

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Aline Lopes Telles Lino**  
**Alice Campos Lemos**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA TÉRMICA DOS REVESTIMENTOS EM  
FERRAMENTAS DE CORTE POR MEIO DA ANÁLISE NUMÉRICA  
UTILIZANDO O PROGRAMA *COMSOL***

**UBERLÂNDIA**  
**2019**

**Aline Lopes Telles Lino**

**Alice Campos Lemos**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA TÉRMICA DOS REVESTIMENTOS EM  
FERRAMENTAS DE CORTE POR MEIO DA ANÁLISE NUMÉRICA  
UTILIZANDO O PROGRAMA *COMSOL***

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gilmar Guimarães

**UBERLÂNDIA**

**2019**

**Aline Lopes Telles Lino**

**Alice Campos Lemos**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA TÉRMICA DOS REVESTIMENTOS EM  
FERRAMENTAS DE CORTE POR MEIO DA ANÁLISE NUMÉRICA  
UTILIZANDO O PROGRAMA *COMSOL***

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gilmar Guimarães

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Gilmar Guimarães – FEMEC – UFU – Orientador

---

Profª. Dra. Priscila Ferreira Barbosa de Sousa – UFU

---

Prof. M. Eng. - José Aguiar dos Santos Junior – UFS

**UBERLÂNDIA, 12 de Dezembro de 2019**

Dedico este trabalho à minha família e amigos, que sempre me apoiaram. Sem  
vocês nada disto seria possível.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, principalmente minha mãe Andrea e meus avôs maternos, pelo total suporte, paciência e compreensão durante toda esta jornada. Vocês me ensinaram o que é carinho e amor. Não consigo colocar em palavras toda a admiração e gratidão que sinto.

Agradeço aos meus amigos, que sempre acreditaram em mim, me dão conforto e me trazem alegria, mesmo nos momentos mais desesperadores. Principalmente a minha amiga Lucilla por estar presente quando mais precisei. E o Rafael, que sem sua ajuda eu nunca teria finalizado este trabalho a tempo.

Gostaria de agradecer também a Mariana, a pessoa mais incrível que já conheci, por sempre estar comigo apesar de todas as adversidades. Você me faz acreditar que tudo é possível sempre me dá força pra seguir em frente.

Não posso deixar de agradecer ao meu orientador Gilmar, que com sua calma, atenção e exemplo nunca deixou de me motivar, e originou a ideia deste projeto.

Agradeço à equipe do LTCME por todo apoio e dedicação para que este projeto fosse possível.

Aos demais colegas, professores e técnicos administrativos da UFU – Universidade Federal de Uberlândia, e a todos os outros que não foram aqui citados, mas que de alguma forma influenciaram na realização deste estudo, obrigada!

*“Que nada nos defina, que nada nos sujeite. Que a liberdade seja nossa própria substância, já que viver é ser livre”*

(Simone de Beauvoir)

## RESUMO

Nos processos de usinagem de metais, altas temperaturas, as quais possuem grande influência no controle da taxa de remoção de material e no atrito entre cavaco e ferramenta, são geradas na interface cavaco-ferramenta. Desta forma, tem-se como objetivo deste trabalho analisar os efeitos térmicos dos revestimentos em uma ferramenta de metal duro durante o processo de usinagem, neste caso o torneamento, por meio do *COMSOL* (# *COMSOL 4.3b NSL License No: 9100056 Windows/Mac*). Foi desenvolvido um modelo térmico unidimensional transiente que considera a ferramenta de corte e o seu revestimento, dado pela equação de difusão do calor e resolvido pelo *COMSOL*. As condições de contorno adotadas para o modelo são fluxo de calor prescrito na interface de contato cavaco-ferramenta e isolamento na face oposta. O material utilizado para revestimento foi o nitreto de titânio (TiN). As temperaturas na interface cavaco-ferramenta para ferramenta sem e com revestimento foram obtidas. Para espessuras na ordem de micrometro não se pode tirar conclusões, entretanto para espessuras em centímetros os resultados foram satisfatórios.

**Palavras-chave:** *COMSOL*, ferramenta de corte, revestimento, transferência de calor

## ABSTRACT

In metal machining processes high temperatures, which have great influence on the control of the material removal rate and on the friction between chip and tool, are generated at the chip-tool interface. Therefore, the objective of this work is to analyze the thermal effects of the coatings on a carbide tool during the machining process, in this case turning, by means of *COMSOL* (# *COMSOL 4.3b NSL License No: 9100056 Windows/Mac*). It was developed a one-dimensional transient thermal model that considers the cutting tool and its coating, given by the heat diffusion equation and solved by *COMSOL*. The boundary conditions adopted for the model is heat flow prescribed in the chip-tool contact interface. The material used for coating is titanium nitride (TiN). The temperatures at the chip-tool interface for the tool without and with coating were obtained. For thicknesses in the order of micrometer no conclusions can be drawn, however, for thicknesses in the order of centimeters the results were satisfactory.

**Keywords:** coating, *COMSOL*, cutting tool, heat transfer

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Problema térmico: placa plana, com duas camadas, submetidas a um fluxo de calor em $x = 0$ e a condição de isolamento térmico na superfície oposta, $x = L$ ...	30
Figura 2 – Representação da geometria do problema no <i>COMSOL</i> .....	33
Figura 3 – Fluxo de calor pulso triangular. ....	34
Figura 4 – Geometria utilizada na simulação do <i>ANSYS</i> .....	35
Figura 5 – Análise de resultados obtidos entre a simulação numérica e analítica de Oliveira (2019).....	40
Figura 6 – Diferença de temperatura entre a resolução analítica e numérica de Oliveira (2019).....	40
Figura 7 – Convergência de malha em $x = 0$ .....	41
Figura 8 – Convergência de malha em $x = 0$ , em detalhe .....	42
Figura 9 – Convergência de malha em $x = b$ em detalhe. ....	43
Figura 10 – Convergência do passo de tempo em $x = 0$ .....	44
Figura 11 – Convergência do passo de tempo em $x = b$ .....	44
Figura 12 – Convergência do passo de tempo em $x = 0$ – detalhe. ....	45
Figura 13 – Convergência do passo de tempo em $x = b$ – detalhe. ....	45
Figura 14 – Comparação das simulações do <i>ANSYS</i> e <i>COMSOL</i> .....	46
Figura 15 – Diferença entre as temperaturas calculadas pelos softwares <i>COMSOL</i> e <i>ANSYS</i> . ....	47
Figura 16 – Temperatura em $x = 0$ usando softwares <i>COMSOL</i> e <i>ANSYS</i> . ....	48
Figura 17 – Temperatura na ferramenta revestida A e na ferramenta sem revestimento B. ....	49
Figura 18 – Temperatura ao longo de $x$ em $t = 300$ [s] para diferentes espessuras de revestimento. ....	50
Figura 19 – Detalhe da temperatura ao longo de $x$ em $t = 300$ [s] para diferentes espessuras de revestimentos. ....	50
Figura 20 – Temperatura ao longo de $x$ em $t = 300$ [s] para diferentes espessuras de revestimento. ....	53
Figura 21 – Interface <i>COMSOL</i> : selecionar a dimensão espacial do problema .....	63
Figura 22 – Interface <i>COMSOL</i> : etapa de selecionar a física do problema .....	64
Figura 23 – Interface <i>COMSOL</i> : etapa de selecionar o tipo de estudo.....	65
Figura 24 – Interface <i>COMSOL</i> : Definir a geometria do problema.....	66

Figura 25 – Interface <i>COMSOL</i> : Definir a geometria do problema – modificando o comprimento do modelo .....	66
Figura 26 – Interface <i>COMSOL</i> : Definir a geometria do problema – modificando o comprimento da camada .....	67
Figura 27 – Interface <i>COMSOL</i> : Adicionar o material .....	67
Figura 28 – Interface <i>COMSOL</i> : Adicionar as propriedades do material .....	68
Figura 29 – Interface <i>COMSOL</i> : Inserir o fluxo de calor.....	69
Figura 30 – Interface <i>COMSOL</i> : Inserir o valor do fluxo de calor.....	69
Figura 31 – Interface <i>COMSOL</i> : Inserir temperatura inicial.....	70
Figura 32 – Interface <i>COMSOL</i> : Definir superfícies isoladas termicamente.....	71
Figura 33 – Interface <i>COMSOL</i> : Definição da malha .....	72
Figura 34 – Interface <i>COMSOL</i> : Definir o tamanho dos elementos da malha.....	73
Figura 35 – Interface <i>COMSOL</i> : Definir o passo de tempo .....	74
Figura 36– Interface <i>COMSOL</i> : Calcular os resultados .....	74
Figura 37– Interface <i>COMSOL</i> : Resultados.....	75
Figura 38 – Interface <i>COMSOL</i> : Criar 1D plot group.....	76
Figura 39 – Interface <i>COMSOL</i> : Criar Cut point 1D para selecionar os pontos que aparecerão no gráfico.....	77
Figura 40 – Interface <i>COMSOL</i> : Definir a coordenada do Cut point 1D.....	78
Figura 41 – Interface <i>COMSOL</i> : Criar Point Graph.....	79
Figura 42 – Interface <i>COMSOL</i> : Selecionar os pontos que aparecerão no gráfico e plotar o gráfico .....	80

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 1. Comparação da temperatura na ferramenta de corte em $x = b$ . .....	51
Tabela 2. Comparação da temperatura na ferramenta de corte. ....	51

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>14</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	14
1.2 OBJETIVOS.....	16
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>18</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
2.1 TEMPERATURA NA USINAGEM.....	18
2.2 MÉTODOS DE MEDIÇÃO .....	20
2.2.1 <i>Termopar</i> .....	20
2.2.2 <i>Radiação térmica</i> .....	21
2.2.3 <i>Técnicas diretas</i> .....	22
2.2.3.1 <i>Análise Analítica</i> .....	22
2.2.3.2 <i>Análise Numérica</i> .....	23
2.2.4 <i>Técnicas inversas</i> .....	24
2.3 REVESTIMENTO DE FERRAMENTAS .....	25
2.4 ESTUDOS TÉRMICOS UTILIZANDO O <i>COMSOL</i> .....	27
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>29</b>
<b>3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS E METODOLOGIA .....</b>	<b>29</b>
3.1 PROBLEMA TÉRMICO .....	29
3.2 SOLUÇÃO NUMÉRICA.....	31
3.2.1 <i>Simulações no COMSOL</i> .....	31
3.2.2 <i>Modelo térmico unidimensional ferramenta de cobre</i> .....	32
3.2.3 <i>Modelo térmico unidimensional ferramenta de metal duro e revestimento de nitreto de titânio</i> .....	34
3.2.4 <i>Análise da espessura do revestimento</i> .....	35

3.2.5	<i>Definição do passo de tempo</i> .....	36
3.2.6	<i>Estudo do refinamento da malha</i> .....	37
3.2.7	<i>Comparação dos resultados</i> .....	37
<b>CAPÍTULO IV</b>	.....	<b>39</b>
<b>4 ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	.....	<b>39</b>
4.1	MODELO TÉRMICO 1D DUPLA CAMADA DE COBRE .....	39
4.2	MODELO TÉRMICO 1D DUPLA CAMADA: METAL DURO E NITRETO DE TITÂNIO .....	41
4.3	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO NA FERRAMENTA DE CORTE CONSIDERANDO GRANDES ESCALAS (CENTÍMETROS).....	48
4.4	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA, EM MICRÔMETROS, DO REVESTIMENTO NA FERRAMENTA DE CORTE .....	52
<b>CAPÍTULO V</b>	.....	<b>54</b>
<b>5 CONCLUSÃO</b>	.....	<b>54</b>
<b>CAPÍTULO VI</b>	.....	<b>55</b>
<b>6 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	.....	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	.....	<b>56</b>
<b>ANEXO A – PASSO A PASSO PARA REALIZAR AS SIMULAÇÕES NO COMSOL</b>		<b>63</b>
A.1	DEFINIR A DIMENSÃO ESPACIAL DO PROBLEMA: .....	63
A.2	DEFINIR A FÍSICA DO PROBLEMA:.....	64
A.3	SELECIONAR O TIPO DE ESTUDO:.....	65
A.4	DEFINIR A GEOMETRIA DO PROBLEMA:.....	65
A.5	ADICIONAR OS MATERIAIS E SUAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS: .....	67
A.6	INSERIR OS DADOS DE FLUXO DE CALOR, TEMPERATURA INICIAL E AS SUPERFÍCIES ISOLADAS. ....	68
A.7	DEFINIR A MALHA:.....	71

A.8 DEFINIR PASSO DE TEMPO: .....	73
A.9 CALCULAR OS RESULTADOS:.....	74

# CAPÍTULO I

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Segundo a norma DIN 8580, a definição de usinagem se aplica a todos os processos de fabricação no qual ocorre a remoção de material sob a forma de cavaco. Dessa forma, usinagem é uma operação que confere à peça: forma, dimensões ou acabamento superficial, ou ainda a combinação destes através da remoção de material sob a forma de cavaco. Esta remoção de material ocorre através da interferência entre ferramenta e peça, sendo a ferramenta constituída de um material de dureza e resistência superior a do material da peça.

A usinagem é, reconhecidamente, o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais e empregando dezenas de milhões de pessoas (TRENT, 1984). No processo de usinagem, a energia é convertida em calor devido à deformação plástica, que acontece na superfície da peça, e ao atrito que existe entre a ferramenta e a peça de trabalho (SANTOS et al., 2014). Em conformidade, Carvalho et al. (2006) afirmam que, durante o processo de corte, a energia mecânica é convertida em calor devido à deformação plástica formada entre o plano de cisalhamento primário e a interface da ferramenta.

Santos et al. (2014) relataram que altas temperaturas provocam, na parte delimitada pela aresta de corte, grande influência na taxa de desgaste da ferramenta de corte e na vida útil da ferramenta utilizada, devido ao aumento da área de contato da ferramenta e à taxa de deformação, o que provoca o aumento da energia. Por causa do calor gerado na interface cavaco-ferramenta-peça, a difusão possui um papel relevante no desempenho das ferramentas e, conseqüentemente, no processo de usinagem. O mecanismo da difusão envolve a transferência de átomos de um material para outro e é extremamente vinculado

ao tempo, à temperatura, à solubilidade dos materiais envolvidos na zona de fluxo, que é a zona de cisalhamento secundário (HUANG, 2007). Segundo Trent e Wright (2000), no processo de usinagem, as velocidades relativas entre ferramenta-peça ou ferramenta-cavaco são elevadas e o tempo de contato, entre esses materiais, é muito reduzido, o que poderia desconsiderar o mecanismo de difusão. Entretanto, existe a zona de aderência na interface cavaco-ferramenta, o que faz com que o mecanismo de difusão seja considerado.

Com o aumento da demanda do mercado, maiores velocidades de cortes e taxas de avanços são usadas nos processos de usinagem para obter aumento da produtividade. Utilizando maiores velocidades de corte e maiores taxas de avanço, maior a quantidade de calor é gerado durante o processo, prejudicando assim o desempenho da ferramenta de corte (TRENT e WRIGHT, 2000). Muitos dos problemas técnicos e econômicos do processo de usinagem estão relacionados, de forma direta ou indireta, à geração de calor. O reconhecimento da entrada de calor caracteriza um aspecto relevante na otimização do processo (RIBEIRO et al., 2018).

No processo de usinagem, por torneamento, grande parte da energia fornecida é convertida em calor, visto que a maior parte da energia é dissipada pelo cavaco. Existe grande dificuldade experimental em se medir o valor da energia gerada neste processo devido ao contato direto entre a peça e a ferramenta (CARVALHO, 2005).

Visando o aumento da vida útil das ferramentas de corte, nos dias atuais, essas têm sido revestidas com materiais que tenham características de isolantes térmicos e que proporcionem um menor desgaste por atrito. O isolamento térmico faz com que maior parte do calor gerado durante o processo vá para o cavaco ao mesmo tempo em que reduz desgaste da ferramenta aumentando sua vida útil, ampliando, portanto, a produtividade do processo (FERREIRA, 2007).

A determinação da temperatura de corte, durante a usinagem, é um dos fatores mais importantes para que se possa compreender o desempenho da ferramenta. Entretanto, mesmo possuindo condições simples de corte, devido ao movimento da peça e à difícil região de acesso, determinar a temperatura na interface cavaco-ferramenta não é fácil. Dessa forma, é importante desenvolver métodos eficientes e capazes de determinar essa temperatura (TRENT; WRIGHT, 2000). Em concordância, Casto et al. (1994) afirmam que

medir a temperatura, durante o corte, é o fator mais importante na investigação do uso de ferramentas, o que possibilita controlar os aspectos que interferem no processo, na vida e no desgaste das ferramentas. A temperatura possui influência, também, sobre a precisão da máquina e a rugosidade superficial do acabamento (KLOCKE e EISENBLÄTTER, 1997 *apud* BORELLI, et al., 2000).

As elevadas temperaturas do processo de usinagem interferem, de maneira controladora, na taxa de desgaste da ferramenta de corte e no atrito entre o cavaco e a ferramenta. Entretanto, é difícil elaborar a medição direta da temperatura utilizando sensores do tipo contato na interface ferramenta-trabalho, devido ao movimento da peça e à presença do cavaco. Realizar a medição com métodos convencionais (pirômetro infravermelho, termopar embutido e termopar de ferramenta), normalmente, manifesta problemas (CARVALHO et al., 2009).

## 1.2 OBJETIVOS

A maioria das simulações realizadas acontece em ferramentas de corte sem revestimento. Porém, atualmente, pode-se considerar ferramentas de corte revestidas, com uma ou múltiplas camadas de revestimento, nos quais os métodos numéricos têm grande aplicabilidade devido ao elevado custo dos testes experimentais e à falta de equipamentos adequados.

