta área específica é a transferência de calor. Esta é uma característica inerente a qualquer atividade que envolva atrito, podendo se tornar um problema durante a usinagem, visto que existem muitas perdas quando há calor em excesso, que se traduz em uma temperatura excessivamente alta. O excesso de temperatura acomete tanto a peça quanto a ferramenta, sendo que na primeira destacam-se os seguintes efeitos: trincas, perda das características do material e distorções em sua forma. Com relação à ferramenta, o ponto crítico é a alteração das propriedades físicas, podendo ocorrer trincas térmicas que inutilizam a mesma.

O processo a ser abordado no presente trabalho é o de retificação, que segundo Ferraresi (1970), é o processo de usinagem por abrasão destinado à obtenção de superfícies com auxílio de ferramenta abrasiva de revolução. Assim, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se desloca. A retificação pode ser tangencial ou frontal.

A retificação é o principal processo da indústria atual, e corresponde entre 20% a 25% das despesas totais em operações realizadas por máquinas ferramentas nos países industrializados. Este processo, apesar de muito empregado, não é tão bem compreendido como outros processos que tem como ferramenta àquelas com geometria de corte bem definida. Este processo tem taxas de remoção de cavaco baixas em comparação com outros, porém isso acontece devido às tolerâncias apertadas que são possíveis de se obter com ele. (Gâmbio,2014).

Podemos ver na Fig. 1 o processo de retificação plana, o mais simples dentre todos eles, que será descrito a seguir, e também será o tipo de retificação abordado no presente trabalho.

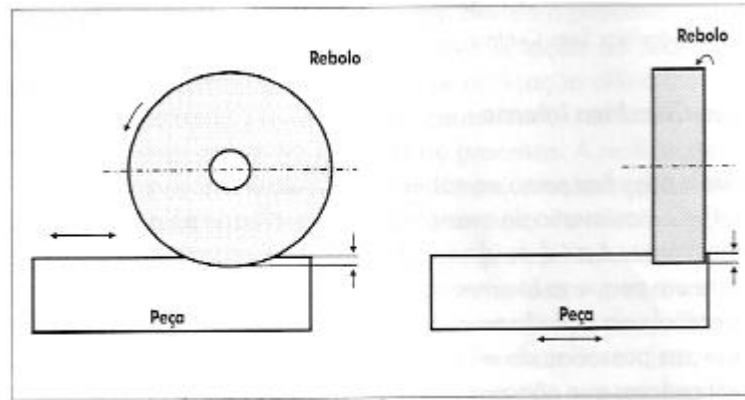


Figura 1: Retificação plana tangencial, fonte Diniz et al. (2008)

2 JUSTIFICATIVA

Considerando-se o processo de usinagem convencional de retificação, do ponto de vista industrial, quanto mais rápido for um determinado processo, mantendo-se o custo, melhor será o retorno financeiro. Conseqüentemente, é interessante aumentar ao máximo a taxa de remoção de material. Um fator limitante a esse aumento são as altas temperaturas.

Conforme Diniz et al (2008), a energia total requerida no processo de retificação é da ordem de 2 a 20 vezes maior que em outros processos de usinagem e grande parte dessa energia é transformada em calor sendo que cerca de 85% do calor gerado é transferido para a peça. Isto pode acarretar mudanças estruturais na superfície da peça, a qual, em alguns casos já pode ter recebido tratamento térmico tendo em vista que geralmente o processo de retificação é o último a ser realizado.

Assim, o conhecimento do campo de temperaturas e do fluxo de calor envolvidos no processo pode proporcionar um melhor entendimento do fenômeno, possibilitando avanços neste sentido.

Outra questão é a sustentabilidade, a qual ganha cada vez mais atenção das indústrias. O bom entendimento do processo pode levar a uma redução da quantidade de material desperdiçado ou retrabalho (o que acarreta perda de tempo, desperdício de ferramentas, energia e horas trabalhadas). Ressalta-se que o presente trabalho é apenas mais uma pequena contribuição na direção do bom entendimento do fenômeno físico.

A qualidade e a precisão de acabamento do produto a ser produzido também servem como motivação para este trabalho, já que existem hoje campos de aplicação que exigem tolerâncias e qualidades de material muito altas. Sendo assim, um conhecimento mais aprofundado do calor durante o processo de fabricação também pode trazer melhoras para este campo.

Portanto, fica claro a importância de se estudar este parâmetro em específico para a melhora contínua da produção, tanto para velocidade como para volume.

3 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é a análise da distribuição de temperatura em um problema real, o calor no processo de retificação, utilizando técnicas para a solução da condução reversa de calor (IHCP – *Inverse Heat Conduction Problem*).

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Utilizando dados de experimentos já realizados, obtidos da literatura aberta, será realizada a validação de um código computacional previamente desenvolvido na universidade, destinado à determinação da distribuição de temperatura e do fluxo de calor durante processos de retificação e/ou fresamento;
- b) Verificar o comportamento do código computacional em relação ao passo de tempo e nível de refinamento de malha necessário para a representação numérica do problema;
- c) Adquirir conhecimento na simulação numérica da transferência de calor em processos de usinagem por retificação.

4 REVISÃO TEÓRICA

A seguir será realizada uma revisão de todos os assuntos teóricos envolvidos no presente trabalho.

4.1 O PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Segundo Diniz et. al. (2008), muitas peças usinadas tem como última operação de sua superfície a retificação. As principais características deste processo são: possibilidade de obtenção de tolerâncias apertadas, baixa rugosidade superficial, baixa capacidade de remoção de cavaco. De forma geral, é um processo de acabamento, porém algumas vezes pode também ser utilizado como operação intermediária, para gerar a superfície de referência para as operações seguintes.

Os processos de retificação se classificam em cilíndrico, onde temos a retificação externa, sem centro e interna, plana, que pode ser tangencial e frontal e a retificação de perfis.

O tipo de processo a ser abordado no presente trabalho será a retificação plana tangencial. Este processo se define por ter o eixo do rebolo paralelo à superfície da peça a ser retificada, a mesa faz o movimento de avanço alternativo e o movimento de avanço transversal, enquanto o rebolo, rotacionando, realiza o movimento em profundidade. Este tipo de processo é lento e é muito usado para a usinagem de peças grandes e de produção em baixa escala, ou em escala única. (Diniz et al., 2008)

Ainda segundo Diniz et. al. (2008), a ferramenta conhecida como rebolo é um corpo cilíndrico, formado por material aglomerante, que tem por função reunir inúmeros e pequenos grãos abrasivos, que entrarão em contato

com a peça realizando assim a usinagem. Cada grão retira uma pequena quantidade de material, formando um cavaco muito pequeno, o que confere ao processo a possibilidade de obtenção de tolerâncias bem apertadas. Os grãos podem ser formados de óxido de alumínio (Al_2O_3), que é indicado para a retificação de materiais de alta resistência à tração. Dentre os tipos de óxido de alumínio temos o comum, o branco, o rosa e o zirconado, e de carboneto de silício (SiC), que é usado em materiais de alta dureza, materiais não-ferrosos e não-metálicos. Entre seus tipos destaca-se o verde e existe ainda o diamante artificial que é usado para a retificação de materiais não ferrosos e o CBN (nitreto de boro cúbico) usado para usinar materiais ferrosos de alta dureza, este material se apresenta em dois tipos, o primeiro com recobrimento de 60% em peso de níquel, e o segundo sem recobrimento.

4.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Incropera et. al. (2012) definem a transferência de calor como a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura. Esta energia pode se movimentar de três maneiras: condução, convecção ou radiação. Segundo os autores, a condução pode ser vista como o trânsito de energia entre as moléculas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância através de interações das partículas. Já a convecção é um modo que abrange dois mecanismos: a transferência de energia pelo movimento molecular aleatório ou difusão; e a transferência pelo movimento global ou macroscópico do fluido, associados ao fato de que um grande número de moléculas está se movendo, na presença de um gradiente de temperatura, contribui para a transferência de calor. Por fim, temos a radiação, que é a energia térmica emitida pela matéria, independente do seu estado, essa emissão pode ser relacionada a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas, e esta energia é transportada por ondas eletromagnéticas, ocorrendo mais facilmente no vácuo. O mecanismo de transferência de calor a

ser abordado neste projeto é a condução em regime transiente, que varia com o tempo, ou seja, não estacionária.

Segundo Kreith e Bohn (2003), sempre que houver uma diferença de temperaturas dentro de um ou mais sistemas, e eles forem colocados em contato, haverá transferência de energia, cujo processo é conhecido como transferência de calor. Esta entidade em trânsito, ou calor, não pode ser mensurada ou observada diretamente, porém seus efeitos são possíveis de se observar ou medir.

Çengel (2009) diz que métodos analíticos para a solução de problemas de transferência de calor são baseados em solucionar as equações diferenciais juntamente com as condições de contorno. Estes métodos resultam em soluções na forma de funções de temperaturas para cada ponto do meio. Porém métodos numéricos são baseados na substituição da equação diferencial por um conjunto de equações algébricas para temperaturas para os pontos selecionados. Ele também afirma que existem diferentes formas de se obter esta formulação numérica, como diferenças finitas, elementos finitos, elementos de controle, balanço de energia ou volume de controle entre outros. O autor dá muito enfoque que existem muitas limitações para a solução analítica, de tal modo que o método é usado basicamente para problemas muito simplificados e com geometria simples. Sendo assim, a solução analítica é limitada aos problemas que podem ser simplificados apresentando boas aproximações.