Este trabalho tem como objetivo estudar a influência térmica dos revestimentos em ferramenta de corte de metal duro. Em um modelo numérico unidimensional da ferramenta de corte, o revestimento é modelado como uma fina camada na escala de centímetros e posteriormente em micrometros posicionada na parte superior da mesma. O fluxo de calor será imposto com dados da literatura. Com as condições de contorno definidas e o fluxo de calor conhecido, as equações que regem o problema são resolvidas e o campo de temperatura na ferramenta de corte é determinado.

Os objetivos específicos deste projeto são:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o tema proposto;

- Desenvolver o modelo numérico e estabelecer os parâmetros como: fluxo de calor, condições de contorno, propriedade dos materiais e determinação da malha para determinar o campo de temperatura na ferramenta de corte;
- Validar o modelo térmico com a literatura e outra simulação numérica;
- Com o modelo validado será realizado o estudo da influência da espessura do revestimento na ferramenta de corte.

## CAPÍTULO II

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre trabalhos relacionados à análise térmica durante a usinagem e métodos de se analisar a distribuição de temperatura nas ferramentas de corte. Apresentam-se algumas propriedades dos revestimentos e por último, trabalhos que usam o software *COMSOL* na solução de problemas térmicos.

#### 2.1 TEMPERATURA NA USINAGEM

O estudo da temperatura na ferramenta, durante o processo de usinagem de metais, vem sendo um dos maiores interesses dos cientistas, desde quando se iniciaram as pesquisas científicas nesta área de estudo. O primeiro trabalho documentado foi realizado por Thompson (1798) que avaliou a equivalência mecânica do calor durante o processo de furação de uma amostra de latão. Esse estudo significou o ponto inicial para se considerar os aspectos térmicos nos processos de usinagem.

A quantidade de calor conduzida para a ferramenta é pequena, entre 8 a 10% da taxa total de calor, entretanto é suficiente para gerar altas temperaturas próximas às arestas de corte, podendo atingir 1100 °C (CARVALHO et al., 2006). Devido às elevadas temperaturas, existe um impacto negativo na vida útil das ferramentas utilizadas nos processos de usinagem, tornando-a mais vulnerável, o que a desgasta mais rapidamente (CARVALHO et al., 2004). Além dessas consequências negativas, surge a baixa integridade da superfície da peça, o que poderá prejudicar a produtividade (CARVALHO et al., 2006).

Os aspectos geradores de calor, no processo de usinagem, são as deformações e o cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento, o atrito do cavaco com a ferramenta e o

atrimento da ferramenta com a peça. As porcentagens do calor total, devido a cada uma das fontes acima, variam com o tipo de usinagem, o material da peça e da ferramenta, as condições de usinagem e a forma da ferramenta. Porém, em uma primeira aproximação, pode-se dizer que a deformação e o cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento são as principais fontes geradoras de calor, seguidas pelo atrito do cavaco com a superfície de saída da ferramenta e depois pelo atrito peça-superfície de folga da ferramenta (DINIZ et al., 2000).

O calor produzido na área de contato entre a peça e a ferramenta de corte é um parâmetro que possibilita medir o desempenho da ferramenta, durante o processo de usinagem. A constante necessidade de aumentar as velocidades de corte, em processos de usinagem de alto desempenho, tem incentivado estudos de novos materiais resistentes a elevadas temperaturas, assim como, pesquisas sobre a maximização da taxa de remoção de material (D'ERRICO, 1998 *apud* BORELLI et al., 2000).

Segundo Boothroyd e Knight (1989), toda a energia necessária para a deformação do metal é transformada em calor, em decorrência de uma deformação elástica, a energia consumida no material é armazenada na forma de energia de deformação e não há geração de calor, mas quando ocorre a deformação plástica, que é a principal deformação na usinagem, a energia necessária para essa deformação é convertida em calor.

Segundo Caputo (2016), a taxa de remoção do material está evidentemente ligada ao custo de usinagem, que pode ser alterada variando a velocidade de corte ( $V_c$ ) ou o avanço ( $f$ ). Ao aumentar a velocidade de corte e/ou o avanço aumenta-se esta taxa de remoção e, conseqüentemente, o custo de usinagem também diminui. Porém esse aumento é limitado, pois ao atingir certo limite, a vida da ferramenta reduz drasticamente. O corte da maioria dos materiais gera um grande aquecimento da ferramenta, que pode implodir em um curto intervalo de tempo.

A temperatura pode, se for alta o suficiente, interferir na dureza da ferramenta e, por essa razão, é importante conhecer tanto a temperatura quanto as propriedades de resistência ao calor da ferramenta, sua dureza a quente. A temperatura também pode afetar as várias propriedades físicas que constituem a usinabilidade do material de trabalho (HERBERT, 1926).

É importante compreender quais fatores influenciam a geração de calor, bem como, quais maneiras os fluxos de calor e as temperaturas são distribuídos na ferramenta e na peça, próximo à aresta cortante (MACHADO et al., 2009). Porém, a determinação da temperatura e da distribuição de temperatura na região de importância vital, próxima à aresta de corte, é tecnicamente difícil, e o progresso tem sido lento em mais de 100 anos desde que o problema foi claramente identificado (TRENT e WRIGHT, 2000).

## 2.2 MÉTODOS DE MEDIÇÃO

### 2.2.1 Termopar

Existem alguns métodos experimentais para a obtenção da temperatura na interface de corte. Como, por exemplo, o termopar, o qual permitiu a primeira determinação precisa e quantitativa da temperatura nos processos de usinagem realizado por Shore (1925), Gottwein (1925) e Herbert (1926) (FERREIRA, 2017). Para a medição de temperatura, o método termopar-ferramenta é uma ótima opção para medir a temperatura média da interface de corte, apesar de ser uma técnica limitada a ferramentas que conduzam eletricidade e de não medir a temperatura em um ponto específico, apenas uma temperatura média na zona afetada pelo calor entre a ferramenta e a peça de trabalho (RIBEIRO et al., 2018).

Esse método leva em consideração o efeito termopar na interface ferramenta-peça, isto é, se na junção de dois materiais condutores diferentes existe uma variação de temperatura então é gerada uma diferença de potencial elétrico que é proporcional a essa temperatura. A diferença de potencial pode ser amplificada e os valores medidos podem ser convertidos em leituras de temperatura. Assim, fazendo o uso deste princípio, considera-se a junção ferramenta-peça como um par termoelétrico (interface de corte). A variação de temperatura, que é devida ao calor gerado na região de contato entre esses dois materiais durante o processo de usinagem, é então obtida por meio da conversão do sinal elétrico medido.

Apesar de ser um método simples, possui algumas particularidades que devem ser consideradas durante a utilização e montagem, podendo citar o aspecto de que o par ferramenta-peça deve ser sempre formado por materiais condutores de eletricidade – ferramentas feitas de cerâmica e peças de materiais não metálicos não podem ser utilizadas; outro aspecto é a temperatura medida, que sempre indicará uma média das temperaturas que aconteceram na região de corte, isso porque o contato da ferramenta com o cavaco não é estável, há picos e vales nesta área, a junção quente pode ser considerada como um termopar finito com um número infinitamente grande de fontes interligadas num circuito em paralelo (CARVALHO, 2005).

Shaw (1984) e Stephenson (1991) utilizaram a técnica do efeito termopar ferramenta peça. No entanto, nessa técnica apenas valores médios para a temperatura puderam ser obtidos.

### **2.2.2 Radiação térmica**

Como todo corpo com temperatura prescrita emite certa quantidade de radiação é possível medi-la e relacioná-la em uma escala de temperatura. A ferramenta aquecida é exposta a um sensor óptico denominado pirômetro, o qual recebe a radiação e gera uma força eletromotriz que é detectada por um milivoltímetro. Desta forma, os resultados medidos são relacionados a uma escala de temperatura, fornecendo então a temperatura na área focalizada. Os valores obtidos são médios e não pontuais, além disso, é necessário conhecer a emissividade da superfície analisada o que inviabiliza utilizar esse método se a emissividade da ferramenta variar com a variação de temperatura. Eu-Genes em 1995 utilizou este método em processos de torneamento.

Essa técnica possibilita estabelecer a temperatura de corte baseando-se na radiação térmica que é emitida na zona de corte, o que quer dizer que, ao saber que todo corpo aquecido emite certa quantidade de radiação pode-se medi-la e relacioná-la em uma escala de temperatura. (CARVALHO, 2005).

### 2.2.3 Técnicas diretas

Uma forma para estudar o problema da transferência de calor é assumir um fluxo de calor conhecido e calcular a temperatura na interface da ferramenta, onde ocorre a difusão de calor. Essa técnica é conhecida na literatura como direta (SANTOS et al., 2014). A estimativa direta é muito difícil, visto que o único fragmento do calor gerado vai para a peça de trabalho, na medida em que o restante do calor será dissipado para a ferramenta e o ambiente (RIBEIRO et al., 2018).

De acordo com Velho (2001), há dois tipos de problemas: os diretos e os inversos. Nos problemas diretos, ou bem-postos, é necessário o conhecimento completo das causas para se determinar os efeitos e três condições são cumpridas:

- Existe uma solução;
- Ela é única;
- A solução tem uma dependência contínua (suave) com os dados de entrada.

Na área térmica, esse tipo de problema poderia ser resolvido utilizando análise numérica ou analítica para determinar a distribuição da temperatura, solucionando a equação da difusão ao considerar a fonte de calor conhecida.

Entretanto, durante a usinagem, o fluxo de calor experimental é desconhecido e técnicas inversas devem ser utilizadas para prever esse parâmetro (SANTOS et al., 2014).

#### 2.2.3.1 Análise Analítica

A questão térmica que envolve o processo de usinagem, por torneamento, pode ser modelada analiticamente. Para isso, é necessário determinar o domínio no qual o problema térmico será representado por meio da equação da difusão de calor. As abordagens podem ser unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais. Em todas é necessário que se faça um estudo das condições de contorno do domínio e da forma geométrica do corpo analisado (CARVALHO, 2005).

Porém, na usinagem, não é possível determinar condições de contorno de maneira direta, tornando complexo um modelo analítico fiel ao real. Algumas simplificações podem ser realizadas como: desprezar as trocas convectivas com o meio ambiente, simplificar a geometria da ferramenta, determinar o fluxo de calor empiricamente. No trabalho de Young & Chou (1994) obteve-se a temperatura na interface cavaco-ferramenta através de um modelo analítico unidimensional, escolhendo o cavaco como domínio. O fluxo de calor na interface cavaco-ferramenta foi calculado em função da força de corte. Aspectos geométricos do cavaco na distribuição da temperatura também foram analisados.

Kashani, et al., (2016) propuseram um modelo analítico para determinar o campo de temperatura na usinagem assistida a laser. Para isso foi considerado um cilindro rotativo sujeito a uma fonte de calor localizada e temperatura em pontos específicos e aplicada à função de Green apropriada. O resultado foi comparado com os dados experimentais de um pirômetro infravermelho.

#### 2.2.3.2 Análise Numérica

Na usinagem, é difícil fazer uma análise analítica, por isso muitos pesquisadores utilizam a análise numérica com o auxílio de softwares comerciais ou ainda códigos de programação desenvolvidos pelos pesquisadores. Alguns pesquisadores utilizam então a análise numérica para resolver o problema direto, como Santos (2008), que propôs um modelo utilizando o método dos volumes finitos inteiros com formulação implícita e malha irregular com o objetivo de determinar a distribuição de temperatura em uma ferramenta de corte retangular. Ribeiro et al., (2013) também utilizou a análise numérica, e com as devidas condições de contorno resolveu as equações diferenciais com o auxílio do software comercial *ANSYS CFX*® por meio de volumes finitos.

Para obter a variação temporal do perfil tridimensional de temperatura de uma ferramenta de corte durante o torneamento, Silva et al., (2014) aplicou ao problema de condução de calor tridimensional o método de diferenças finitas. Algumas simplificações foram feitas como: a ferramenta de corte é um paralelepípedo ideal, o material é

homogêneo, o quebra cavaco foi desconsiderado e todas as superfícies perdem calor convectivo por causa do fluido refrigerante, a ferramenta recebe o fluxo de calor em um espaço definido e não há variação das propriedades termofísicas da ferramenta com a temperatura. A solução numérica obtida foi fisicamente coerente, a temperatura aumentou com o aumento do tempo de operação e na região próxima ao fluxo de calor a temperatura foi maior que nas regiões mais afastadas.

#### **2.2.4 Técnicas inversas**

Outro método que também pode ser usado no processo de torneamento é a técnica inversa. As questões sobre a condução de calor podem ser consideradas como uma divisão especial dentro das técnicas de problemas inversos. As características fundamentais destas questões são o fato de usarem temperaturas medidas experimentalmente, modelar baseando-se na equação de difusão de calor e ter como intuito a estimação de algum parâmetro térmico, como exemplo, a obtenção das propriedades térmicas, a obtenção do fluxo de calor superficial, a obtenção da fonte de calor interna ou ainda a obtenção da temperatura superficial numa face sem acesso direto (CARVALHO, 2005).

Ao analisar esses pontos, Carvalho (2005), constatou que o problema da usinagem se encaixa perfeitamente nesta divisão de questões, ou seja, tem o interesse de estabelecer a temperatura na interface de corte, uma vez que, a medição direta desta grandeza é difícil de ser obtida. Em conformidade, Lima et al., (2000) concluiu que o uso de método de condução inversa de calor pode ser uma boa opção, devido ao método levar em consideração as temperaturas medidas em posições acessíveis.

Na usinagem, normalmente, não se tem conhecimento da fonte de calor, sendo necessária uma abordagem inversa. Nesse caso, são utilizados dados de temperatura obtidos por meio de um experimento controlado para que se possa estimar um parâmetro desconhecido. Carvalho (2005) estimou a taxa de transferência de calor na superfície de corte por meio da técnica de otimização da seção áurea, um processo iterativo, onde a cada iteração o intervalo de busca é reduzido. Carvalho também resolveu o problema direto, que

teve que ser calculado diversas vezes por causa do uso da seção áurea. Para otimizar a resolução, foi desenvolvido um programa, Inv3D, que auxilia na aquisição de dados, geração da malha tridimensional e no cálculo de problemas diretos e inversos com posterior análise gráfica.

Liang, Xu e Ke (2013) propuseram um método inverso tridimensional para investigar a temperatura na interface cavaco-ferramenta durante a usinagem a seco do aço AISI 1045 usando um inserto de metal duro P10. Usando uma câmera infravermelha os autores mediram a temperatura na superfície de saída da ferramenta, que posteriormente foi utilizada para obter o fluxo de calor através do método do gradiente conjugado. O modelo térmico foi resolvido pelo método das diferenças finitas implícito considerando propriedades térmicas variando com a temperatura e coeficiente de convecção constante. Para a solução numérica, os autores utilizaram o software ABAQUS 6.8.

### 2.3 REVESTIMENTO DE FERRAMENTAS

Nos dias de hoje, quase todas as ferramentas de corte são revestidas em virtude das melhorias nos processos de fabricação. Os fundamentais pontos desse procedimento é que os revestimentos permitem um corte com menos atrito e menos desgaste, proporcionando uma maior vida útil à ferramenta e, também, pelo efeito barreira, já que o contato entre a peça e a ferramenta acontece no revestimento e não no material da ferramenta (OLIVEIRA, 2015).

Atualmente, busca-se na usinagem aumentar a velocidade de corte, utilizar ferramentas com maior durabilidade, condições que melhorem o acabamento superficial, entre outras. Como já foi visto, em altas velocidades de corte, há um aumento do calor gerado e isso pode levar ao desgaste precoce das ferramentas e esse desgaste pode prejudicar o acabamento superficial da peça usinada. Com o intuito de resolver esse problema, surgiu o uso de fluidos de corte com a função de dissipar o calor e reduzir o atrito e conseqüentemente a geração de calor. O problema desses fluidos é que eles causam

danos ao meio ambiente e à saúde do operador levando a indústria a reduzir ou eliminar o seu uso.

Para aumentar a produtividade sem causar danos ao meio ambiente, surgiram então as ferramentas com revestimentos. Atualmente cerca de 80% das operações de usinagem são realizadas com ferramentas revestidas, segundo Rech, et al., (2005). Os revestimentos das ferramentas podem ser de diferentes materiais como carboneto de titânio, nitreto de titânio, carbonitreto de titânio, nitreto de alumínio titânio, óxido de alumínio, aço rápido, diamante; e cada material tem suas próprias características mecânicas e tribológicas que podem auxiliar no desempenho da ferramenta de corte. Além disso, o revestimento pode ser feito em uma única camada ou em multicamadas, combinando as características de diversos materiais como maior resistência ao desgaste ou a altas temperaturas, aumento da tenacidade ou da dureza, entre outros.

Não há muitos estudos sobre a influência do revestimento no fluxo de calor na ferramenta durante a usinagem e ainda não se sabe ao certo se os revestimentos reduzem a geração de calor ou se impedem que o calor chegue ao substrato da ferramenta (Rech, 2006). Rech (2006) realizou um estudo, levando em consideração o revestimento TiN em diferentes espessuras, em uma solução analítica de modelagem de transferência de calor, com a finalidade de identificar a influência de um revestimento no fluxo de calor que entra no substrato da ferramenta. Segundo o autor, no corte contínuo, o revestimento não consegue reduzir o fluxo de calor transmitido ao substrato, mas no corte interrompido, onde o contato ferramenta-peça é menor, o fluxo de calor foi mantido na área de contato ferramenta-cavaco.

Rech, et al., (2005) propôs um estudo da influência das propriedades tribológicas das ferramentas de corte revestidas no torneamento de uma liga de aço. Para isso ele mediu a força de corte com um dinamômetro, definiu o “coeficiente de vazão” para cada ferramenta, analisou o comprimento de contato cavaco-ferramenta e a espessura do cavaco, além de medir a temperatura com uma câmera infravermelha. Como resultado ele observou que com as ferramentas com os revestimentos de TiN e (Ti, Al)N+MoS<sub>2</sub> foi reduzida a área de contato cavaco-ferramenta, a espessura da zona de cisalhamento secundário e a temperatura nessa interface o que levou à redução do fluxo de calor transmitido para o

substrato da ferramenta de corte. A ferramenta de corte revestida com  $(\text{Ti, Al})\text{N}+\text{MoS}_2$  teve um comportamento intermediário, mas não reduziu a temperatura na interface e tem uma influência limitada no fluxo de calor transmitido ao substrato da ferramenta.

Ferreira (2017) analisou numericamente a influência térmica dos revestimentos em ferramentas de corte utilizando o software *COMSOL* e problemas inversos. Os revestimentos analisados foram  $\text{TiN}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com espessura variando de  $10\ \mu\text{m}$  a  $100\ \mu\text{m}$ . Para as ferramentas com revestimento, a temperatura na área de contato ferramenta-peça é maior que na ferramenta sem revestimento, pois o revestimento retém mais calor na face superior da ferramenta e impede que o calor seja passado ao substrato. Quanto maior a espessura do revestimento, maior é a temperatura na interface ferramenta-peça e o revestimento de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  apresentou melhor desempenho, provavelmente, por sua condutividade térmica ser menor que a do  $\text{TiN}$ .

#### 2.4 ESTUDOS TÉRMICOS UTILIZANDO O *COMSOL*

O *COMSOL* é um software de elementos finitos baseado em métodos numéricos avançados para modelar e resolver problemas físicos. Muitos estudos têm sido realizados usando o *COMSOL*, para diversas áreas de estudo como, por exemplo Bahrami, et al., (2016) que investigaram o calor, o escoamento do fluido e a transferência de massa durante a soldagem TIG do aço inoxidável austenítico e aço carbono 1018. Os autores utilizaram o software de elementos finitos *COMSOL* para modelar o problema incluindo os módulos de eletromagnetismo, escoamento de fluidos e transferência de calor e massa. Tanto os resultados numéricos como os experimentais mostraram que os elementos de liga são misturados uniformemente na zona de soldagem.

Outro exemplo com uso diversificado do *COMSOL* é Areias (2015) que simulou os campos acústicos e térmicos provocados pela radiação ultrassônica em meios biológicos compostos por pele, gordura, músculo e osso, e também estudou os locais de possíveis sobreaquecimentos (pontos quentes), em função das intensidades ultrassônicas utilizadas, presença de implantes e diferentes geometrias do meio. As simulações foram feitas

utilizando o software comercial *COMSOL* 4.3. Os resultados obtidos foram condizentes com a teoria, entre eles o fato da interface músculo/osso ser preferencialmente aquecida e também o grau de aquecimento ser dependente da intensidade do feixe e do tempo de aplicação. Observou-se o papel importante que a pele tem ao absorver grande parte da energia acústica que nela chega, diminuindo consideravelmente o aquecimento dos tecidos adjacentes. Também se observou o desvio do foco e da correspondente região aquecida, causados pela inclinação dos tecidos em relação ao transdutor.

## CAPÍTULO III

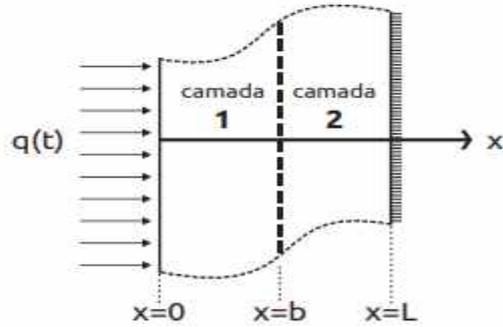
### 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS E METODOLOGIA

Nesse capítulo é apresentado o modelo do problema térmico unidimensional de condução de calor, o procedimento utilizado para realizar as simulações numéricas e o método usado para validar a solução numérica.

#### 3.1 PROBLEMA TÉRMICO

O objetivo desse trabalho é estudar a influência térmica dos revestimentos em ferramenta por meio de análise numérica usando como ferramenta o software *COMSOL* para solucionar o problema térmico unidimensional de condução de calor. O modelo térmico é constituído por uma placa plana de camada dupla, de comprimento  $L$ , que recebe um fluxo de calor  $q(t)$  na superfície  $x = 0$  e é isolada termicamente na superfície oposta  $x = L$ , a separação das camadas ocorre em  $x = b$ . O modelo é mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Problema térmico: placa plana, com duas camadas, submetidas a um fluxo de calor em  $x = 0$  e a condição de isolamento térmico na superfície oposta,  $x = L$



Fonte: Oliveira (2019)

Matematicamente o modelo da Figura 1 é descrito pela equação da difusão de calor:

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_1} \frac{\partial T_1}{\partial t} \quad 0 \leq x \leq b \quad (1a)$$

$$\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_2} \frac{\partial T_2}{\partial t} \quad b \leq x \leq L \quad (1b)$$

As condições de contorno a que ele está sujeito são:

$$-k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = q(t); \quad -k_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0; \quad (1c)$$

As condições de continuidade:

$$T_1|_{x=b} = T_2|_{x=b} \quad (1d)$$

$$-k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=b} = -k_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=b} \quad (1e)$$

E a condição inicial é:

$$T_1(x, 0) = T_2(x, 0) = F(x) = T_0 \quad (1f)$$

## 3.2 SOLUÇÃO NUMÉRICA

O *COMSOL* é um programa comercial que utiliza o método de elementos finitos (MEF) para resolver vários problemas que envolvam transferência de calor, acústica, estruturas mecânicas, plasma, ótica, entre outros.

### 3.2.1 Simulações no *COMSOL*

Para realizar as simulações no *COMSOL*, os seguintes passos devem ser seguidos:

- Definir a dimensão espacial do problema;
- Definir a física do problema;
- Selecionar o tipo de estudo;
- Definir a geometria do problema;
- Adicionar os materiais e suas propriedades termofísicas;

- Inserir os dados do fluxo de calor  $q(t)$ , a temperatura inicial do problema  $T_0$  e as superfícies que são isoladas termicamente;
- Escolher uma opção de malha;
- Definir o Passo de tempo;
- Calcular e apresentar os resultados

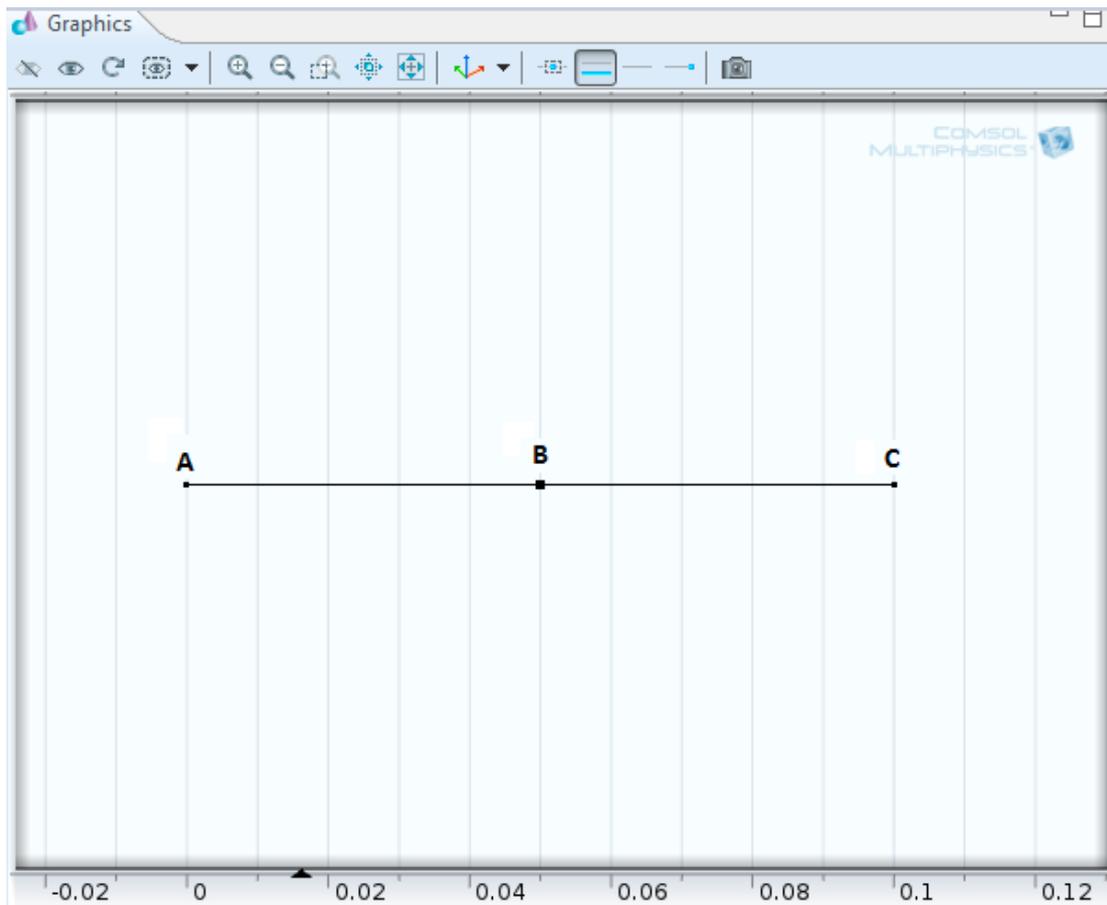
No ANEXO A, há um passo a passo, com imagens da interface do *COMSOL*, para mostrar como as simulações de condução de calor unidimensional podem ser realizadas.

### **3.2.2 Modelo térmico unidimensional ferramenta de cobre**

A primeira simulação foi baseada no trabalho de Oliveira (2019). Para se comparar o modelo numérico com o analítico obtido pela literatura, no trabalho de Oliveira (2019), considerou-se um problema direto unidimensional de uma ferramenta de cobre sem revestimento de comprimento  $L = 10$  [cm], com as camadas do mesmo material e cada uma com espessura de 5 [cm]. O procedimento para realizar a simulação foi o seguinte:

Selecionou-se a dimensão espacial do problema como 1D, de forma a se analisar a temperatura ao longo do comprimento da ferramenta no tempo. Definiu-se a física do problema como transferência de calor e o estudo como dependente do tempo. No passo seguinte, definiu-se a geometria do problema, nesse caso, desenhou-se uma linha no software com um ponto no seu centro obtendo-se então as duas camadas de cobre. A representação da geometria pode ser observada na Figura 2.

Figura 2 – Representação da geometria do problema no *COMSOL*



Fonte: As autoras (2019)

Com a geometria definida, adicionaram-se as propriedades termofísicas dos materiais: condutividade térmica,  $k_1 = k_2 = 401$  [W/mK], massa específica,  $\rho_1 = \rho_2 = 8100$  [kg/m<sup>3</sup>], calor específico a pressão constante,  $cp_1 = cp_2 = 423,13$  [J/kg K], difusividade térmica  $\alpha_1 = \alpha_2 = 117E-6$  [m<sup>2</sup>/s] (Oliveira, 2019), seguindo a seguinte relação:

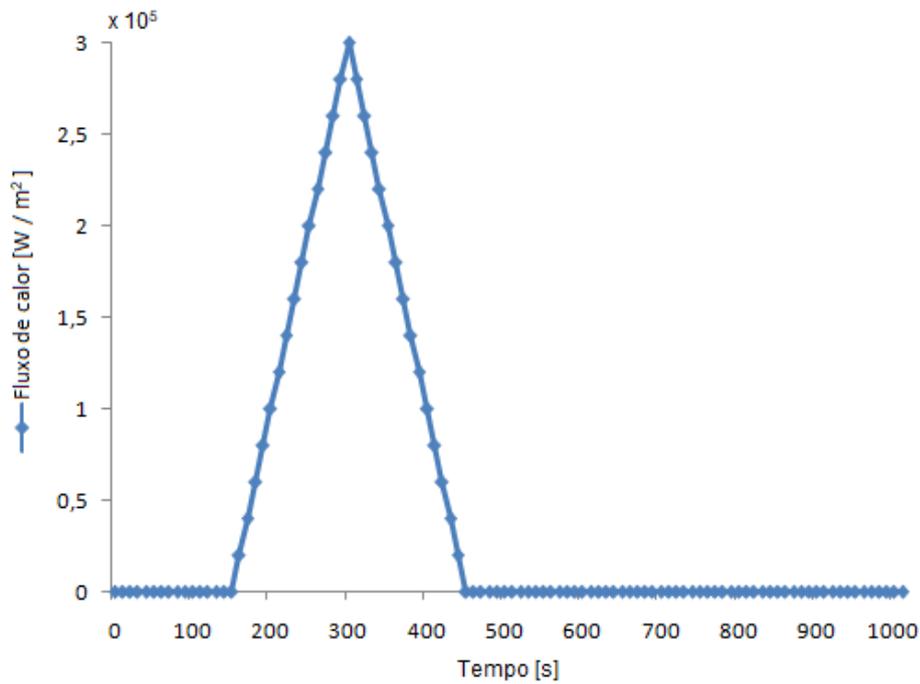
$$\rho * cp = \frac{k}{\alpha} \quad (2)$$

A temperatura inicial do problema é definida como  $T_0 = 0$  [°C], o ponto C, em  $x = L$ , é isolado termicamente como foi descrito no problema térmico. O fluxo de calor

utilizado, representado na Figura 3, é do tipo pulso triangular e pode ser encontrado na literatura em Oliveira (2019) e Fernandes (2013).

Segundo Fernandes (2013) o fluxo de calor em uma situação real tem natureza discreta e pode ser representado por um vetor de suas componentes, que são constantes em cada intervalo de tempo, um exemplo seria um pulso triangular.

Figura 3 – Fluxo de calor pulso triangular.



Fonte: As autoras (2019)

### 3.2.3 Modelo térmico unidimensional ferramenta de metal duro e revestimento de nitreto de titânio

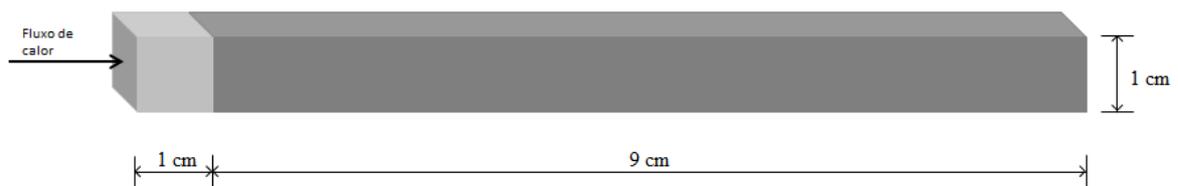
A simulação 2 representa uma ferramenta de metal duro ISO K10 com revestimento de nitreto de titânio (TiN) que possui a mesma geometria da simulação anterior mudando apenas o material e espessura da camada (posição do ponto B). As propriedades utilizadas retiradas de (Brito et al., 2009), foram: condutividade térmica,  $k_1 = 21$  [W/mK] e  $k_2 = 130$

[W/mK], massa específica,  $\rho_1 = 4650$  [kg/m<sup>3</sup>] e  $\rho_2 = 14900$  [kg/m<sup>3</sup>], e calor específico a pressão constante,  $cp_1 = 645$  [J / kg K] e  $cp_2 = 200$  [J / kg K], onde (1) representa as propriedades do revestimento e (2) da ferramenta. O fluxo de calor foi o mesmo utilizado anteriormente e está representado na Figura 3. O revestimento foi definido com uma espessura  $b = 1$  [cm] e a ferramenta com comprimento  $L = 10$  [cm].

Para esse problema, estudou-se a influência da malha e do passo de tempo, comparando os resultados de uma malha grosseira e outra refinada. Além disso, estudou-se o passo de tempo partindo de um passo de tempo  $dt = 150$  [s] até um passo de tempo  $dt = 0.1$  [s]. Realizou-se a mesma simulação no *ANSYS* (# *ANSYS*, customer: *Universidade Federal de Uberlândia 607208*, Originator: *MMORIS*, Hostid: *cad3ae1b*, ID Type: *D*) e então se comparou os resultados obtidos nos dois softwares.

Para a simulação no *ANSYS*, desenhou-se uma geometria 3D e não 1D, devido à disponibilidade das configurações disponíveis, colocaram-se as mesmas propriedades dos materiais e fluxo de calor usados no *COMSOL* e o mesmo passo de tempo  $dt = 0.1$  [s]. Para tornar a geometria 3D em um problema 1D isolou-se todas as paredes, com exceção da parede que está o fluxo de calor. A malha foi refinada até os resultados não divergirem um do outro. Os resultados obtidos serão discutidos no Capítulo 4.

Figura 4 – Geometria utilizada na simulação do *ANSYS*.



Fonte: As autoras (2019)

### 3.2.4 Análise da espessura do revestimento

Para analisar a influência que a espessura do revestimento possui no campo de temperatura da ferramenta realizou-se as simulações que utilizam as mesmas propriedades

e o mesmo procedimento da simulação 2, a única mudança é a espessura do revestimento, a malha e o passo de tempo. Primeiramente, realizou-se simulações na ordem de centímetros e posteriormente estendeu-se o estudo para a ordem de micrometros.

Segundo Oliveira (2019), as análises numéricas têm uma limitação quando a espessura dos revestimentos é muito pequena, isso porque seria necessária uma malha com milhões de nós para que a malha, tanto na região do material base da ferramenta, quanto na região do revestimento, fosse refinada adequadamente, já que a dimensão do comprimento do material base da ferramenta está na ordem de milímetros e do revestimento está na ordem de micrometros.