4.2.1 Problemas Inversos em Transferência de Calor

A medição direta da temperatura na interface peça ferramenta é muito difícil, seja pelas elevadas tensões na região de contato, seja pela presença do cavaco, que pode dificultar ou até impossibilitar a visualização da região de interesse. Tentativas de se realizar tal medição normalmente envolvem o uso de termopares na ferramenta, ou colocados na peça, ou ainda por meio de leituras de infravermelho. A utilização de infravermelho pode se tornar

complexa devido aos fatores expostos acima e a utilização de termopares na ferramenta pode enfraquecer a mesma, impossibilitando que o processo de usinagem seja realizado em condições semelhantes às utilizadas na indústria. A utilização de termopares na peça é interessante, no entanto não fornece, por si só, o fluxo de calor transferido para a peça, muito menos a parcela transferida para a ferramenta, além disso, para a obtenção da temperatura próxima a interface o termopar deve ser sacrificado. Uma alternativa é a utilização de técnicas de transferência de calor reversa, que embora não eliminem a necessidade de realização de experimentos, fornecem uma complementação aos mesmos.

Segundo Özisik e Orlande (2000), a análise de problemas de transferência de calor reversa (também conhecidos como *Inverse Heat Transfer Problems* – IHTP) depende da temperatura e/ou medições de fluxo de calor para a estimativa dos parâmetros desconhecidos que aparecem nas análises de problemas físicos para a engenharia térmica. Porém, eles afirmam que dificuldades são encontradas para este tipo de situação, como problemas matemáticos para a solução, erros inertes à mensuração usados na análise. Ainda segundo os autores existem soluções heurísticas (simplificadas) para a resolução de IHTP, ou ainda soluções puramente matemáticas (analíticas). A ideia básica para este tipo de problema é a reformulação dos problemas inversos para algum valor aproximado de problemas bem selecionados usando algum tipo de técnica de regularização.

4.3 SOLUÇÃO NUMÉRICA

Soluções numéricas de transferência de calor são apenas soluções aproximadas. Além dos erros que possam acontecer no decurso do algoritmo, existem três tipos de erros sistemáticos: de modelagem, de discretização e de iteração (Ferziger e Peric, 2002).

4.3.1 O Método dos Volumes Finitos

O domínio da solução é dividido em um número finito de volumes de controle por uma grade que define os limites deste volume de controle. Usualmente os nós computacionais são atribuídos ao centro de cada um destes volumes de controle. As principais vantagens deste método está no fato de que ele é mais preciso, já que as aproximações fornecem o valor médio de cada volume de controle, e deste ser um método conservativo por natureza – desde que as equações discretizadas sejam escritas na forma conservativa (Ferziger e Peric, 2002).

Cada volume de controle fornece uma equação, mas o cálculo dos fluxos através de cada um deles, no limite do domínio, necessita de tratamento especial. Estes fluxos de fronteira devem, ou ser conhecidos, ou ser expressos como uma combinação de valores interiores e dados de limite. Uma vez que eles não fornecem equações adicionais, eles não devem apresentar incógnitas adicionais. Como não há nós de fora do limite, essas aproximações devem ser baseadas nas diferenças dos lados ou extrapolações (Ferziger e Peric, 2002).

4.3.2 O Método da Seção Áurea

A solução utilizada para a realização deste trabalho foi desenvolvida pelo método da seção áurea, que é um método de otimização classificado como método de ordem zero, já que antes de se iniciar o processo de iteração determina-se um intervalo de incerteza, assumindo que exista um número limitado de funções neste intervalo. Em seguida, uma variação mínima é adicionada ao passo, e a função final é calculada para este intervalo (passo mais variação). Isso se repete somando-se o resultado anterior com um incremento conhecido como razão áurea, que é obtido a partir da sequência de Fibonacci.

Este método foi utilizado na rotina de solução com o objetivo de minimizar o erro e convergir para uma solução que possua uma boa aproximação do resultado a ser obtido através de simulação. A rotina é

solucionada pelo método dos volumes finitos, abordado na seção 4.3.1. Ou seja, estipula-se as condições de contorno para o problema, resolve-se o problema direto (solução numérica com as condições de contorno fornecidas) compara-se os resultados obtidos com os dados experimentais, aplica-se o método da seção áurea para minimizar a diferença entre os resultados obtidos e os dados experimentais.

4.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Muitos estudos têm sido realizados para determinar a distribuição de temperatura e troca de calor em processos de usinagem. Estes podem ser teóricos, práticos ou uma mistura de ambos e consistem basicamente em monitorar o gradiente de temperatura na interface peça ferramenta durante a usinagem. Estes processos podem ter ou não a presença de lubrificantes, refrigerantes ou lubrificantes. Em seguida será apresentada uma resenha de alguns trabalhos referentes à distribuição de temperatura no processo de retificação.

Parente et. al. (2011), realizaram um estudo para um processo de retificação, onde se compara o resultado calculado através do experimento com resultados obtidos numericamente (método de elementos finitos). Neste trabalho é possível notar que os resultados das simulações se aproximam dos dados experimentais, a temperatura máxima e a evolução da temperatura medida possuem uma boa estimativa. Os mesmos autores também obtiveram estimativas para o fluxo de calor e o coeficiente convectivo.

Estes autores realizaram a mesma análise para dois tipos diferentes de rebolos o A60, que é feito de oxido de alumínio vitrificado e o B60, feito de nitreto de boro cúbico, ambas usinando o mesmo material, dois blocos de aço S235J de chapas de aço de acordo com a DIN EM 10025, de aço não estruturado, com $C \leq 0,17\%$, obtendo assim duas curvas diferentes de temperatura.

A simulação por elementos finitos foi realizada usando o software comercial ABAQUS, com o modelo de Jaeger, modificado para conter também os efeitos do fluido de refrigeração. A malha considerada foi 200 x 64 elementos e a ferramenta é considerada como sendo a fonte de calor que se desloca de acordo com o movimento da máquina. Os efeitos do fluido de refrigeração foram considerados como condição de contorno. Apenas a superfície de corte possui transferência de calor, as demais são consideradas adiabáticas, os coeficientes de convecção e o fluxo de calor foram obtidos por processos iterativos.

Usando o aço A60, encontraram um fluxo máximo de calor de 51,3 W/mm². Já para o B60, o fluxo máximo foi de 63,2 W/mm² ambos gerados na interface de corte. Este calor gerado foi distribuído por condução ao longo de toda a peça, e removido pelo fluido refrigerante por convecção.

Para um coeficiente de transferência de calor de 1W/mm²K e temperatura ambiente de 25°C, quando a ferramenta entra na peça, o fluxo de calor considerado foi de 10W/mm² para o aço A60 e de 5W/mm² para o B60. Com este fluxo, 19,5% entra na peça para o A60 e 8% para o B60.

As Figs. 2 e 5 mostram a comparação dos resultados obtidos para os dois tipos de rebolo utilizados. Na Fig. 2, o rebolo utilizado foi o A60, com o termopar a 0,17 mm da superfície e na Fig. 3, também foi utilizado o A60, porém com o termopar a 1,0 mm da superfície. Já na Fig. 4 o rebolo B60 foi utilizado e o termopar posicionado a 0,25 mm da superfície e, pôr fim, a Fig. 5 também para o B60, porém com o termopar a 1,0 mm da superfície. Os autores concluíram que os resultados foram próximos o suficiente para o método utilizado ser considerado válido.

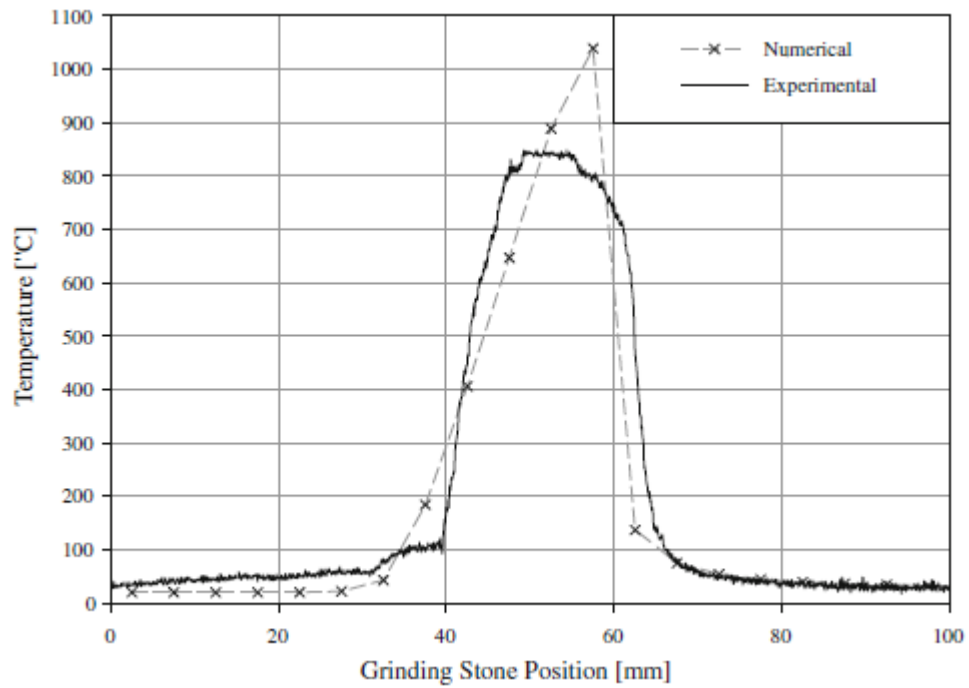


Figura 2: Comparação dos resultados experimentais rebolo A60, fonte: Parente et al (2011).