Devido a essa limitação, realizaram-se também simulações com o revestimento na ordem de centímetros para verificar o comportamento da temperatura com a mudança da espessura do revestimento e se haveria alguma alteração com o revestimento na ordem de micrometros.

### **3.2.5 Definição do passo de tempo**

O passo de tempo determina o intervalo entre um resultado e outro. Um passo de tempo  $dt = 1$  [s] significa que a cada 1 [s] será gerado um resultado e ele será plotado no gráfico. Portanto, quanto menor é o passo de tempo, maior é a frequência com que os resultados são calculados e mais precisos eles são, porém, o custo computacional aumenta. Devido a esse fato, o passo de tempo deve ser bem escolhido para que retorne resultados precisos e não leve muito tempo para a simulação ser completada.

Inicialmente realizou-se uma simulação com um passo de tempo e então se repetiu essa simulação com um passo de tempo menor. Esse procedimento foi realizado até que não houvesse mudança significativa entre as simulações com passos de tempo diferentes e o passo de tempo pudesse ser definido.

### 3.2.6 Estudo do refinamento da malha

O *COMSOL* fornece automaticamente 9 tipos de malha: *extremely coarse*, *extra coarse*, *coarser*, *coarse*, *normal*, *fine*, *finer*, *extra fine* e *extremely fine*. Há também a opção de refinar a malha manualmente. À medida que a malha é refinada, a quantidade de nós aumenta e a solução fica mais próxima do resultado, mas há um momento em que o aumento de nós não altera a solução. Outro ponto do refinamento da malha é que quanto maior é a quantidade de nós maior é o trabalho computacional. Por isso é importante selecionar uma malha adequada, que trará o melhor resultado, mas que não tornará a solução mais onerosa do que ela deve ser.

Para todas as simulações foi feito um estudo para verificar qual seria o refinamento adequado da malha, primeiro foi selecionada uma malha e realizado a simulação, após foi realizada outra simulação selecionando uma malha mais fina. Esse procedimento foi realizado até que os resultados não mudassem e a malha adequada fosse selecionada.

### 3.2.7 Comparação dos resultados

Os valores de uma solução numérica aplicada a uma modelagem matemática devem ser confrontados com resultados dados por soluções analítica, experimentais ou até mesmo por outras soluções numéricas, se elas já foram exaustivamente testadas (AMORIM, 2016). Validar um modelo numérico é uma tarefa que requer uma análise minuciosa e criteriosa, uma vez que a função da validação é dar credibilidade e robustez para que o modelo possa representar fielmente os fenômenos físicos estudados (SANTOS, 2008). Segundo Oliveira (2019), um método de verificar se uma solução está correta é fazendo uma comparação entre os seus resultados e os resultados de uma solução obtida por um método diferente ou um problema diferente com o mesmo resultado numérico.

A primeira simulação foi baseada no trabalho de Oliveira (2019) para que elas pudessem ser comparadas. Considerou-se o mesmo modelo térmico, as mesmas propriedades dos materiais, fluxo de calor e comprimento das camadas. Oliveira (2019)

solucionou o problema térmico unidimensional de condução por meio de análise analítica aliada à técnica inversa TFBGF (*transfer function based Green's functions*) com implementação numérica e os seus resultados foram comparados com esse trabalho e a diferença entre eles foi calculada. Para a simulação da ferramenta de metal duro com revestimento de nitreto de titânio fez-se uma comparação dos resultados obtidos com a mesma simulação realizada no programa comercial *ANSYS*.

## CAPÍTULO IV

### 4 ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta a análise de resultado do modelo térmico, validando primeiramente a simulação no *COMSOL* e posteriormente o estudo da influência do revestimento na ferramenta de corte. Para validação da simulação do *COMSOL*, comparou-se o resultado com uma solução analítica e outra numérica.

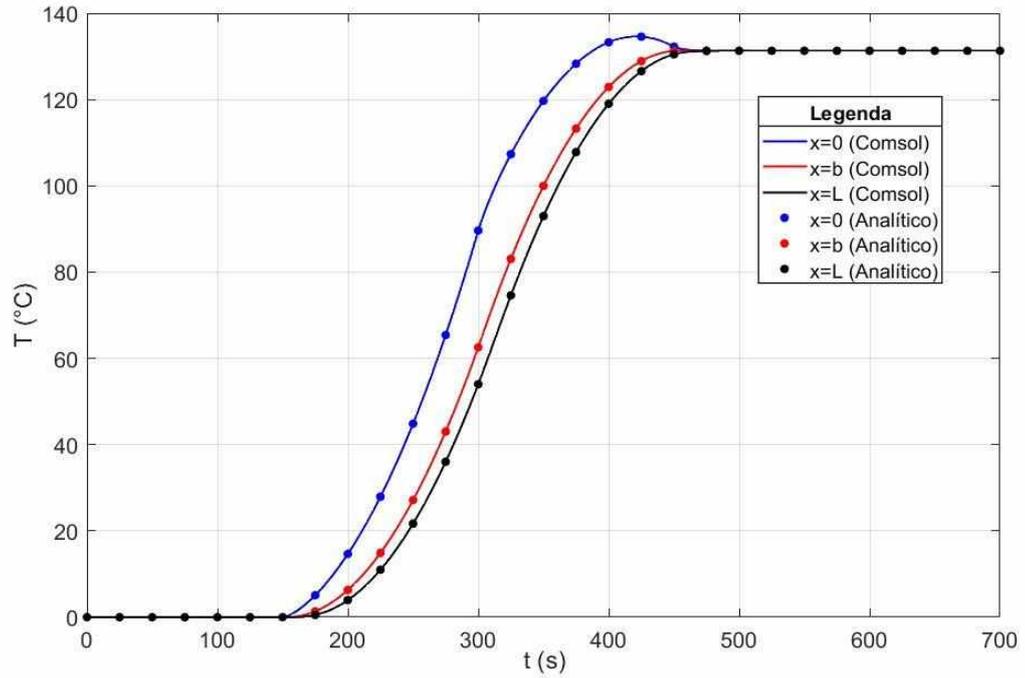
#### 4.1 MODELO TÉRMICO 1D DUPLA CAMADA DE COBRE

Primeiramente antes de analisar a influência do revestimento fez-se um estudo de validação do modelo utilizado no *COMSOL*. Para isso comparou-se o resultado obtido numericamente com resultado analítico da literatura (OLIVEIRA, 2019). O problema, conforme descrito em 3.2.2, trata-se de uma placa plana de dupla camada a qual era composta por cobre em ambas as camadas. Temperatura inicial  $T_0 = 0[^\circ\text{C}]$ , comprimento da placa  $L = 10$  [cm],  $dt = 0.1$ [s],  $t = [0: dt: tf]$ ,  $tf = 1024$  [s].

Então, calculou-se a distribuição de temperatura em  $x = 0$ ,  $x = b$  e  $x = L$ , onde  $b = L/2$ , ao longo do tempo conforme foi realizado por Oliveira (2019). Na figura 5, tem-se as comparações de resultado entre o modelo numérico e analítico.

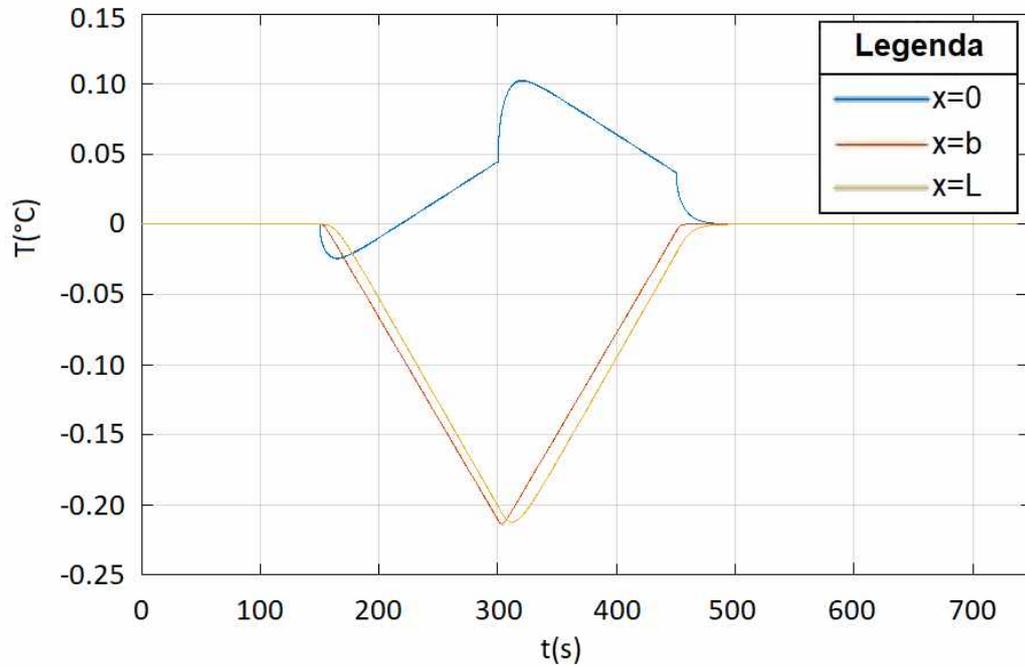
Observa-se na Figura 5 que os resultados convergiram para ambas as posições da ferramenta de corte, comprovando que o modelo numérico está coerente com a literatura. Além disso, o resultado encontra-se dentro do esperado, no qual em  $x = 0$  tem-se um aumento maior da temperatura que vai reduzindo ao longo de  $x$ , devido a sua proximidade com a fonte de calor. Foi calculado também o erro entre a simulação analítica e numérica, observando, na Figura 6, uma diferença máxima de  $0,22$  [ $^\circ\text{C}$ ] em  $t = 300$  [s] que corresponde ao maior valor do fluxo de calor.

Figura 5 – Análise de resultados obtidos entre a simulação numérica e analítica de Oliveira (2019).



Fonte: As autoras (2019)

Figura 6 – Diferença de temperatura entre a resolução analítica e numérica de Oliveira (2019).



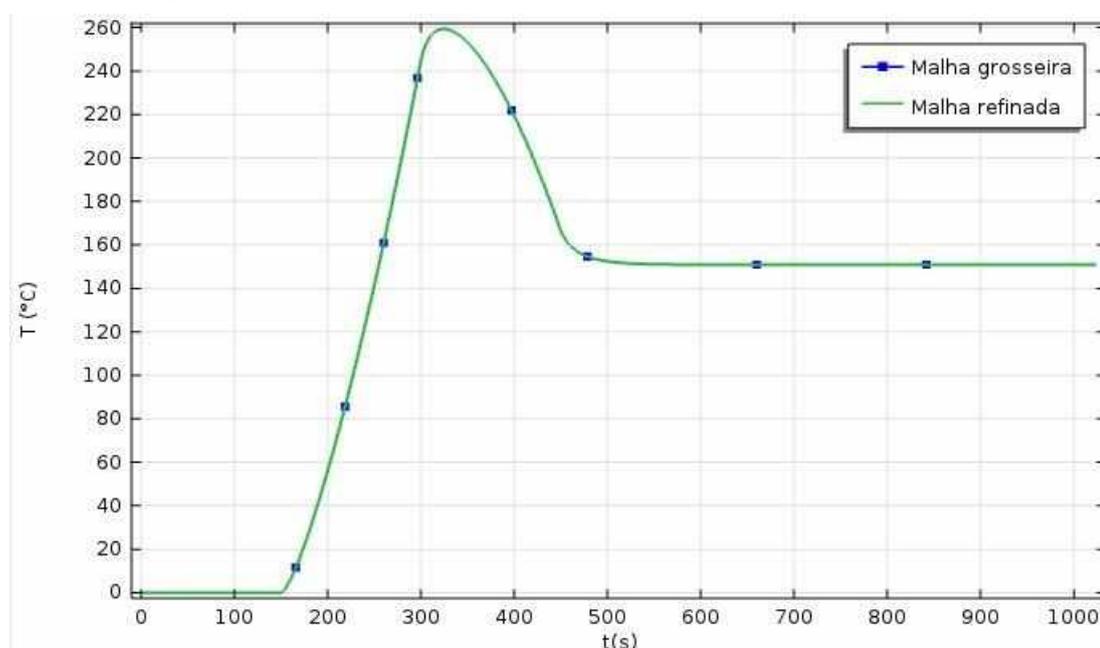
Fonte: As autoras (2019)

## 4.2 MODELO TÉRMICO 1D DUPLA CAMADA: METAL DURO E NITRETO DE TITÂNIO

Todas as simulações numéricas com a ferramenta de corte de metal duro com revestimento de nitreto de titânio foram realizadas no software *COMSOL*. Para se obter os resultados apresentados neste capítulo, um estudo de convergência de malha numérica foi previamente realizado com o objetivo de selecionar a malha mais apropriada para as simulações. Além disso, estudou-se também a convergência do passo de tempo. A partir do momento que se decidiu a melhor malha e o melhor passo de tempo comparou-se este resultado com o encontrado no *ANSYS*. O modelo é descrito em 3.2.3, no qual a espessura do revestimento é de 1 [cm].

Primeiramente fez-se o estudo da convergência de malha adotando uma malha grosseira de apenas 4 elementos, e a outra refinada com 100 elementos com passo de tempo de 0,1 [s]. O resultado pode ser analisado na Figura 7.

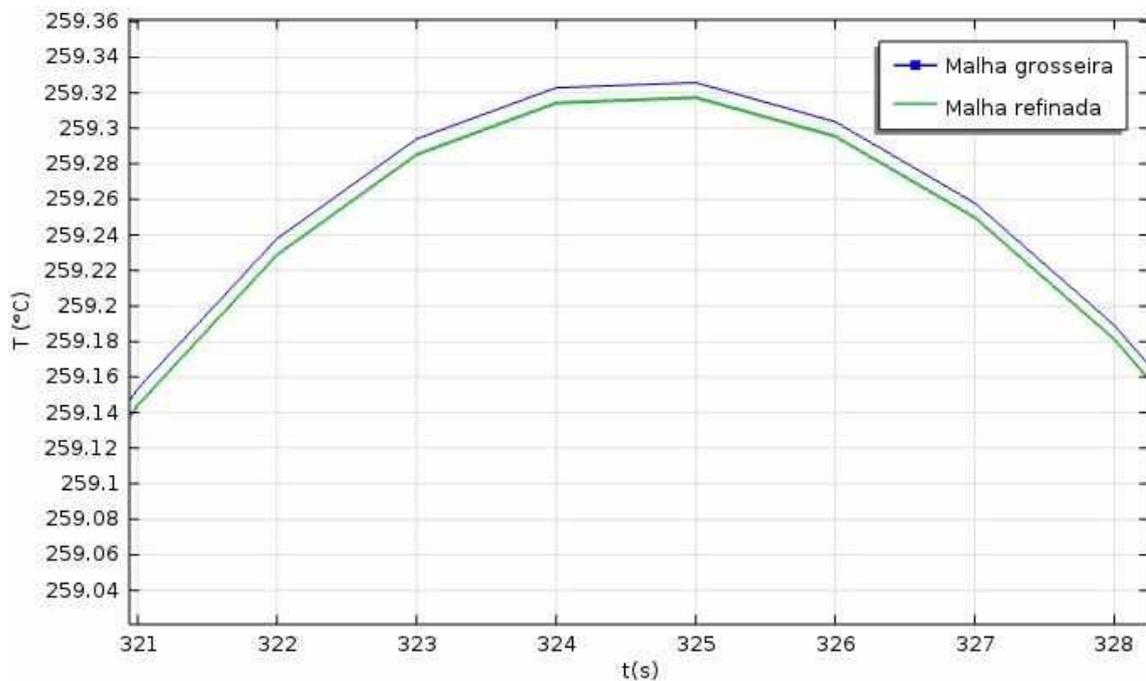
Figura 7 – Convergência de malha em  $x = 0$ .



Fonte: As autoras (2019)

A Figura 8 representa a Figura 7 em detalhe, ou seja, foi realizado um zoom no gráfico para análise mais detalhada da convergência de malha em  $x = 0$ . Pela Figura 8 é possível observar que existe uma diferença de resultado para as malhas apresentadas que serão discutidas a diante.