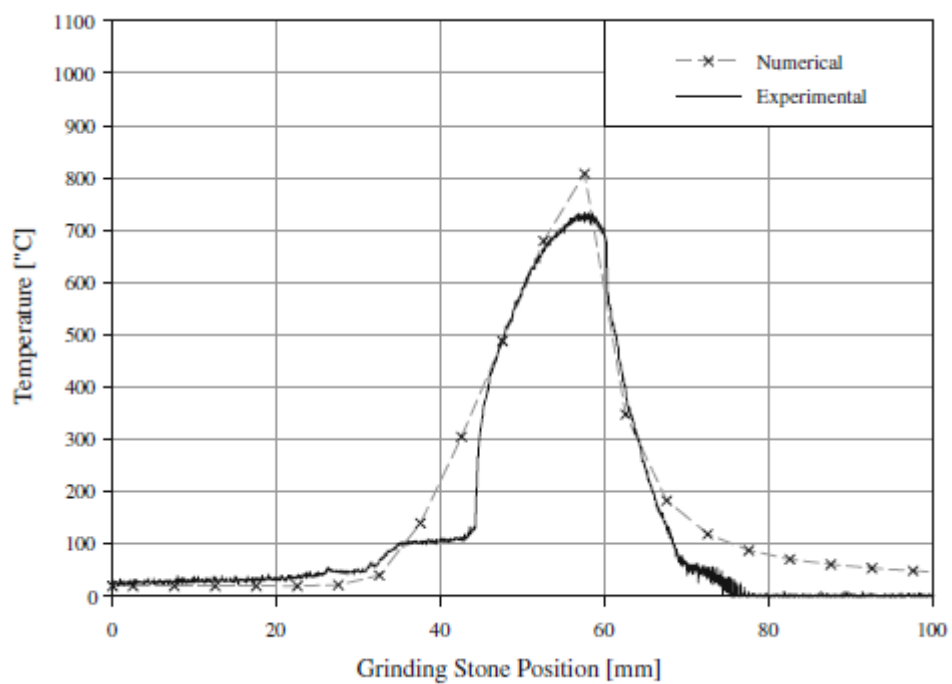


Figura 3: Comparação dos resultados experimentais rebolo A60, fonte: Parente et al (2011).

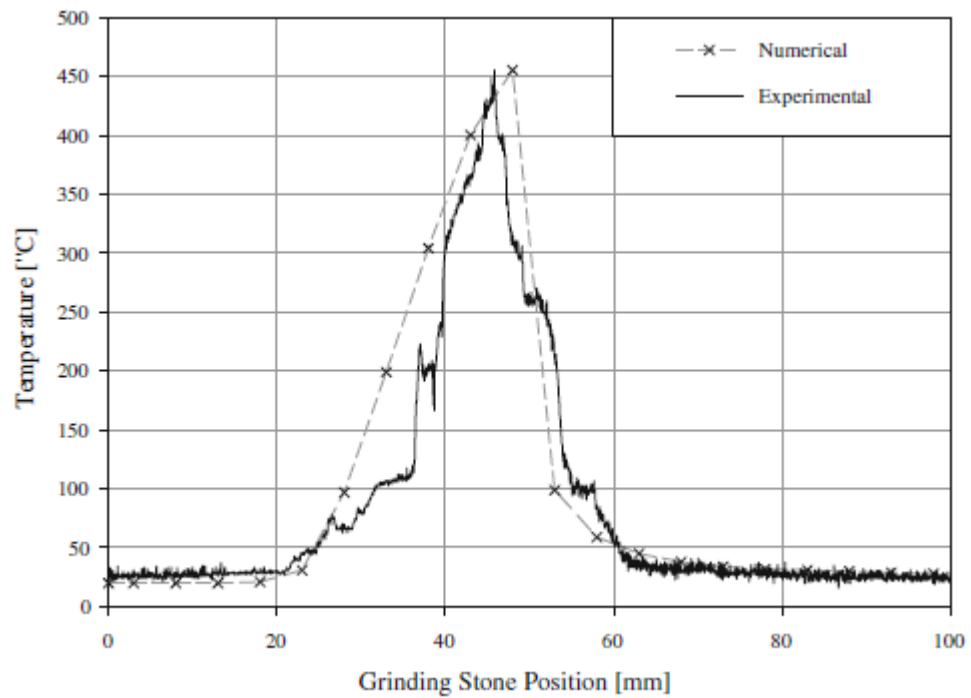


Figura 4: Comparação dos resultados experimentais rebolo B60, fonte: Parente et al (2011).

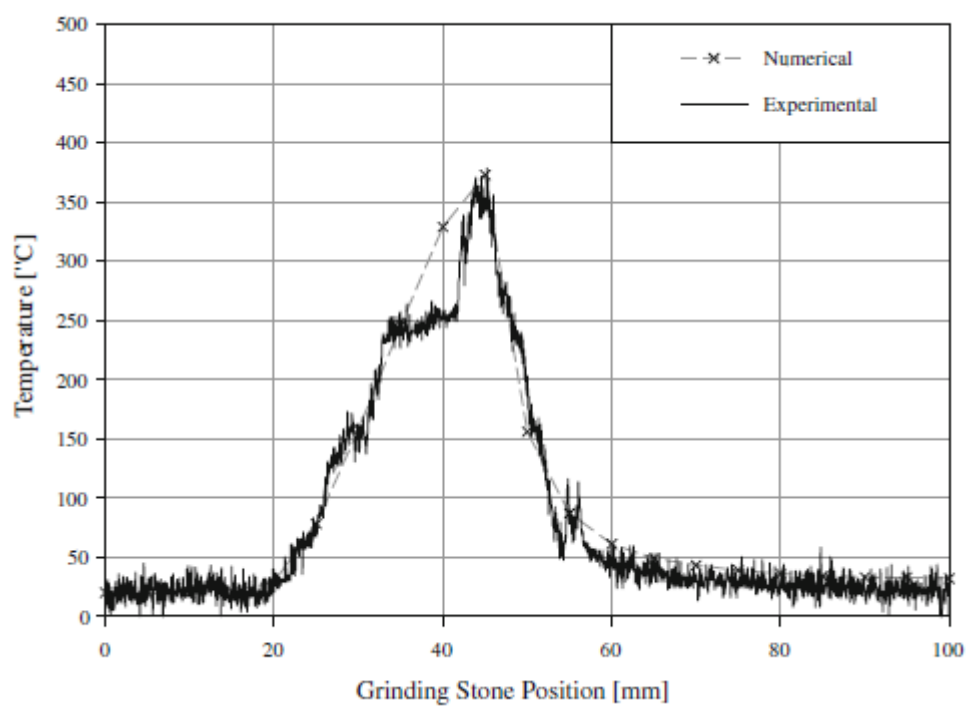


Figura 5: Comparação dos resultados experimentais rebolo B60, fonte: Parente et al (2011).

Garcia et al. (2014) utilizaram o software comercial ansys para modelar a transferência de calor reversa para a retificação utilizando um método de elementos finitos e posteriormente, comparar esses valores calculados com o resultado de testes práticos.

O experimento foi realizado em um equipamento CNC, usinando uma peça de dimensões 100 mm de comprimento, 5 mm de largura e 45 mm de altura. A peça usinada era de aço AISI 4140, com as laterais isoladas com TEFLON para minimizar a transferência de calor para o ambiente. Termopares do tipo K, com 200 μm de diâmetro foram colocados a 3,5mm da borda da peça e a 2,5mm de profundidade, os termopares foram soldados manualmente na peça e destruídos durante os ensaios. Utilizando dois tipos de abrasivos: 2A46I8VWEB2, feito de grãos de alumina fundido; e 30SA46I8VWEB2, um tipo específico de alumina, eles realizaram o experimento cinco vezes, com os parâmetros de corte variando para analisar diferentes situações. Porém, os autores só entram em detalhes para duas situações. O tempo mensurado no experimento foi de aproximadamente sessenta segundos.

Já o modelo de elementos finitos, foi utilizado para resolver a equação de calor transiente em três dimensões durante o processo de usinagem. As propriedades do material foram consideradas constantes. O rebolo foi considerado a fonte geradora de calor, não há a presença de fluido de corte e o fluxo de calor entra na peça pela área de contato entre a peça e a ferramenta, cuja área foi definida teoricamente.

As Figs. 6 e 7 mostram, de forma comparativa, os resultados obtidos nos dois experimentos.

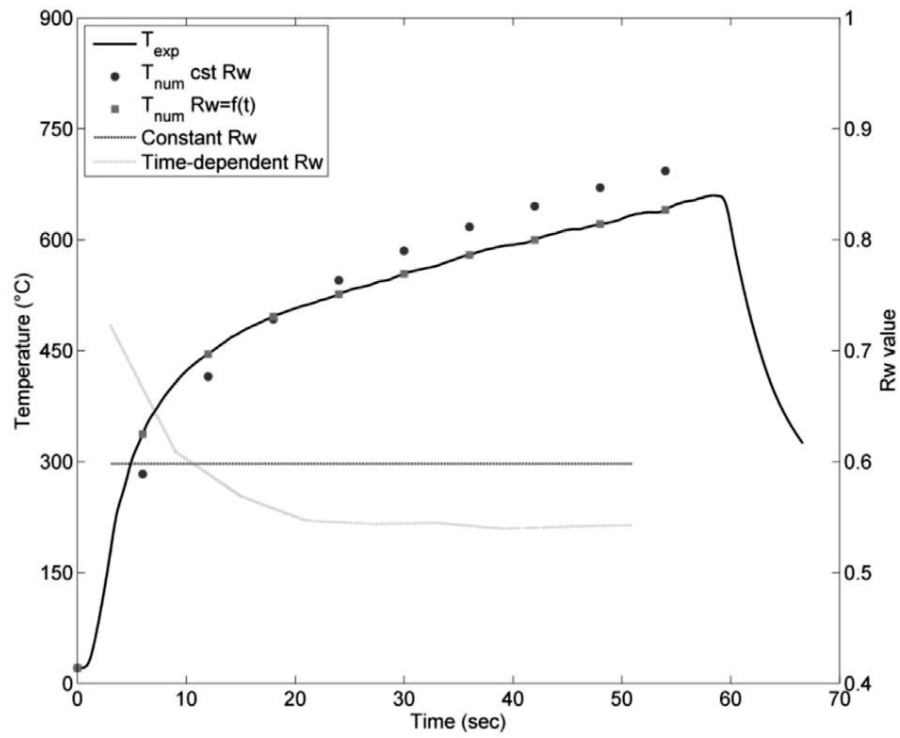


Figura 6: comparação dos resultados experimentais e modelados. Fonte: Garcia et al (2014).

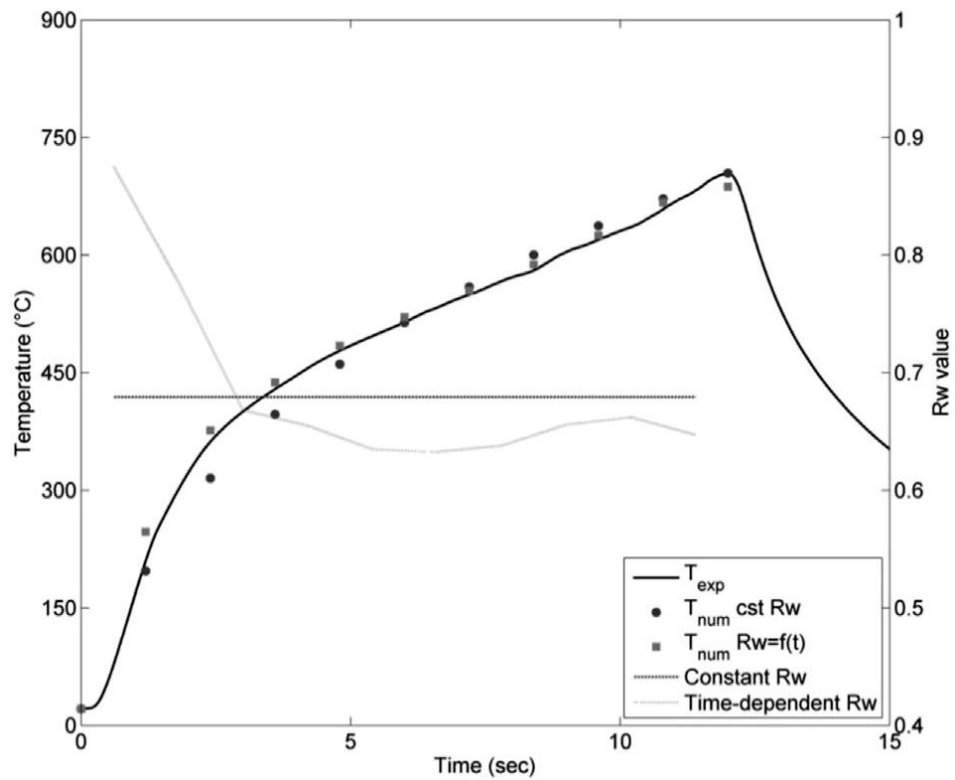


Figura 7: comparação dos resultados experimentais e modelados. Fonte: Garcia et al (2014).

5 METODOLOGIA

Após escolher os artigos da literatura aberta para realizar a análise dos experimentos, o primeiro passo foi utilizar o software Engauge, que se destina a fornecer os valores pontualmente dos gráficos analisados, retirar os dados experimentais e computacionais dos gráficos fornecidos pelos artigos. Utilizando este software, inicialmente definiram-se os eixos, clicando em três pontos do sistema de eixos do gráfico e em seguida fornecendo seus valores ao programa, conforme Fig. 8.

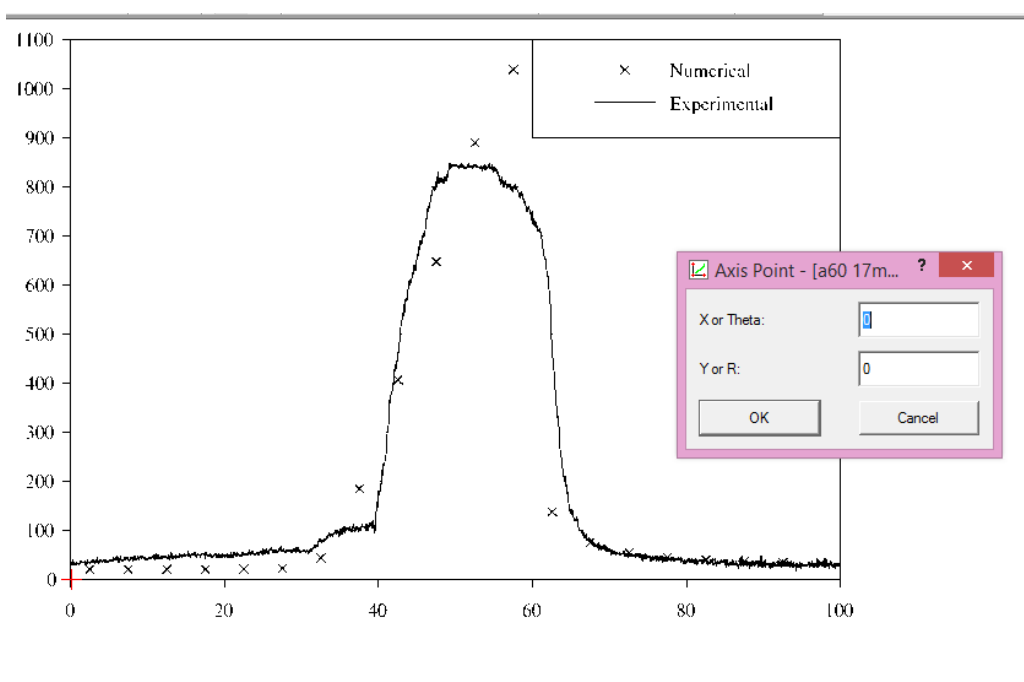


Figura 8: Seleção dos eixos no software Engauge, fonte: Autor.

O próximo passo foi selecionar todos os pontos da curva analisada, conforme Fig. 9.

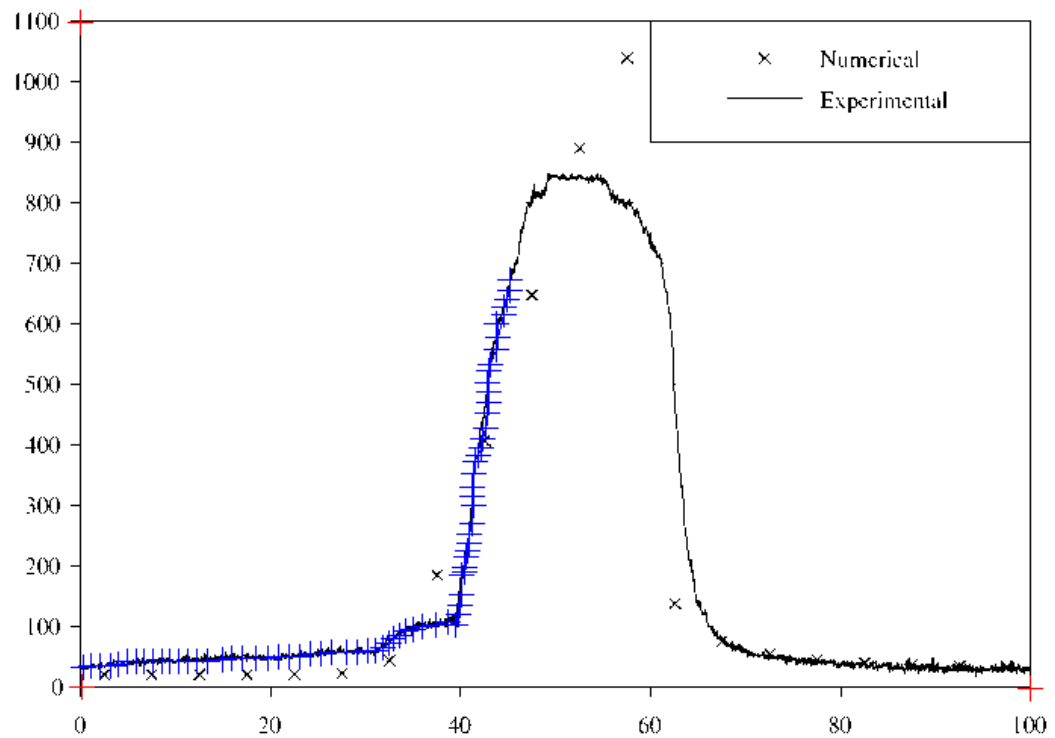


Figura 9: Seleção dos pontos no gráfico, fonte: Autor.

O engage então, fornece uma tabela com os dados referentes ao gráfico, conforme Fig. 10, esses valores passaram por um pós processamento para serem inseridos na rotina de solução no formato correto, dentro de um arquivo pré-allocado, conforme Tab. 1.