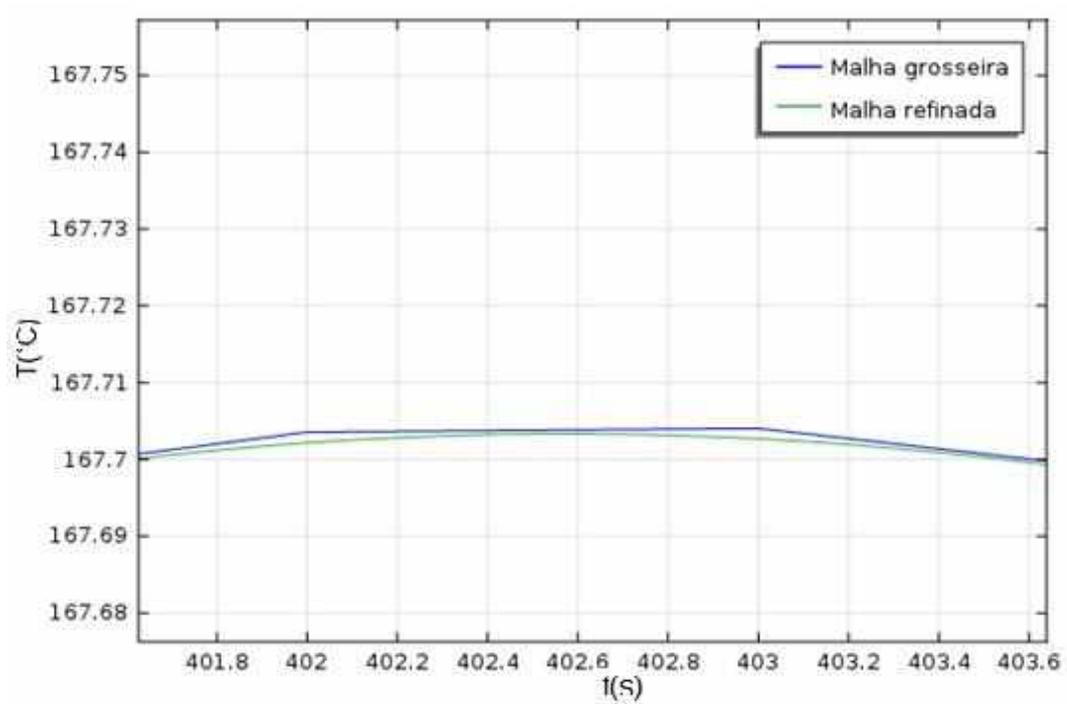
Figura 8 – Convergência de malha em  $x = 0$ , em detalhe



Fonte: As autoras (2019)

Observa-se que o refinamento da malha não provocou grandes alterações no resultado. O erro máximo calculado foi de  $0.02$  [°C] em  $x = 0$ , mostrado na Figura 8, e de  $0.002$  [°C] em  $x = b$ , mostrado na Figura 9. Desta forma, utilizou-se uma malha intermediária de 57 elementos que não apresentou diferença em relação à malha de 100 elementos, uma vez que seu custo computacional é menor, para as simulações futuras. O tempo de simulação para malha de 4 elementos foi de 4 [s], para de 100 elementos de 15 [min] e para de 57 elementos 5 [min]. Com a malha definida estudou-se a influência do passo de tempo iniciando em  $dt = 150$ [s] até  $dt = 0.1$  [s]

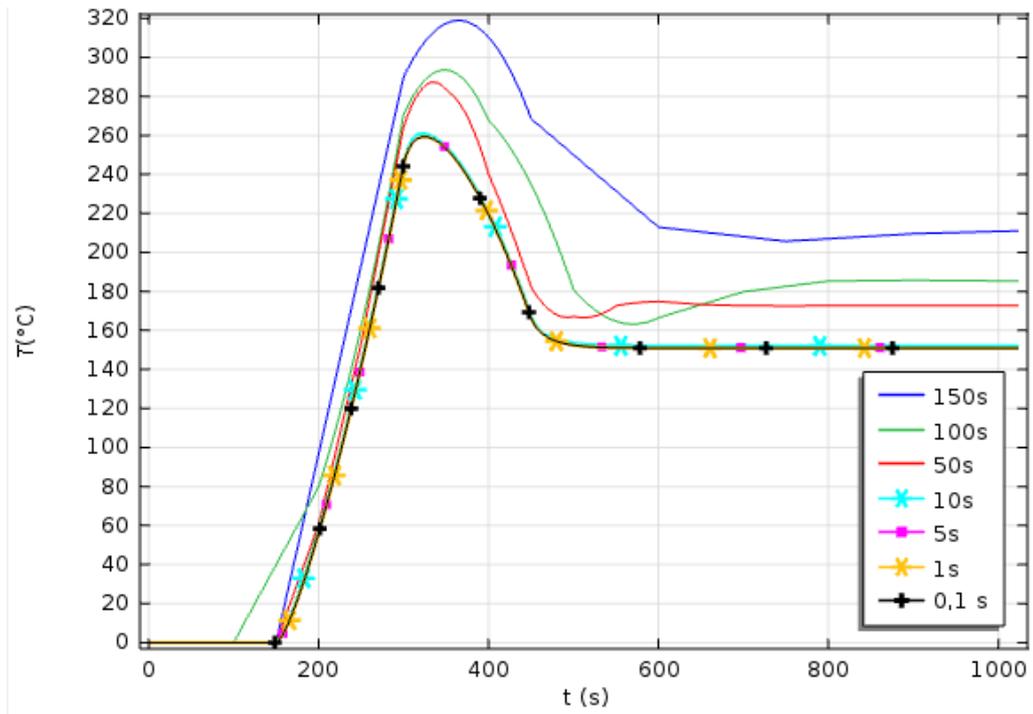
Figura 9 – Convergência de malha em  $x = b$  em detalhe.



Fonte: As autoras (2019)

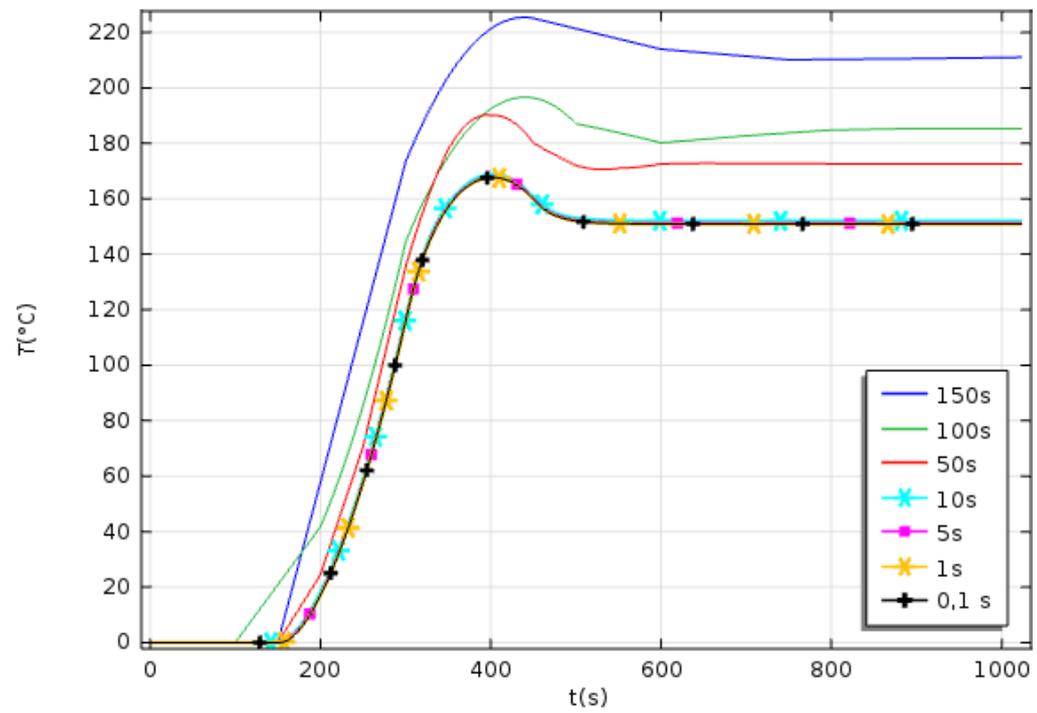
As Figuras 12 e 13 são zoom das Figuras 10 e 11, respectivamente, para melhor visualização e análise. Observa-se nas Figuras 10, 11, 12 e 13 que a partir do passo de tempo  $dt = 5$  [s] há pouca variação no resultado. Analisando, no detalhe, temos que a diferença máxima de temperatura entre os passos de tempo  $dt = 1$  [s] e  $dt = 0.1$  [s] é de  $0.02$  [°C] tanto para  $x = 0$ , quanto para  $x = b$ . Desta forma, conclui-se que o passo de tempo de  $dt = 0.1$  [s] é suficiente para a simulação convergir.

Figura 10 – Convergência do passo de tempo em  $x = 0$ .



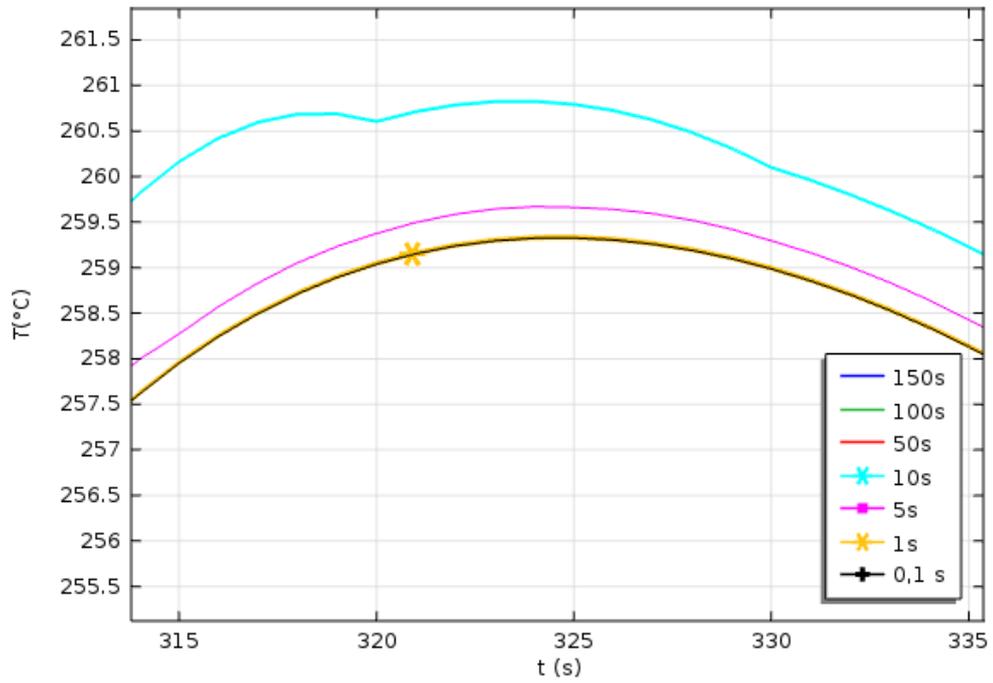
Fonte: As autoras (2019)

Figura 11 – Convergência do passo de tempo em  $x = b$ .



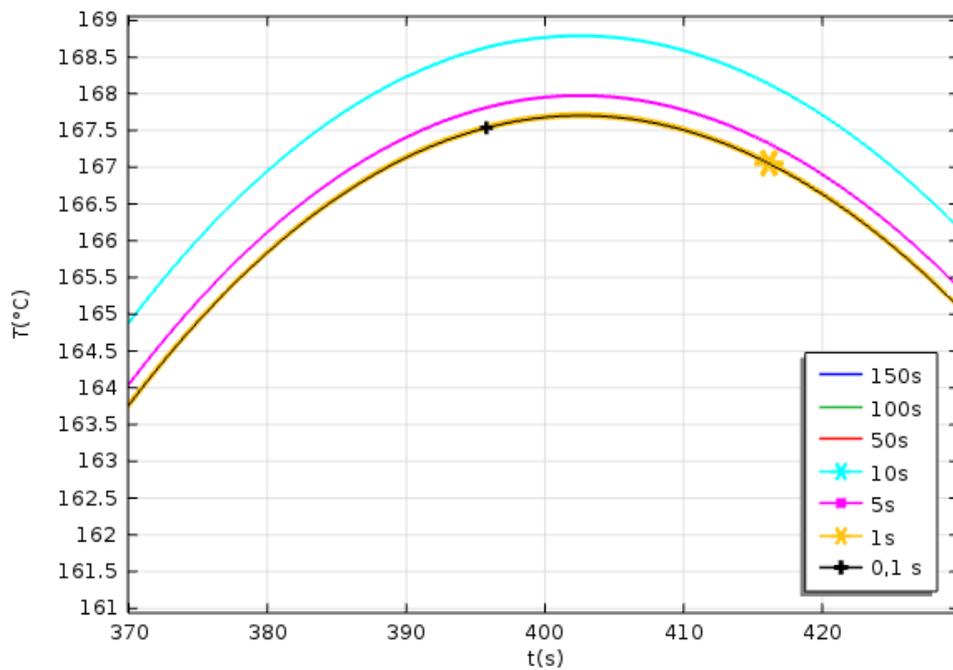
Fonte: As autoras (2019)

Figura 12 – Convergência do passo de tempo em  $x = 0$  – detalhe.



Fonte: As autoras (2019)

Figura 13 – Convergência do passo de tempo em  $x = b$  – detalhe.

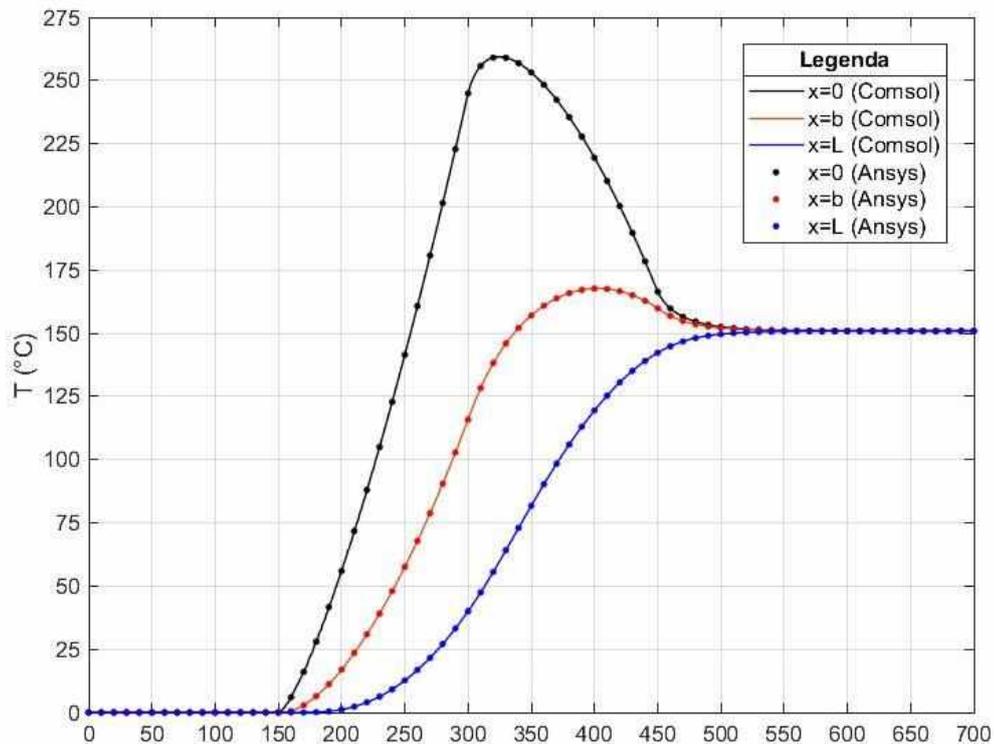


Fonte: As autoras (2019)

Com passo de tempo e a malha definidos, realizou-se a mesma simulação no *ANSYS* como descrito em 3.2.2. Todas as propriedades, condições de contorno, condições iniciais foram mantidas, inclusive foi utilizado o mesmo passo de tempo  $dt = 0.1$  [s]. A malha, devido à geometria ser tridimensional, mesmo o modelo sendo forçado a trabalhar como unidimensional, necessitou ser mais refinada com elementos de  $0.00025$  [m].

Na Figura 14 temos que os resultados convergiram entre as duas simulações numéricas. O resultado está dentro do esperado, uma vez que em  $x = 0$  a temperatura é maior devido sua maior proximidade com a fonte de calor, e vai reduzindo ao longo de  $x$ . Calculou-se também o erro relativo entre os resultados obtidos no *ANSYS* e no *COMSOL* (Figura 15)

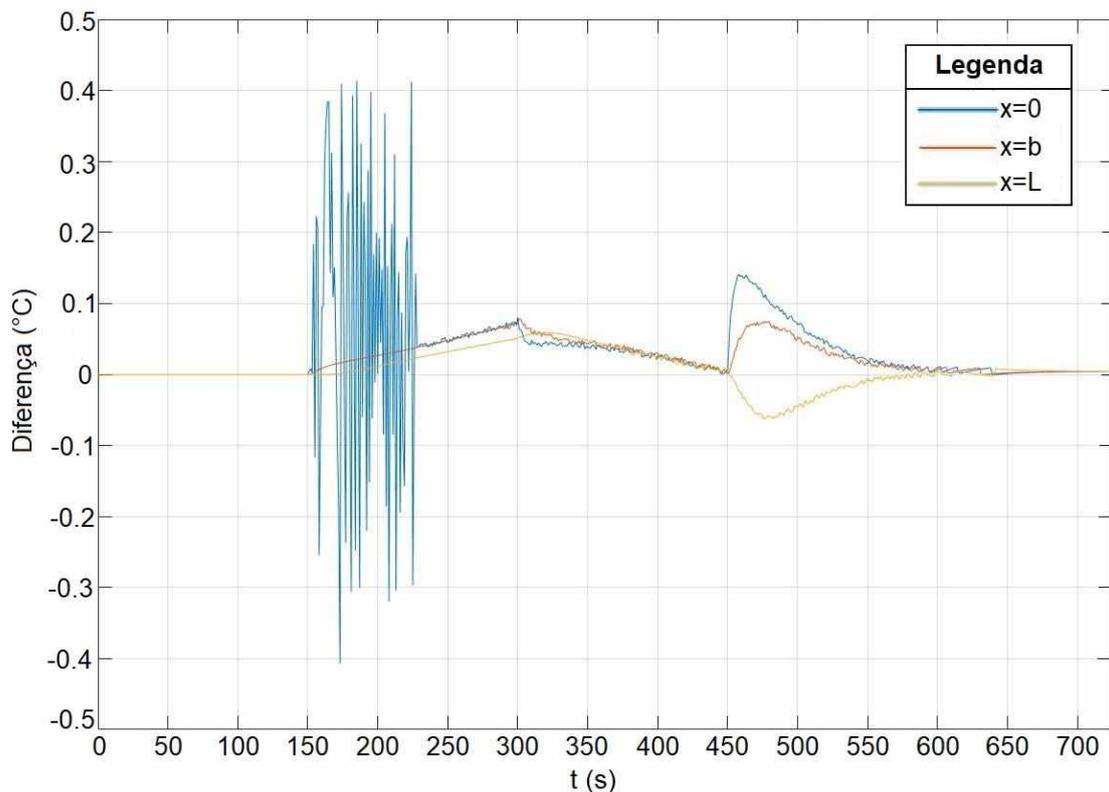
Figura 14 – Comparação das simulações do ANSYS e COMSOL



Fonte: As autoras (2019)

Observa-se na Figura 15 que a maior diferença em módulo entre os resultados obtidos no *ANSYS* e no *COMSOL* é na ordem de 0.4 [°C] que é apresentado como forma de ruído em  $x = 0$ , e isso ocorre no início da aplicação do fluxo de calor. A fim de compreender melhor esse ruído, um novo resultado foi gerado para o intervalo de tempo de 150 a 170 [s] que pode ser observado na Figura 16.