	1	2	3	4	5
1	Name:	Curve1			
2	Units:	Graph			
3	FuncArea		4618.91		
4	PolyArea		11329.8		
5	X	Y	Index	Distance	Perce
6	0.164213	32.5781		0	0
7	0.962028	35.1038		1	2.6487
8	1.91897	35.1278		2	3.60594
9	3.0354	35.1558		3	4.72272
10	3.83321	37.6815		4	7.37142
11	4.79088	42.7169		5	12.4971
12	5.74782	42.7408		6	13.4543
13	6.54527	42.7608		7	14.252
14	7.50222	42.7848		8	15.2092
15	8.45916	42.8088		9	16.1665
16	9.25661	42.8288		10	16.9642
17	10.2135	42.8527		11	17.9214
18	11.1705	42.8767		12	18.8787
19	12.1274	42.9007		13	19.8359
20	13.2439	42.9287		14	20.9527
21	14.8391	45.4743		15	23.9569
22	15.7964	48.004		16	26.6617
23	16.9129	48.032		17	27.7785

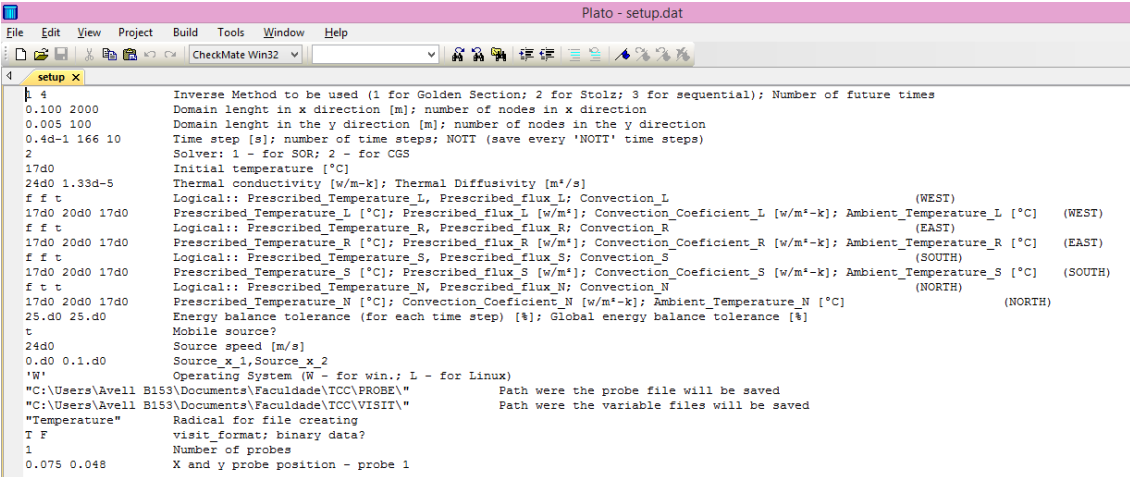
Figura 10: Dados obtidos pelo Engauge, fonte: Autor.

Tabela 1: Dados no formato correto – tempo [s] na coluna da esquerda e temperatura [°C] na coluna da direita

1.2	52.13
1.4	54.67
1.6	49.51
1.8	51.94
2.0	56.88
2.2	64.34
2.4	59.25
2.6	71.69
2.8	94.14
3.0	104.07
3.2	111.52

Fonte: Autor

O passo seguinte é a inserção dos dados de entrada referentes a cada um dos artigos selecionados. Além dos dados fornecidos nos artigos, ainda é necessário analisar e definir os seguintes parâmetros: definir o espaço de tempo, o tamanho e o número de nós, selecionar os dados térmicos do material usinado, o tamanho da área de contato e o tipo de transferência de calor em cada uma das faces. Estes dados foram utilizados como dados de entrada em um código computacional previamente desenvolvido na UTFPR – CP, cuja ferramenta numérica resolve a equação de difusão de calor bidimensional transiente, em linguagem Fortran 90. Este código é baseado no método dos volumes finitos, utiliza o esquema centrado de segunda ordem para a discretização espacial e o avanço temporal é obtido com o esquema de Euler. A Fig. 11 mostra a interface do código com o usuário durante o setup da simulação.



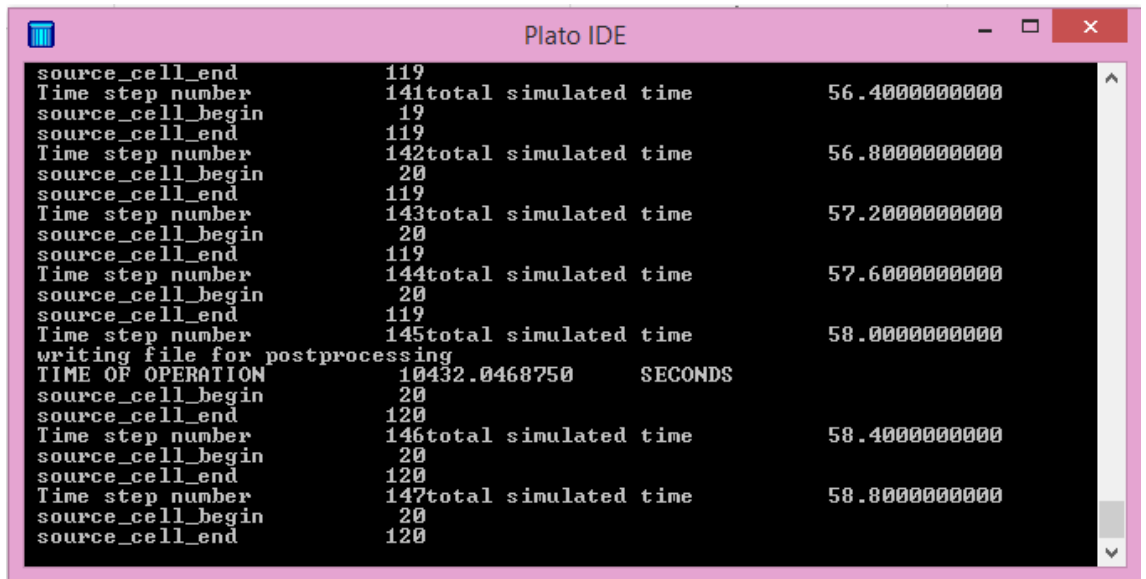
```

Plato - setup.dat
File Edit View Project Build Tools Window Help
CheckMate Win32
4 setup x
i 4 Inverse Method to be used (1 for Golden Section; 2 for Stolz; 3 for sequential); Number of future times
0.100 2000 Domain lenght in x direction [m]; number of nodes in x direction
0.005 100 Domain lenght in the y direction [m]; number of nodes in the y direction
0.4d-1 166 10 Time step [s]; number of time steps; NOTT (save every 'NOTT' time steps)
2 Solver: 1 - for SOR; 2 - for CGS
17d0 Initial temperature [°C]
24d0 1.33d-5 Thermal conductivity [w/m-k]; Thermal Diffusivity [m²/s]
f f t Logical:: Prescribed_Temperature_L, Prescribed_flux_L; Convection_L (WEST)
17d0 20d0 17d0 Prescribed_Temperature_L [°C]; Prescribed_flux_L [w/m²]; Convection_Coefficient_L [w/m²-k]; Ambient_Temperature_L [°C] (WEST)
f f t Logical:: Prescribed_Temperature_R, Prescribed_flux_R; Convection_R (EAST)
17d0 20d0 17d0 Prescribed_Temperature_R [°C]; Prescribed_flux_R [w/m²]; Convection_Coefficient_R [w/m²-k]; Ambient_Temperature_R [°C] (EAST)
f f t Logical:: Prescribed_Temperature_S, Prescribed_flux_S; Convection_S (SOUTH)
17d0 20d0 17d0 Prescribed_Temperature_S [°C]; Prescribed_flux_S [w/m²]; Convection_Coefficient_S [w/m²-k]; Ambient_Temperature_S [°C] (SOUTH)
f t t Logical:: Prescribed_Temperature_N, Prescribed_flux_N; Convection_N (NORTH)
17d0 20d0 17d0 Prescribed_Temperature_N [°C]; Convection_Coefficient_N [w/m²-k]; Ambient_Temperature_N [°C] (NORTH)
25.d0 25.d0 Energy balance tolerance (for each time step) [%]; Global energy balance tolerance [%]
t Mobile source?
24d0 Source speed [m/s]
0.d0 0.1.d0 Source_x_1,Source_x_2
'W' Operating System (W - for win.; L - for Linux)
"C:\Users\Avell B153\Documents\Faculdade\TCC\FROBE" Path were the probe file will be saved
"C:\Users\Avell B153\Documents\Faculdade\TCC\VISIT" Path were the variable files will be saved
"Temperature" Radical for file creating
T F visit_format; binary data?
1 Number of probes
0.075 0.048 X and y probe position - probe 1

```

Figura 11: Alteração das condições de contorno, fonte: Autor.

A interface durante a execução do código pode ser vista na Fig. 12.



```

source_cell_end      119
Time step number    141total simulated time      56.4000000000
source_cell_begin   19
source_cell_end     119
Time step number    142total simulated time      56.8000000000
source_cell_begin   20
source_cell_end     119
Time step number    143total simulated time      57.2000000000
source_cell_begin   20
source_cell_end     119
Time step number    144total simulated time      57.6000000000
source_cell_begin   20
source_cell_end     119
Time step number    145total simulated time      58.0000000000
writing file for postprocessing
TIME OF OPERATION   10432.0468750      SECONDS
source_cell_begin   20
source_cell_end     120
Time step number    146total simulated time      58.4000000000
source_cell_begin   20
source_cell_end     120
Time step number    147total simulated time      58.8000000000
source_cell_begin   20
source_cell_end     120

```

Figura 12: Interface com o usuário apresentada pelo código numérico utilizado durante a execução do mesmo, fonte: Autor.

O próximo e último passo é o pós-processamento e análise dos resultados obtidos. Utilizando o software comercial Excel, foram construídos gráficos. O software livre Visit também foi utilizado na análise dos resultados. Este é um software destinado ao pós-processamento de grandes quantidades de dados (sobretudo simulações de DFC – Dinâmica dos Fluidos Computacional) e assim, possibilita a visualização rápida dos resultados, tornando possível a identificação da distribuição de temperatura na peça ao longo do tempo, conforme ilustrado na Fig. 13.