Figura 15 – Diferença entre as temperaturas calculadas pelos softwares *COMSOL* e *ANSYS*.

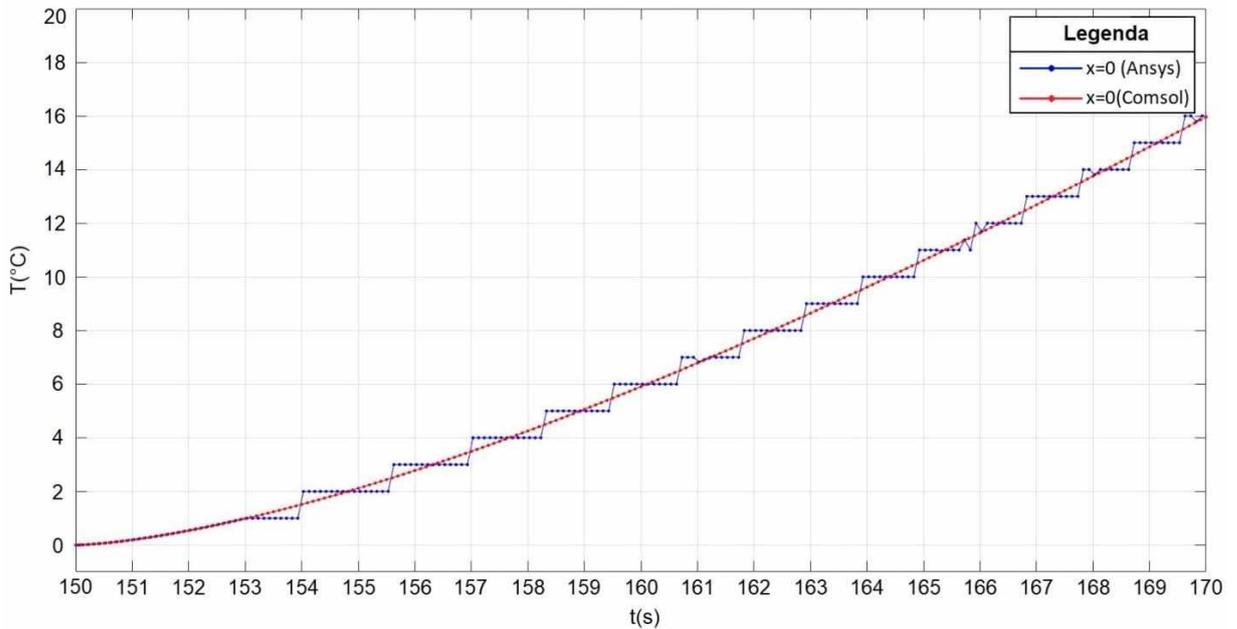


Fonte: As autoras (2019)

Pode-se observar pela Figura 16 que o resultado obtido pelo *COMSOL* para  $dt = 0.1$  [s] foi contínuo, enquanto para o *ANSYS* este passo de tempo não foi suficiente para a obtenção de um resultado contínuo no início da aplicação do fluxo de calor, provavelmente devido à utilização de uma geometria em 3D. Desta forma o *COMSOL* já validado com o método analítico e comparado com o *ANSYS* apresenta ser a melhor opção

para o estudo numérico pretendido, uma vez que ele responde bem para o modelo térmico que será estudado.

Figura 16 – Temperatura em  $x = 0$  usando softwares *COMSOL* e *ANSYS*.

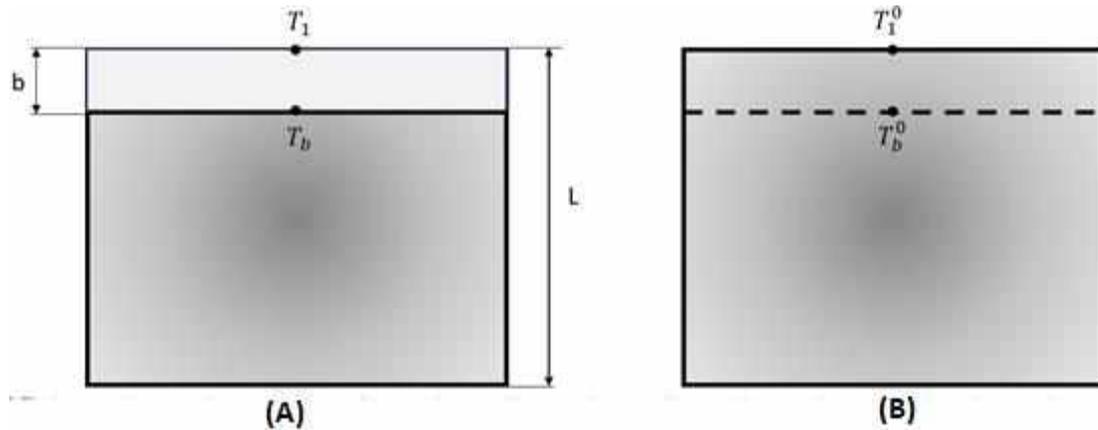


Fonte: As autoras (2019)

#### 4.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO NA FERRAMENTA DE CORTE CONSIDERANDO GRANDES ESCALAS (CENTÍMETROS)

A Figura 17 ilustra a temperatura na face de corte da ferramenta revestida ( $T_1$ ), a temperatura na interface revestimento e substrato ( $T_b$ ), na face de corte da ferramenta não revestida ( $T_1^0$ ) e na posição  $x = b$  ( $T_b^0$ ).

Figura 17 – Temperatura na ferramenta revestida A e na ferramenta sem revestimento B.

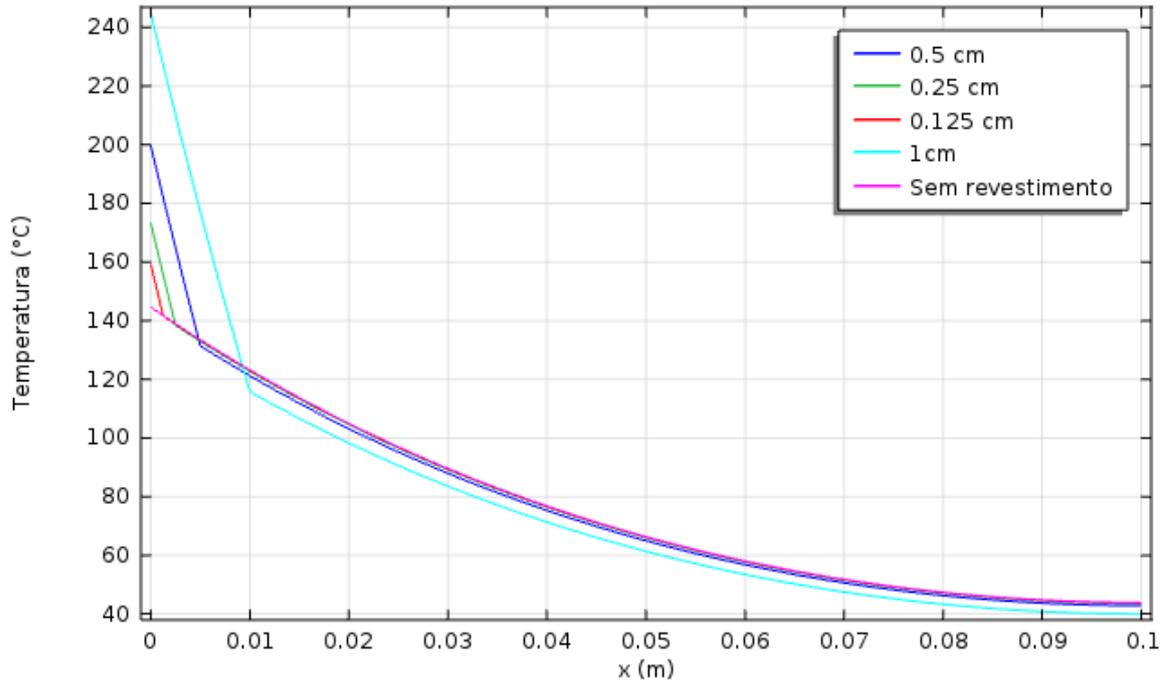


Fonte: As autoras (2019)

Para analisar os resultados deve-se ressaltar que o modelo térmico da ferramenta possui o mesmo tamanho  $L$  seja ela com revestimento de diferentes espessuras ou sem revestimento. Foi escolhido o tempo de análise em  $t = 300$  [s], pois é quando ocorre o pico do fluxo de calor.

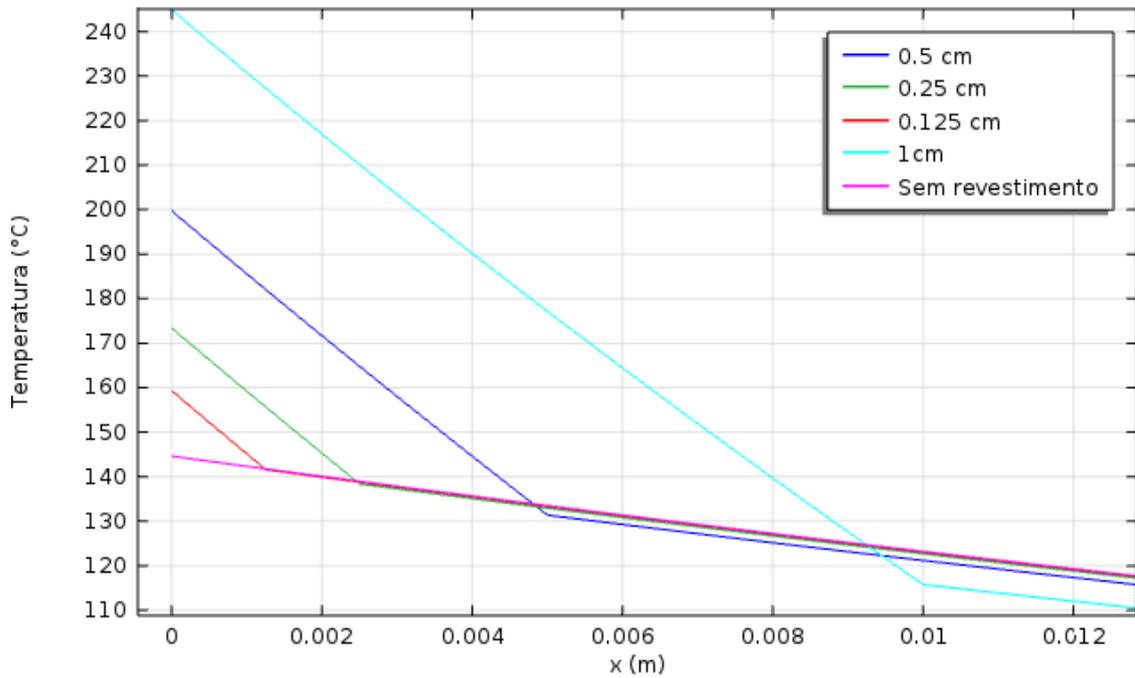
Observa-se nas Figuras 18 e 19 que a temperatura  $T_1$ , ou seja, em  $x = 0$  aumenta com o aumento da espessura e sempre  $T_1 > T_1^0$ . Entretanto, observa-se que na interface revestimento e substrato quanto maior a espessura do revestimento menor será  $T_b$  devido à barreira térmica que o revestimento provoca, uma vez que quanto maior o comprimento, maior a resistência térmica e mais difícil a condução de calor.

Figura 18 – Temperatura ao longo de x em t = 300 [s] para diferentes espessuras de revestimento.



Fonte: As autoras (2019)

Figura 19 – Detalhe da temperatura ao longo de x em t = 300 [s] para diferentes espessuras de revestimentos.



Fonte: As autoras (2019)

Tabela 1. Comparação da temperatura na ferramenta de corte em  $x = b$ .

Espessura do revestimento	$T_b$	$T_b^0$	Redução da temperatura em %
1 cm	115.75	123.50	6.28
0,5 cm	131.36	133.50	1.60
0,25 cm	138.45	138.99	0.39
0,125 cm	141.58	141.76	0.13

Fonte: As autoras (2019)

Tabela 2. Comparação da temperatura na ferramenta de corte.

Espessura do revestimento	$T_b$	$T_1^0$	Redução da temperatura em %
1 cm	115.75	144.60	19.95
0,5 cm	131.36	144.60	9.16
0,25 cm	138.45	144.60	4.25
0,125 cm	141.58	144.60	2.09

Fonte: As autoras (2019)

Para facilitar a análise os resultados das Figuras 18 e 19 foram colocados em formas de tabela. A tabela 1 representa a comparação entre as temperaturas em  $x = b$ , tanto para a ferramenta revestida quanto para a não revestida. Essa análise é realizada a fim de se obter uma comparação mais justa, no qual a temperatura é analisada na mesma profundidade. Como dito anteriormente, quanto maior a espessura do revestimento menor será  $T_b$  e maior a redução de temperatura comparando  $T_b$  com  $T_b^0$ . Para espessuras mais finas como 0,25 [cm] e 0,125 [cm] a redução é na menor que 1%.

A tabela 2 representa a comparação entre a temperatura no substrato da ferramenta revestida  $T_b$  e a temperatura no contato ferramenta-peça para a não revestida, a fim de se comparar a real redução de temperatura no material da ferramenta quando ela tem revestimento e quando ela está em contato direto com a peça (interface de corte)  $T_1^0$ .

Analisando desta forma, temos reduções maiores que da tabela 1. E a análise da espessura do revestimento é a mesma feita anteriormente, quanto maior a espessura, maior a redução de temperatura no substrato.

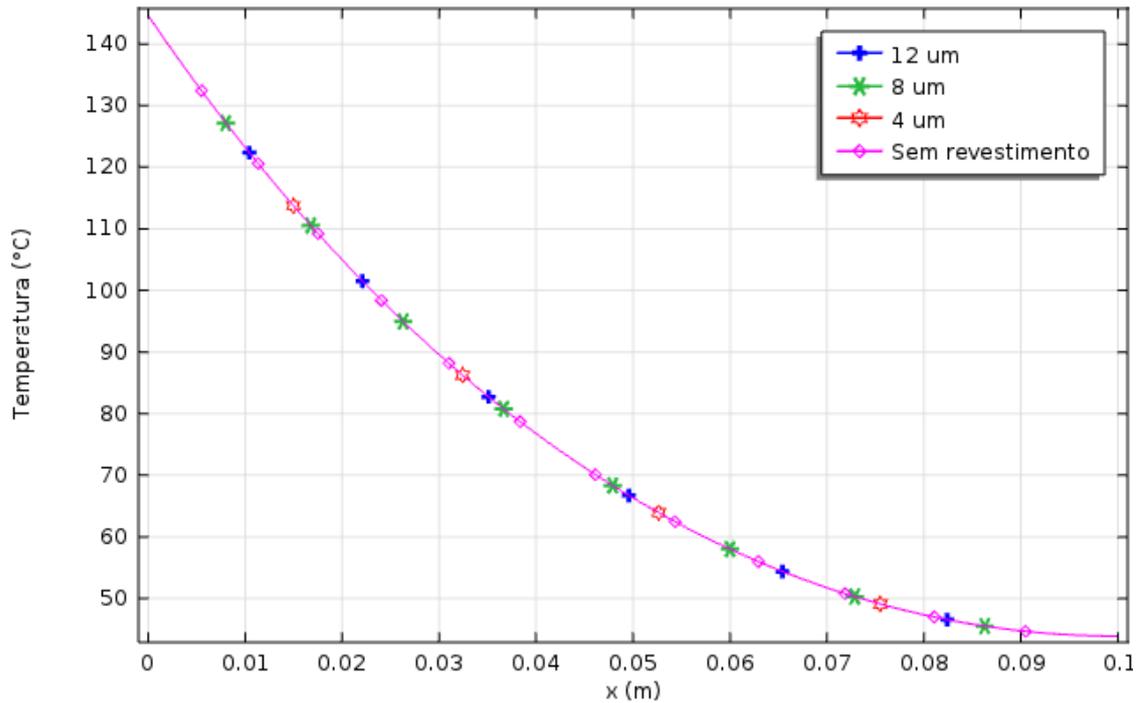
O efeito imediato do revestimento é aumentar a temperatura na “interface de corte” devido à resistência térmica provocada pelo revestimento. Entretanto a temperatura cai rapidamente ao longo da espessura do revestimento em direção ao substrato. Para espessura fina como de 0.125 [cm] a redução de temperatura fica na ordem de 2%, não produzindo efeitos de barreira térmica significativo.

#### 4.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA, EM MICRÔMETROS, DO REVESTIMENTO NA FERRAMENTA DE CORTE

O mesmo estudo realizado em 4.3 para espessuras em centímetros foi realizado para espessuras em micrometros.

Diferentemente da análise anterior, quando se estudou espessuras em micrometros por meios numéricos, os resultados não foram satisfatórios, uma vez que não existe diferença significativa de temperatura com ou sem revestimento, como mostra a Figura 20. O modelo térmico responde da mesma forma para revestimento na ordem de micrometros, uma vez que ele não produz barreira térmica significativa. Portanto nada se pode concluir pela simulação numérica realizada neste trabalho com relação da influência na temperatura do substrato em ferramentas com revestimentos na ordem de micrometros. Um dos motivos pode ser o não refinamento suficiente da malha assim como passo de tempo, que foi limitado devido ao computador utilizado para as simulações.

Figura 20 – Temperatura ao longo de x em t=300 [s] para diferentes espessuras de revestimento.



Fonte: As autoras (2019)

Oliveira (2015) realizou a mesma análise para fluxo constante e com resolução analítica. Ela concluiu que o revestimento mesmo que em micrometros também possui efeito imediato de aumentar a temperatura na interface de corte e posteriormente cai rapidamente, assim como foi observado no presente trabalho para espessuras em centímetros. Para espessuras muito finas na ordem de 1 [µm] a redução da temperatura foi inferior a 1%, não produzindo efeitos de barreira térmica, também concluído por Battaglia et al. (2004).

## CAPÍTULO V

### 5 CONCLUSÃO

Propôs-se neste trabalho o estudo da influência na redução da temperatura do substrato devido ao revestimento de nitreto de titânio em ferramentas de corte de torneamento, por meio de soluções numéricas obtidas pelo *COMSOL*. Para isso, validou-se o modelo térmico numérico com um modelo térmico analítico da literatura, posteriormente conclui-se que o *COMSOL* para esse trabalho se comportou melhor que o *ANSYS*. Fez-se estudo de malha e passo de tempo para melhor convergência dos resultados e por fim realizaram-se as simulações para as devidas comparações.

Uma das contribuições deste trabalho reside na complementação da literatura onde se descreveu a obtenção da solução numérica por meio do software *COMSOL*. Outra contribuição é o estudo do comportamento térmico de ferramenta revestidas usadas em processo de usinagem.

O *COMSOL* se mostrou eficiente para o modelo sem revestimento, trouxe resultados satisfatórios para camadas na ordem de centímetros, entretanto em análises de camadas na ordem de micrometros não é capaz de fornecer diferenças significativas na resposta devido às limitações de resolução da simulação numérica. Diferentemente da literatura que com resultados analíticos conseguiram estudar a influência térmica de revestimento de camadas muito finas.

Para espessuras na ordem de centímetros pode-se observar que o efeito imediato do revestimento é aumentar a temperatura em  $x = 0$ , posteriormente a temperatura cai ao longo da espessura. Quanto mais espesso o revestimento, menor vai ser a temperatura no substrato e maior a diferença de temperatura entre ferramenta revestida e não revestida.

## CAPÍTULO VI

### 6 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros propõe-se:

- Estudar a influência de outros materiais de revestimentos como foi realizado com o nitreto de titânio;
- Extensão para solução com múltiplas camadas de revestimento;
- Teste experimental para medir a temperatura na interface de corte;
- Realizar trabalhos similares para outros tipos de usinagem, como por exemplo, fresamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, H. C. **Modelagem e Simulação da Transferência de Calor em Alimentos com Forma Esferoidal Prolato. Estudo de Caso: Resfriamento e Congelamento de Banana.** 2016 114 f. Mestrado em Engenharia mecânica. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB.

AREIAS, L. M. A. **Simulação do campo térmico gerado por campos acústicos terapêuticos em meios biológicos.** 91 f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Biomédica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

BAHRAMI, A.; HELENBROOK, B. T.; VALENTINE, D. T.; AIDUN, D. K. Fluid flow and mixing in linear GTA welding of dissimilar ferrous alloys. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 93, p. 729-741, 2016.

BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W. A. **Temperatures in Metal Cutting.** In: Fundamentals of machining and machine tools. 3<sup>a</sup> ed. Boca Raton, USA: CRT, 1989.

BORELLI, J. E.; FRANÇA, C. A.; MEDEIROS, G. C. F.; GONZAGAD, A. Análise da temperatura na região de contato entre a peça e a ferramenta para o monitoramento de condições de usinagem de alto desempenho. In: **CONEM 2000. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.** 2000.

BRITO, R. F.; LIMA e SILVA, S. M. M.; FERREIRA, J. R.; CARVALHO, S. R. Thermal influence of coatings in the cutting tool life. In: **COBEM 2009. International Congress of Mechanical Engineering.** 2009.

CAPUTO, P. C. **Estudo comparativo entre a temperatura no torneamento convencional a seco por imagem termográfica e o modelo analítico de Triger e Chao.** 2016. 69 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora/MG, 2016.

CARVALHO, S. R. **Determinação do campo de temperatura em ferramentas de corte durante um processo de usinagem por torneamento.** 2005. 109 f. Doutorado em engenharia mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG.

CARVALHO, S. R.; LIMA e SILVA, S. M. M.; MACHADO, A. R.; GUIMARÃES, G. Comparison of inverse methods in the determination of heat flux and temperature in cutting tool during a machining process. **High Temperatures-High Pressures**, v. 38, n. 2, 2009.

CARVALHO, S. R.; LIMA e SILVA, S. M. M.; MACHADO, A. R.; GUIMARÃES, G. Temperature determination at the chip-tool interface using an inverse thermal model considering the tool and tool holder. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 179, n. 1-3, p. 97-104, 2006.

CARVALHO, S. R.; LIMA e SILVA, S. M. M.; PINHO, F. A. A.; MACHADO, A. R.; GUIMARÃES, G. Determinação da temperatura na interface cavaco-peça-ferramenta durante o processo de torneamento usando a técnica do simulated annealing. **Ciência Engenharia**, v. 1, p. 41-47, 2004.

CASTO, S. L.; VALVO, E.L.; PIACENTINI, M.; RUISI, V. F. Cutting temperatures evaluation in ceramic tools: experimental tests, numerical analysis and SEM observations. **CIRP Annals**, v. 43, n. 1, p. 73-76, 1994.

D'ERRICO, G. E. An adaptive system for turning process control based on tool temperature feedback. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 78, n. 1-3, p. 43-47, 1998.

DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia Da Usinagem Dos Materiais**.2<sup>a</sup>. Ed. São Paulo: Artiliber Editora, 2000.255 p.

EU-GENE, N. G. Measurement of tool/workpiece interface temperature when turning hardened tool steel with PCBN. **Final Year Project, The University of Birmingham, England**, 1995.

FERNANDES, A. P. **Função transferência analítica aplicada a solução de problemas inversos em condução de calor**. 2013. 170 f. Doutorado em engenharia mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG.

FERREIRA, D. C. **Análise Numérica da Influência Térmica dos Revestimentos em Ferramentas de Corte Usando o Programa COMSOL e Problemas Inversos**. 2017. 74 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

GOTTWEIN, K. Die Messung der Schneidentemperatur beim Drehen, *Maschinenbau-Betrieb*, Vol. 4, pp. 1129–1135. 1925.

HERBERT, E. G. The measurement of cutting temperatures. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 110, n. 1, p. 289-329, 1926.

HUANG, H. H. **Simulação da formação de cavacos usando FEM (Finite Element Method)-temperatura e força**. 2007. 121 f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos.

KASHANI, M. M.; MOVAHHEDY, M. R.; AHMADIAN, M. T.; RAZAVI, R. S. Analytical prediction of the temperature field in laser assisted machining. **Procedia CIRP**, v. 46, p. 575-578, 2016.

KLOCKE, F. A. E. G.; EISENBLÄTTER, G. Dry cutting. **Cirp Annals**, v. 46, n. 2, p. 519-526, 1997.

LIANG, L.; XU, H.; KE, Z. An improved three-dimensional inverse heat conduction procedure to determine the tool-chip interface temperature in dry turning. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 64, p. 152-161, 2013.

LIMA, F. R. S.; MACHADO, A. R.; GUIMARÃES, G.; GUTHS, S. Numerical and experimental simulation for heat flux and cutting temperature estimation using three-dimensional inverse heat conduction technique. **Inverse Problems in Engineering**, v. 8, n. 6, p. 553-577, 2000.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria das Usinagens dos Materiais**. 1ª ed, São Paulo, Brasil: Editora Blucher, 2009. 191 p.

OLIVEIRA, G. C. **Estudo do Desempenho Térmico de Ferramentas de Corte Revestidas a Partir da Obtenção da Solução Analítica de um Modelo Térmico de Condução de Calor 3D Transiente Dupla Camada**. 2019. 129 f. Doutorado em engenharia mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG.

OLIVEIRA, G. C. **Solução Analítica em Condução de Calor Multicamada: Aplicação em ferramentas revestidas.** 2015. 90 f. Mestrado em engenharia mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG.

RECH, J. Influence of cutting tool coatings on the tribological phenomena at the tool–chip interface in orthogonal dry turning. **Surface and Coatings Technology**, v. 200, n. 16-17, p. 5132-5139, 2006.

RECH, J.; BATTAGLIA, J. L.; MOISAN, A. Thermal influence of cutting tool coatings. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 159, n. 1, p. 119-124, 2005.

RIBEIRO, C. A. C.; FERREIRA, J. R.; NOVA, H. F. V.; CARVALHO, S. R.; BRITO, R. F.; LIMA e SILVA, S. M. M. Estimativa de fluxo de calor e temperatura numa ferramenta de corte usando técnicas de problemas inversos e *ANSYS CFX*®. In: **7th Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação.** 2013.

RIBEIRO, S.; FERNANDES, A. P.; CUNHA, D. F.; SILVA, M. B.; SHAN, J.; GUIMARÃES, G. Estimation of a Moving Heat Source due to a Micromilling Process Using the Modified TFBGF Technique. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2018, 2018.

SANTOS, M. R. **Modelo térmico para a solução de problemas inversos em transferência de calor com aplicação em um processo de usinagem por torneamento.** 2008. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

SANTOS, M. R.; LIMA E SILVA; S. M. M.; MACHADO, A. R.; SILVA, M. B.; GUIMARÃES, G.; CARVALHO, S. R. Analyses of effects of cutting parameters on cutting edge temperature using inverse heat conduction technique. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2014, 2014.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**, London: Oxford University Press. 1984.

SHORE, H. Thermoelectric measurement of cutting tool temperatures. **Journal of the Washington Academy of Sciences**, v. 15, n. 5, p. 85-88, 1925.

SILVA, S. C.; PEREIRA, M. C. V.; SILVA, M. F.; HOMEM, C. L. G.; COSTA, A. O. S.; COSTA Jr, E. F. Solução numérica do problema de condução de calor tridimensional transiente no processo de usinagem. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 1, p. 450-455, 2014.

STEPHENSON, D. A. Assessment of Steady-State Metal Cutting Temperature Models Based on Simultaneous Infrared and Thermocouple Data. **Journal of Engineering for Industry**, Vol. 113, pp. 121-128. 1991.

THOMPSON, B. IV. An inquiry concerning the source of the heat which is excited by friction. **Philosophical Transactions of the Royal society of London**, n. 88, p. 80-102, 1798.

TRENT, E. M. **Metal cutting**, 2º Ed, Butterworth & Co (Publishers).London, 1984.245 p.

TRENT, E. M.; Wright, P. K. **Metal Cutting**, 4th ed., Butterworth-Heinemann, Boston, USA. 2000. 464 p.

VELHO, H. F. C. Problemas inversos: conceitos básicos e aplicações. **Anais do Encontro de Modelagem Computacional. Mini-curso; Nova Friburgo**, p. 63-79, 2001.

YOUNG, H. T.; CHOU, T. L. Modelling of tool/chip interface temperature distribution in metal cutting. **International journal of mechanical sciences**, v. 36, n. 10, p. 931-943, 1994.

## ANEXO A – PASSO A PASSO PARA REALIZAR AS SIMULAÇÕES NO COMSOL

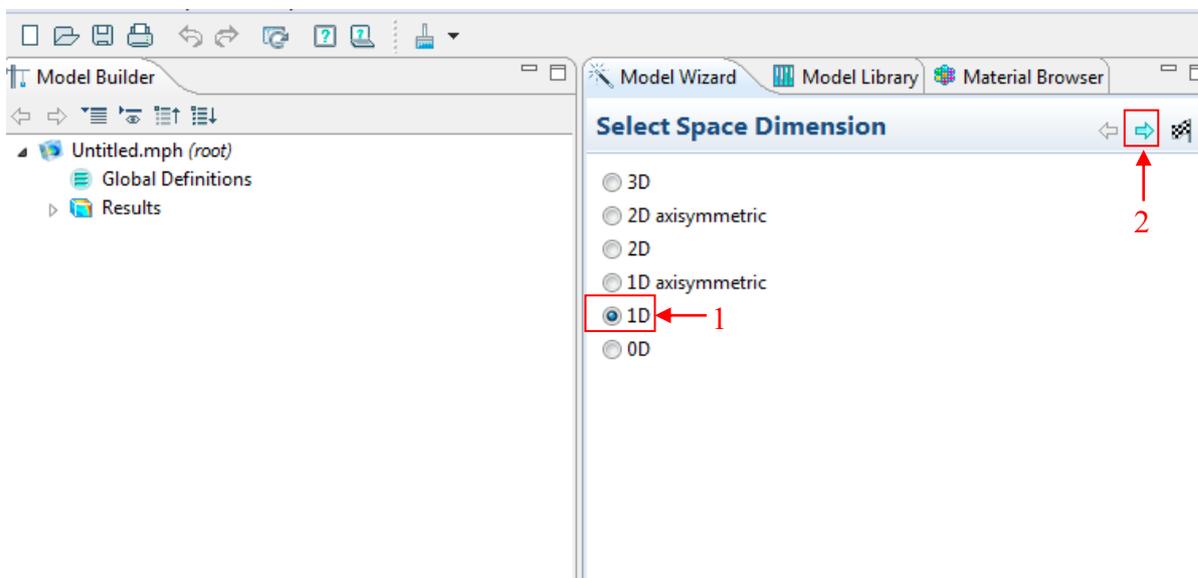
Para realizar as simulações desse trabalho no *COMSOL* é necessário seguir alguns passos que são descritos a seguir:

### A.1 DEFINIR A DIMENSÃO ESPACIAL DO PROBLEMA:

O primeiro passo é definir a dimensão espacial do problema, nesse caso, por se tratar de um problema unidimensional de condução de calor, foi selecionada a opção 1D.

Para passar para o próximo passo, basta clicar na seta azul apontando para direita, que está na parte superior direita da Figura 21.

Figura 21 – Interface *COMSOL*: selecionar a dimensão espacial do problema



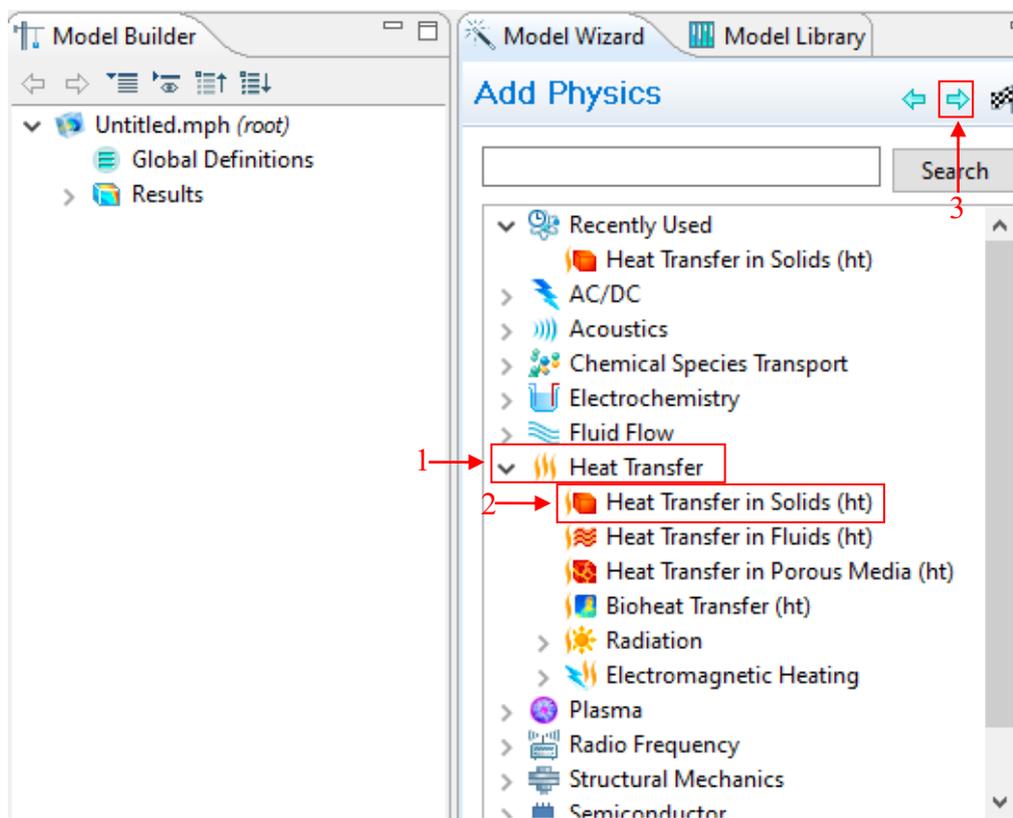
Fonte: As autoras (2019)

## A.2 DEFINIR A FÍSICA DO PROBLEMA:

No passo 2, como é mostrado na Figura 22, é selecionada a opção Heat Transfer (Transferência de calor) e em seguida a opção Heat Transfer in Solids (Transferência de calor em sólidos). Assim como no passo 1, para avançar para a etapa seguinte tem clicar na seta azul apontando para direita.