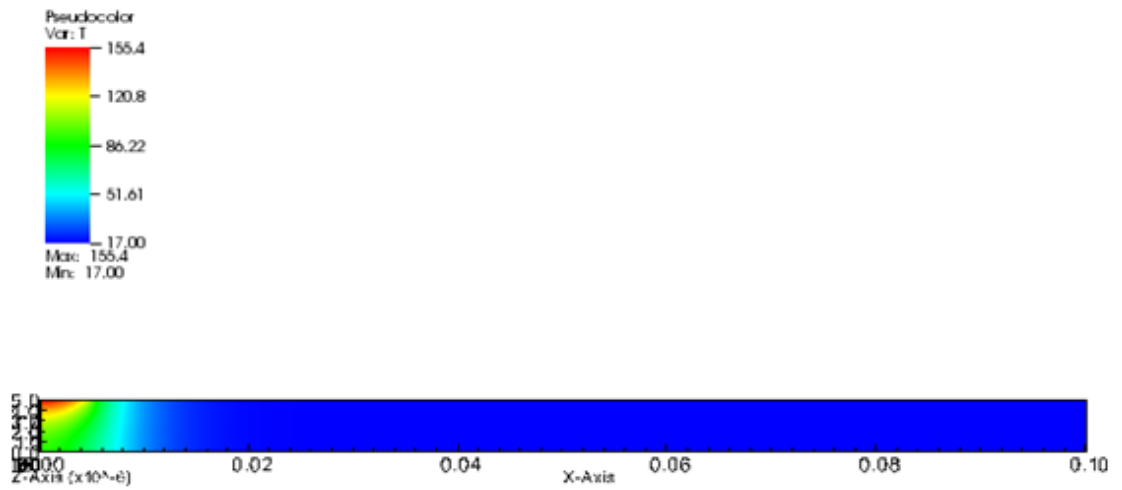


Figura 13: Distribuição de temperatura na peça durante um processo de retificação, fonte: Autor

6 RESULTADOS

O primeiro experimento analisado foi o realizado por Garcia et al (2014) para o rebolo de Sol-Gel 3M Cubitron 321 ou 30SA46I8VWEB2, conforme citado no item 4. O primeiro passo foi a obtenção dos dados de entrada a partir do artigo referenciado, cujos dados se encontram na Tab. 2. Na sequência definiu-se o passo de tempo em 0,4 segundos, e selecionou-se os pares tempo/temperatura para cada um dos passes de tempo referentes ao gráfico da Fig. 7.

Tabela 2: Dados de entrada rebolo 30SA46I8VWEB2

Passe de tempo (s)	0,4
Número de passes de tempo	31
Temperatura inicial (°C)	20
Condutividade Térmica (W/mK)	52
Difusividade Térmica (m ² /s)	1,33E-5
Coeficiente convectivo (W/m ² K)	20
Velocidade do rebolo (m/s)	1,667E-4

Fonte: Autor

Após a definição dos dados de entrada e do passo de tempo, foi feita a definição do tamanho da malha. Para isso, foi feito um estudo de independência de malha, no qual três simulações foram realizadas, utilizando malhas com: 100x5 elementos, 1000X50 elementos e por fim, de 5000x250 elementos. Como mostrado na Fig. 14, os resultados obtidos com as três simulações apresentam uma diferença insignificante. Ou seja, a malha mais grosseira já é suficientemente fina para a simulação do caso em questão.

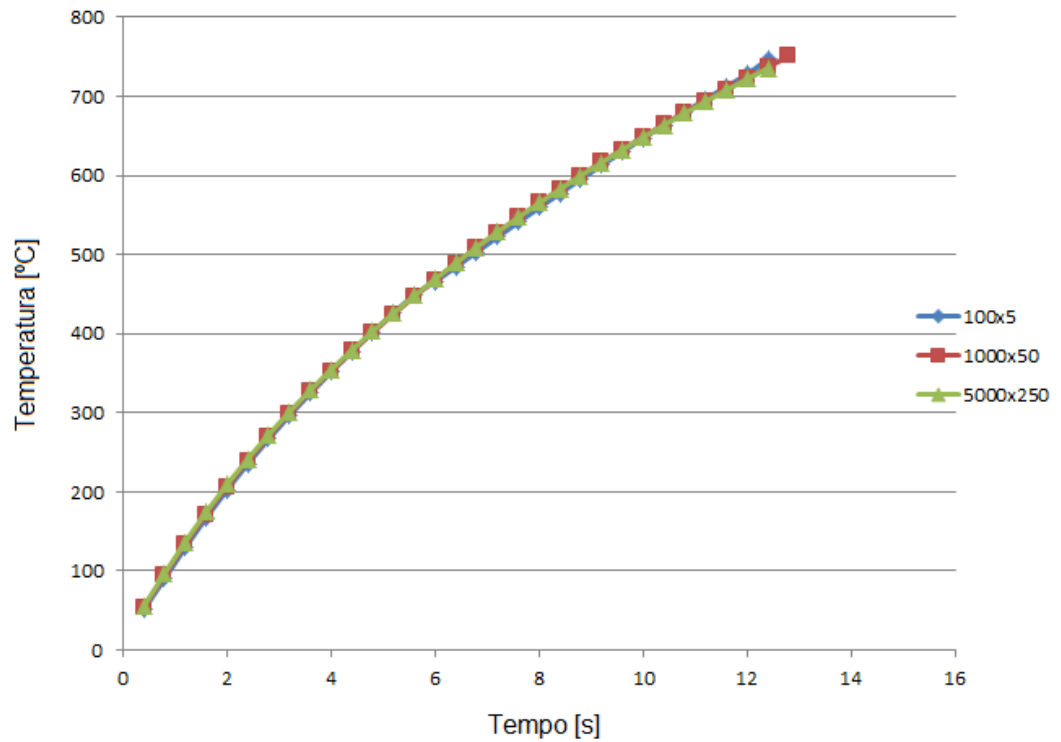


Figura 14: comparação nas malhas, fonte: Autor

Como os resultados são muito próximos, será realizada apenas a demonstração de um deles no presente trabalho. A Fig. 15 nos mostra a comparação dos resultados obtidos com os dados teóricos. Como podemos ver, existe uma certa diferença entre eles, isso se dá pela utilização do método computacional. Porém apesar dela parecer significativa os resultados são consistentes e suficientes para serem utilizados normalmente em uma situação real.

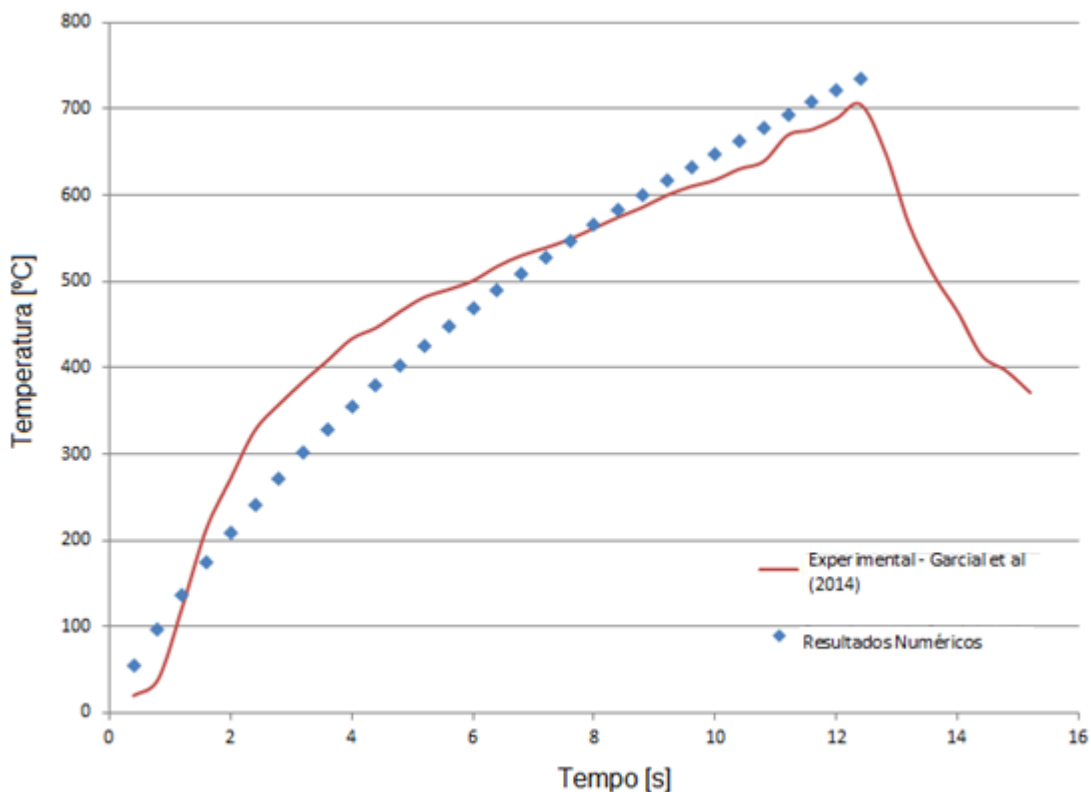


Figura 15: Dados experimentais e teóricos, fonte: Autor

Podemos perceber também que as temperaturas nos dados teóricos começam a decair a partir de certo instante de tempo. Isso acontece provavelmente pela destruição do termopar durante o ensaio. Porém para a simulação esse efeito não é mapeado pela rotina, e, portanto, não sendo possível dimensionar essa situação a mesma não foi considerada.

O próximo experimento foi realizado para o rebolo 2A46I8VWEB2 de alumina fundida, também a partir do artigo de Gracia et al (2014), descrito no item 4. O procedimento para a obtenção dos dados de entrada, apresentados na Tab. 3, e os passes de temperatura e tempo foram os mesmos realizados para o teste anterior.

Tabela 3: Dados de entrada para o rebolo 2A46I8VWEB2

Passe de tempo (s)	0,4
Número de passes de tempo	146
Temperatura inicial (°C)	20
Condutividade Térmica (W/mK)	52

Difusividade Térmica (m ² /s)	1,33E-5
Coeficiente convectivo (W/m ² K)	20
Velocidade do rebolo (m/s)	3,33E-5

Fonte: Autor

Utilizando apenas a malha de 5000x250 os resultados se encontram na Fig. 16, como é possível perceber também existe uma diferença nos valores. Porém, apesar de ser maior que o caso anterior a mesma explicação é válida, tornando assim os resultados possíveis de serem utilizados.

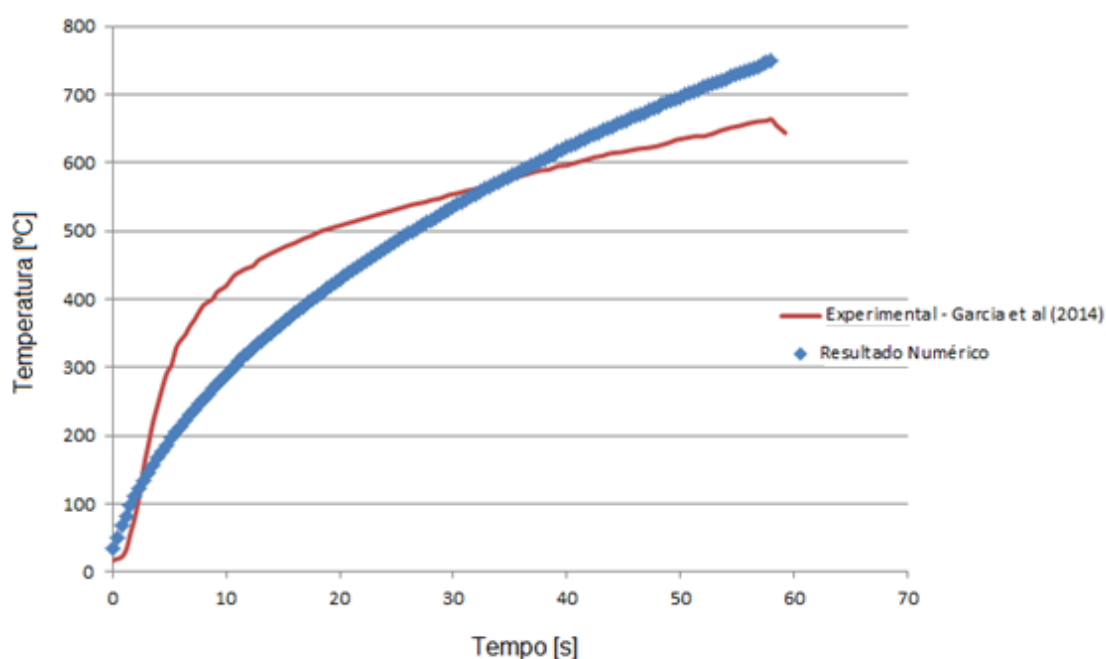


Figura 16: Dados experimentais e teóricos, fonte: Autor

Simulando agora os experimentos de Parente et al. (2011), o primeiro experimento realizado foi para o rebolo A60 para o termopar em uma profundidade de 1 mm da superfície usinada, conforme citado no item 4. Os procedimentos para os dados de entrada, na Tab. 4 e passes de tempo foram os mesmos das simulações anteriores. Porém para o estudo deste artigo alguns dados foram utilizados de outra fonte (condutividade e difusividade térmica), já que Parente et al. (2011) não informam quais os valores que utilizaram para estes parâmetros. Como na realização destes experimentos o

termopar foi destruído, a temperatura só foi mapeada até o pico, sendo desconsiderados os valores a partir da queda.

Tabela 4: Dados de entrada

Passe de tempo (s)	0,2
Número de passes de tempo	21
Temperatura inicial (°C)	25
Condutividade Térmica (W/mK)	60,4
Difusividade Térmica (m ² /s)	17,7E-6
Coeficiente convectivo (W/m ² K)	1E-6
Velocidade do rebolo (m/s)	12E-3

Fonte: Autor

Utilizando uma malha de 110x26 elementos, os resultados são mostrados na Fig. 17 juntamente com os dados experimentais. Como podemos perceber a aproximação é boa, confirmando a validação destes resultados.

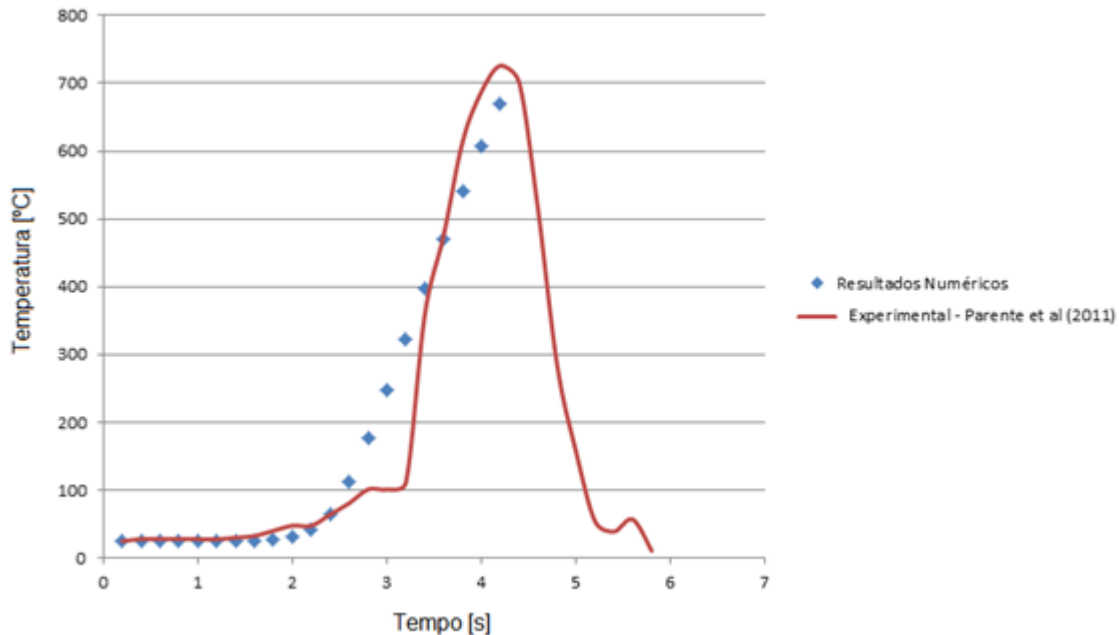


Figura 17: Dados experimentais e teóricos, fonte: Autor

Na sequência, simulou-se o experimento foi realizado para o mesmo rebolo anterior, o A60, porém com o termopar fixado a 0,17 mm da superfície usinada. Os dados de entrada se encontram na Tab. 5.

Tabela 5: Dados de entrada

Passe de tempo (s)	0,2
Número de passes de tempo	21
Temperatura inicial (°C)	25
Condutividade Térmica (W/mK)	60,4
Difusividade Térmica (m ² /s)	17,7E-6
Coeficiente convectivo (W/m ² K)	1E-6
Velocidade do rebolo (m/s)	12E-3

Fonte: Autor

Nesta simulação, tanto o procedimento quanto a malha numérica utilizada são idênticos ao da simulação anterior. A comparação entre os dados experimentais e os resultados obtidos numericamente é mostrada na Fig. 18. A convergência menor se deve, provavelmente, pela maior sensibilidade desta medição, já que o termopar se encontra bem mais próximo da superfície usinada que no caso anterior. Porém isso não inviabiliza a validação dos dados.

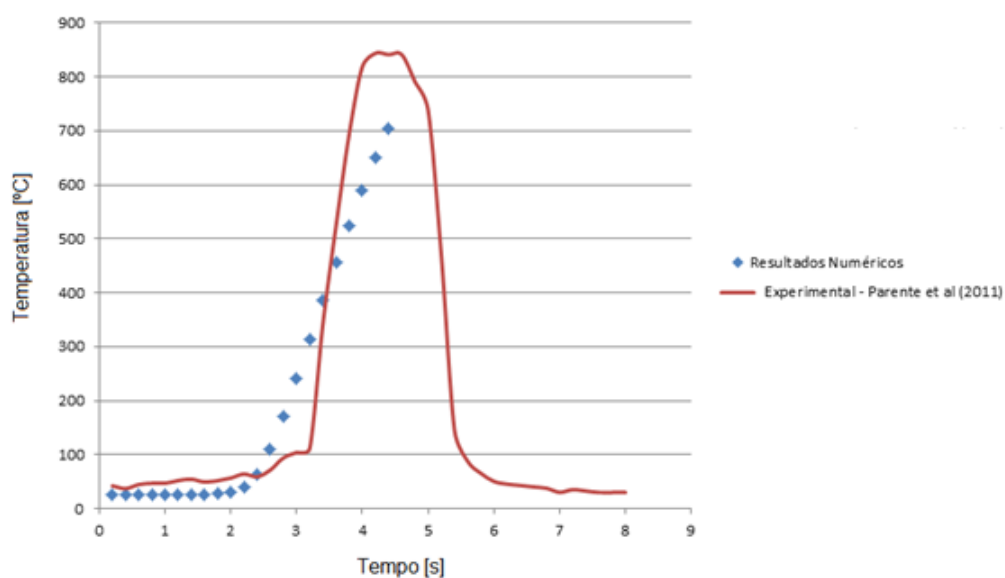


Figura 18: Dados experimentais e teóricos, fonte: Autor

Seguindo a análise do mesmo artigo agora apresenta-se os resultados para o rebolo B60, conforme artigo do item 4. A primeira análise foi realizada para o termopar em uma profundidade de 0,25 mm da superfície e no caso, os mesmo procedimentos de análise e obtenção de dados foi aplicado, tendo assim na Tab. 6 os dados de entrada.

Tabela 6: Dados de entrada

Passe de tempo (s)	0,2
Número de passes de tempo	20
Temperatura inicial (°C)	25
Condutividade Térmica (W/mK)	60,4
Difusividade Térmica (m ² /s)	17,7E-6
Coefficiente convectivo (W/m ² K)	1E-6
Velocidade do rebolo (m/s)	12E-3

Fonte: Autor

Assim, tem-se a comparação dos dados teóricos e experimentais na Fig. 19 e podemos perceber-se que a convergência acontece de maneira bastante satisfatória.

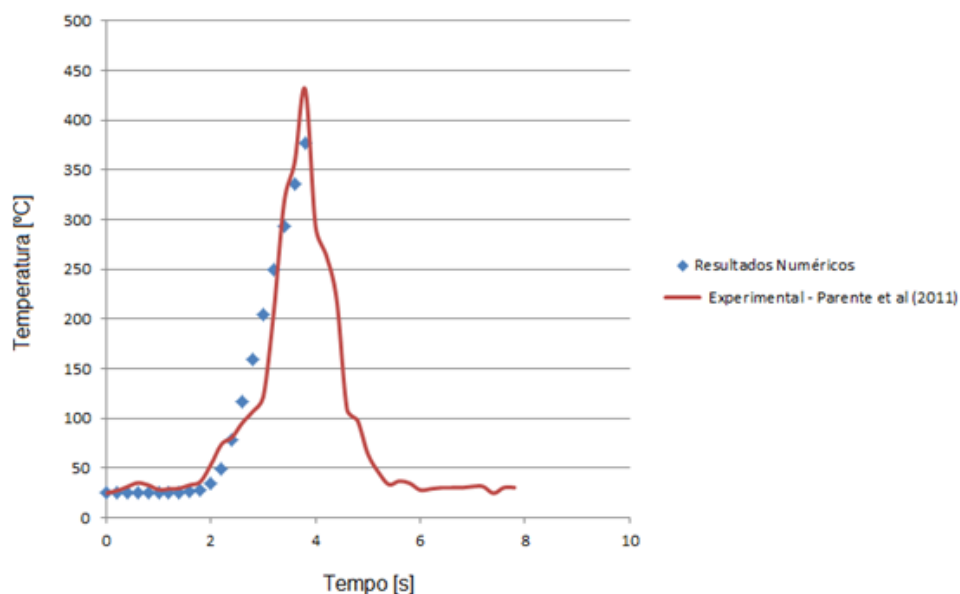


Figura 19: Dados experimentais e teóricos, fonte: Autor

E, por fim, a última análise do presente trabalho é para o rebolo B60 com o tempo a uma profundidade de 1,0 mm. Os dados de entrada estão dispostos na Tab. 7.

Tabela 7: Dados de entrada

Passe de tempo (s)	0,2
Número de passes de tempo	20
Temperatura inicial (°C)	25
Condutividade Térmica (W/mK)	60,4
Difusividade Térmica (m ² /s)	17,7E-6
Coeficiente convectivo (W/m ² K)	1E-6
Velocidade do rebolo (m/s)	12E-3

Fonte: Autor

Assim, temos a comparação dos dados teóricos e experimentais na Fig. 20. Podemos perceber que a convergência também ocorre de forma satisfatória.

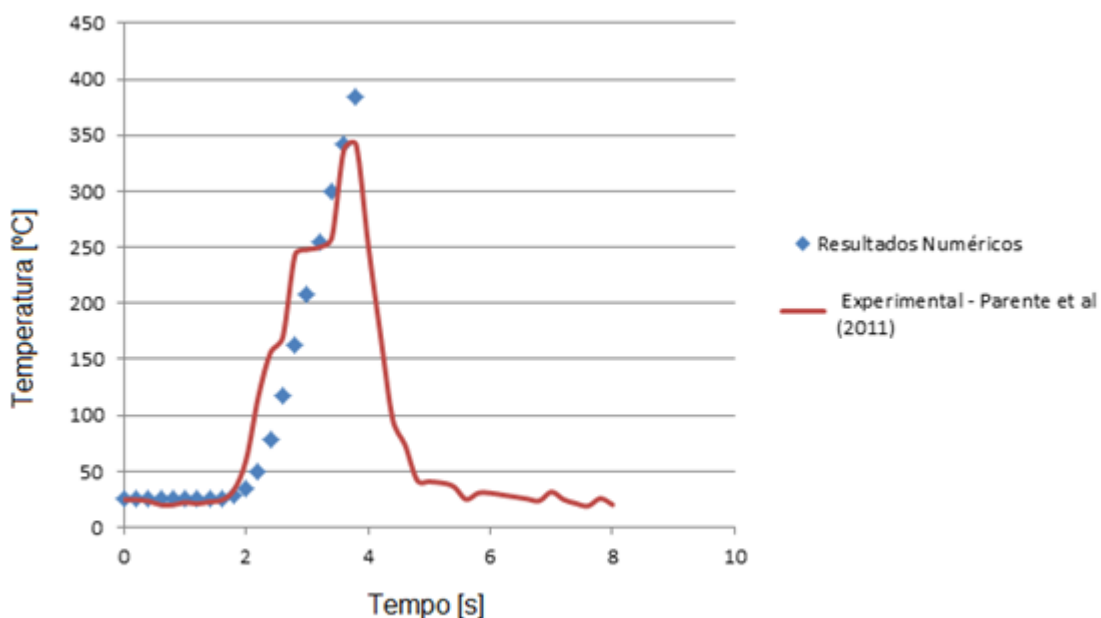


Figura 20: Dados experimentais e teóricos, fonte: Autor

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram realizadas simulações numéricas do processo de retificação baseadas nos experimentos realizados por Garcia et al. (2014) e Parente et al. (2011). Do ponto de vista teórico, as curvas obtidas com o código computacional utilizado, embora não tenham apresentado uma convergência perfeita, ficaram suficientemente próximas dos dados experimentais, sendo, portanto, possível se considerar o código utilizado como validado para estes casos.

Do ponto de vista tecnológico, embora o presente trabalho não tenha apresentado nenhuma contribuição direta para o desenvolvimento de novas técnicas na análise de problemas inversos em transferência de calor para processos de retificação, o mesmo reafirma a validade desta técnica relativamente simples, na abordagem de um problema tão complexo e de grande aplicabilidade.

O passo a passo apresentado no item 5, fornece uma referência rápida para o leitor interessado em iniciar seus estudos nesta área, possibilitando assim um bom ponto de partida para o mesmo e ajudando a reduzir as dificuldades as quais ele estará sujeito.

REFERÊNCIA

ÇENGEL, Yunus A.. **Transferência de calor e massa**. São Paulo, McGraw-Hill, 2009.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo, Artiber Editora, 2008

FERRARESI, Dino. **Usinagem dos materiais**. São Paulo, Editora Edgar Blucher Ltda, 1970.

FERZIGER, Joel H.; PERIC, Milovan. **Computational methods for fluid dynamics**. Nova Iorque, Editora Springer, 2002.

GÂMBIO, Sérgio Luiz. **Proposta de otimização de processos de fabricação de peças cilíndricas por meio de tempera por retificação**. Disponível em < <http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/retificacao.asp> > , acesso em 18/07/2014.

GARCIA, Eduardo; MÈRESSE, Damien; POMBO, Iñigo; HARMAND, Souad; SÁNCHEZ, Jose Antonio. **Identification of heat partition in grinding related to process parameters, using the inverse heat flux conduction model**. 2014.

INCROPERA, Frank P.; DEWIT, David P.; BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S.. **Fundamentos da transferência de calor e massa**. Rio de Janeiro, LTC, 2012.

JIN, T.; STEPHENSON, D.J.. **Heat flux distributions and convective heat transfer in deep grinding**. 2006.

KIM, Hae-Ji; KIM; Nam-Kyung; KWAK, Jae-Seob. **Heat flux distribution model by sequential algorithm of inverse heat for determining work piece temperature in creep feed grinding**. 2006.

KREITH, Frank; BOHN, Mark S.. **Princípios de transferência de calor**. São Paulo, Pioneira Thomson Learning Ltda, 2003.

KUO, Wen Liang; LIN, Jen Fin. **General temperature rise solution for a moving plane heat source problem in surface grinding**. 2006.

MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira; SILVA, Márcio Bacci da. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo, Editora Edgar Blucher Ltda, 2011.

MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO. **Método da Seção Áurea**. Pg 46 à 48.
Disponível em:
<http://www.tede.udesc.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=2123>.

ÖZISIK, M. Necati; ORLANDE, Helcio R. B..**Inverse Heat Transfer**. Nova Iorque, Taylor & Francis, 2000.

PARENTE, Marcos Paulo Lages; JORGE, Renato M. Natal; VIEIRA, A. Aguiar; BAPTISTA, A. Monteiro. **Experimental and numerical study of the temperature field during creep feed grinding**. 2011.