As próximas etapas são apenas para problemas de transferência de calor, se outra física fosse selecionada elas seriam diferentes

Figura 22 – Interface COMSOL: etapa de selecionar a física do problema

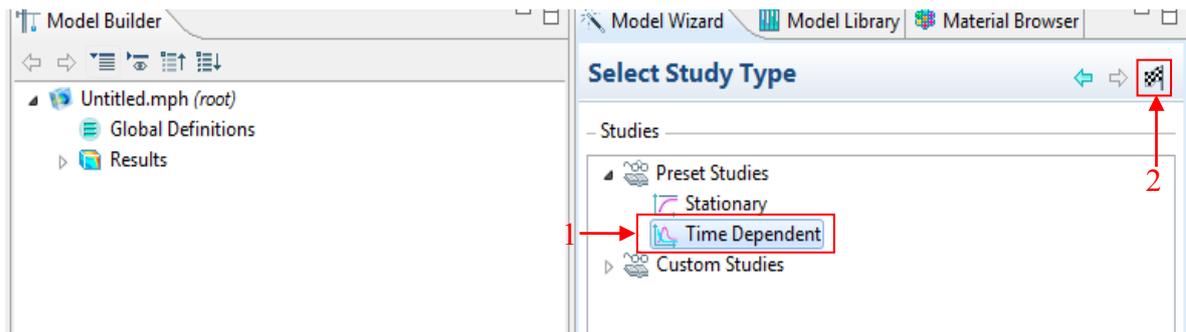


Fonte: As autoras (2019)

### A.3 SELECIONAR O TIPO DE ESTUDO:

É selecionado o estudo do tipo dependente do tempo e para avançar para a próxima etapa é necessário clicar na bandeira na parte superior da Interface, Figura 23.

Figura 23 – Interface *COMSOL*: etapa de selecionar o tipo de estudo

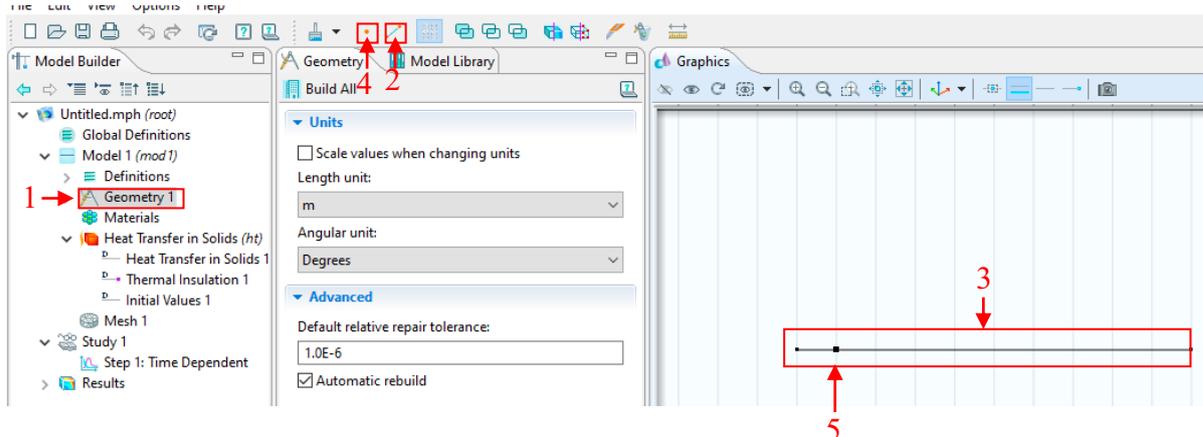


Fonte: As autoras (2019)

### A.4 DEFINIR A GEOMETRIA DO PROBLEMA:

Para essa etapa, deve-se primeiro selecionar a opção *Geometry* no menu na parte esquerda, em seguida selecionar a opção *Draw Interval* na parte superior da interface e desenhar. Para fazer a divisão entre as camadas, selecione a opção *Draw Point* e desenhe um ponto no local desejado. Esses passos estão representados na Figura 24.

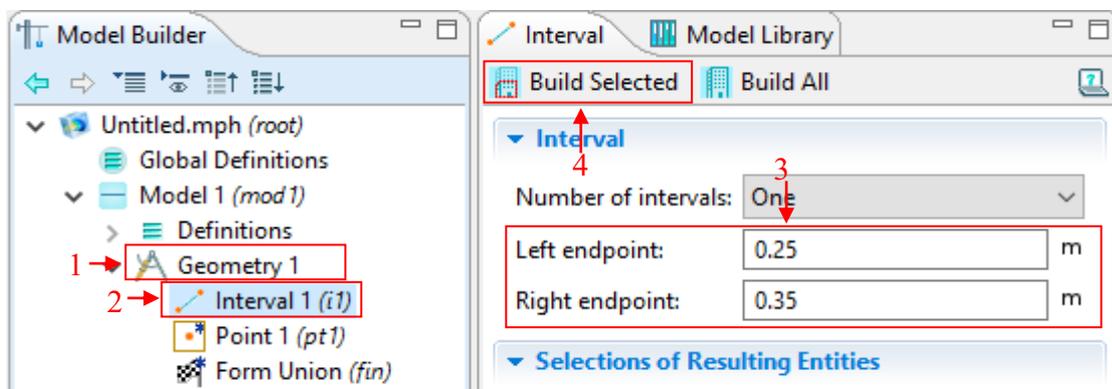
Figura 24 – Interface COMSOL: Definir a geometria do problema



Fonte: As autoras (2019)

Para modificar o comprimento da linha, nesse caso da ferramenta, tem que selecionar: *Geometry* → *Interval* e modificar o ponto de início e fim da linha e depois clicar em *Build Selected* para que as alterações sejam aplicadas, como é mostrado na Figura 25.

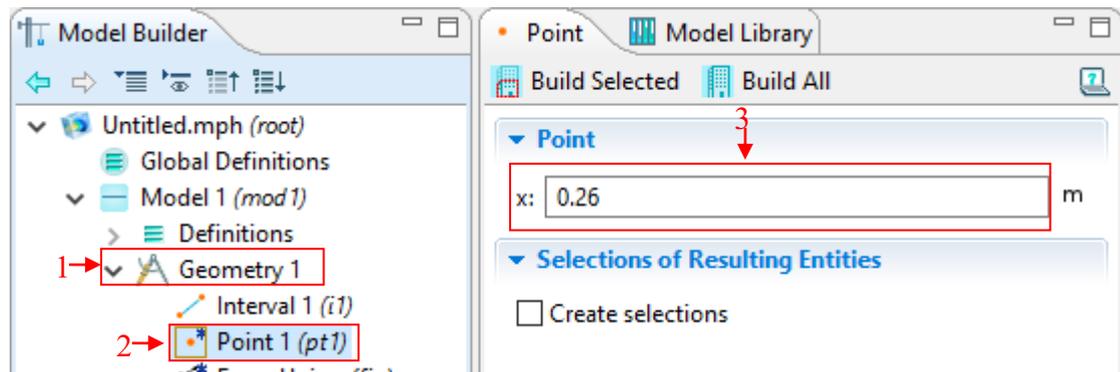
Figura 25 – Interface COMSOL: Definir a geometria do problema – modificando o comprimento do modelo



Fonte: As autoras (2019)

Para modificar o comprimento da camada tem que mudar o posicionamento do ponto, para isso tem que selecionar: *Geometry* → *Point* e modificar sua posição. Para que as alterações sejam aplicadas, clicar em *Build Selected*, como é mostrado na Figura 26.

Figura 26 – Interface COMSOL: Definir a geometria do problema – modificando o comprimento da camada

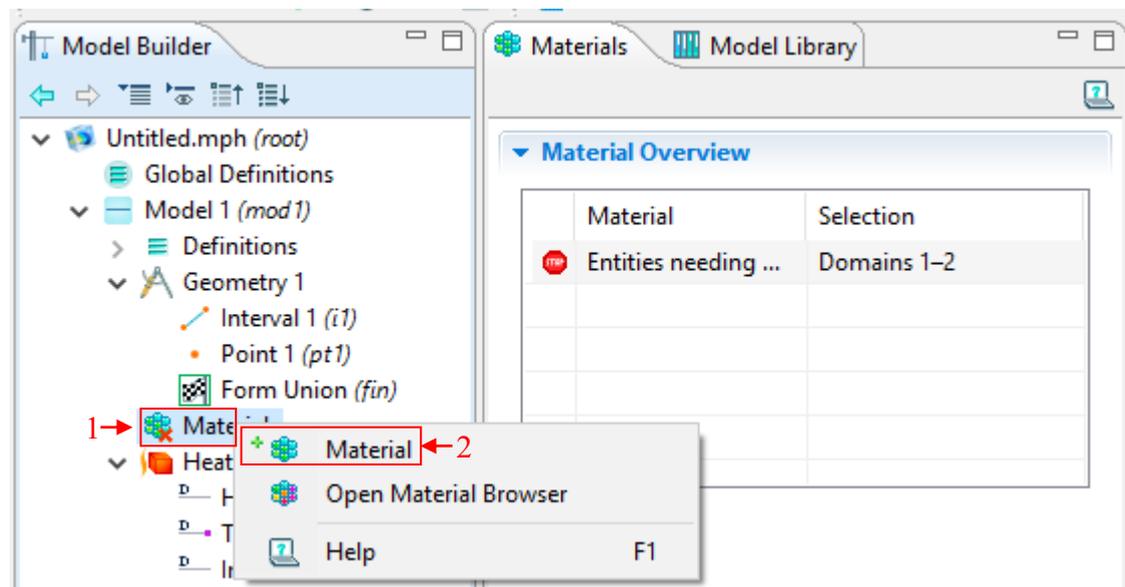


Fonte: As autoras (2019)

## A.5 ADICIONAR OS MATERIAIS E SUAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS:

Primeiro deve-se clicar com o botão direito do mouse em *Material* no menu e selecionar a opção *Material* que aparecerá, conforme é mostrado na Figura 27

Figura 27– Interface COMSOL: Adicionar o material

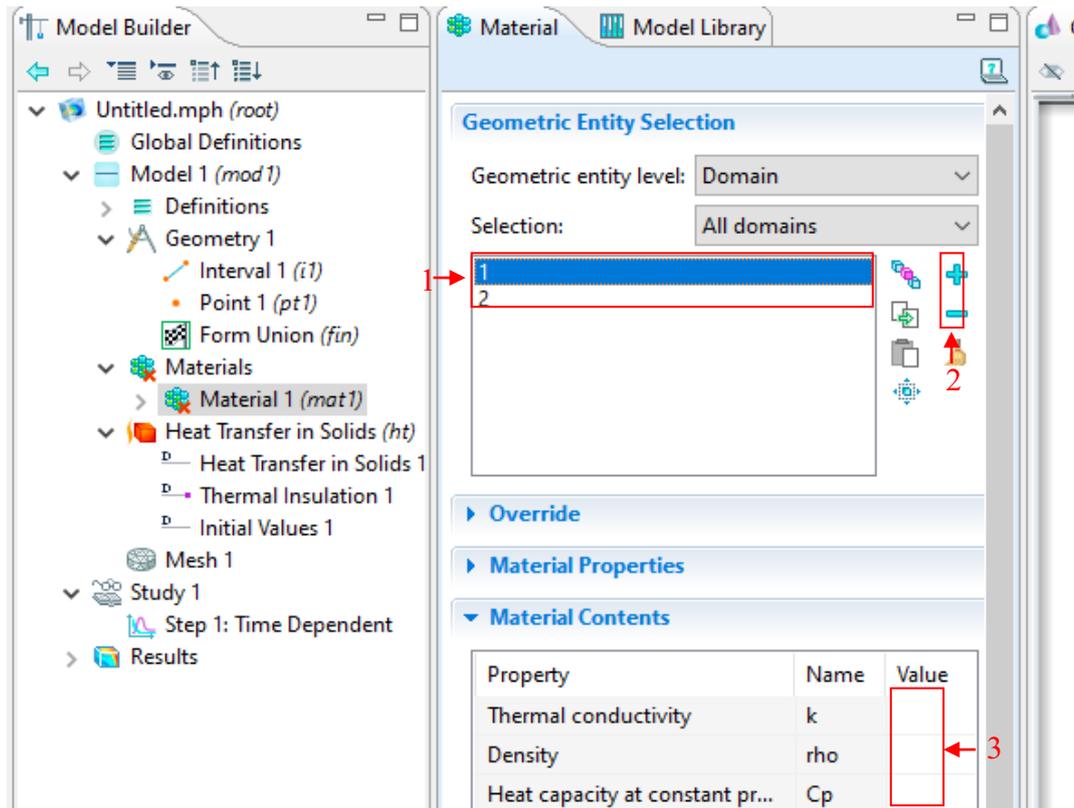


Fonte: As autoras (2019)

Após, escolhe-se a camada que será adicionada as propriedades termofísicas, se é a camada 1 ou 2, e a outra é excluída. Então se deve inserir os valores solicitados. Como é mostrado na Figura 28.

Esse procedimento deve ser repetido para cada material ou camada.

Figura 28 – Interface *COMSOL*: Adicionar as propriedades do material

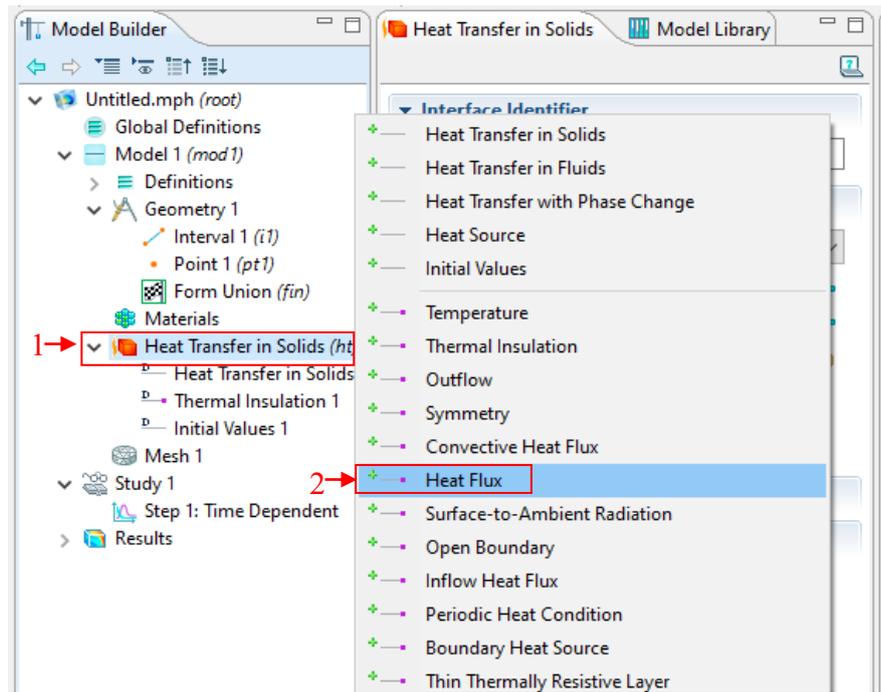


Fonte: As autoras (2019)

## A.6 INSERIR OS DADOS DE FLUXO DE CALOR, TEMPERATURA INICIAL E AS SUPERFÍCIES ISOLADAS.

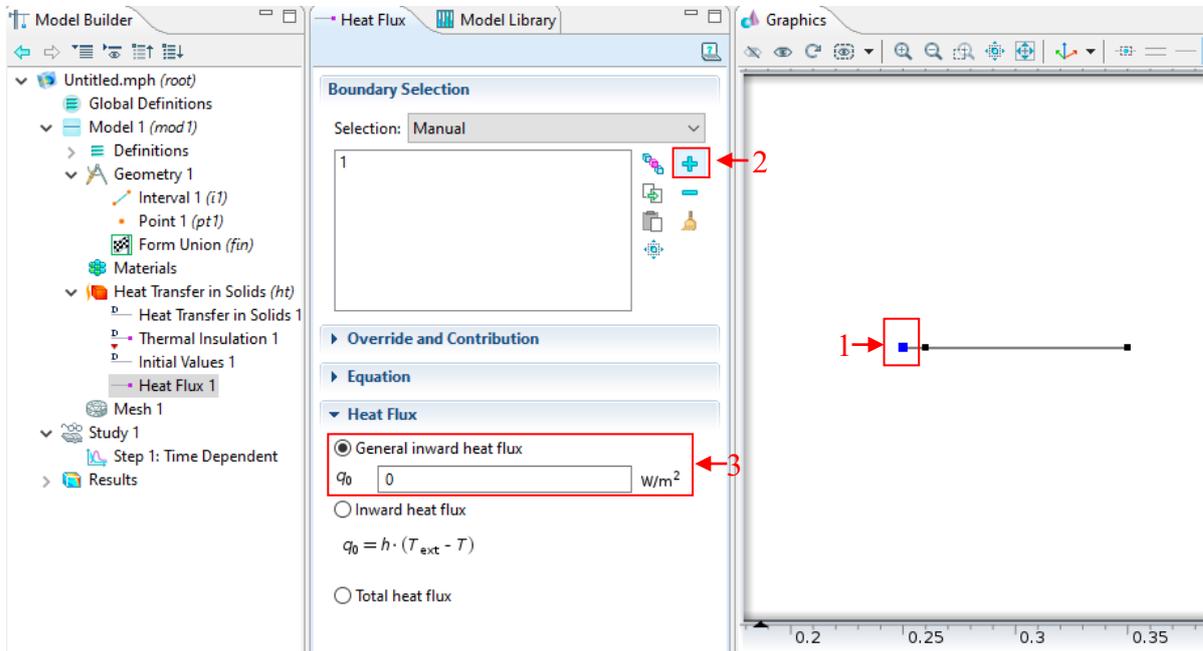
Primeiro é necessário adicionar a opção *Heat Flux* no menu à esquerda, como na Figura 29. E então, selecionar a superfície que estará localizado o fluxo de calor e adicionar o seu valor como na Figura 30.

Figura 29 – Interface COMSOL: Inserir o fluxo de calor.



Fonte: As autoras (2019)

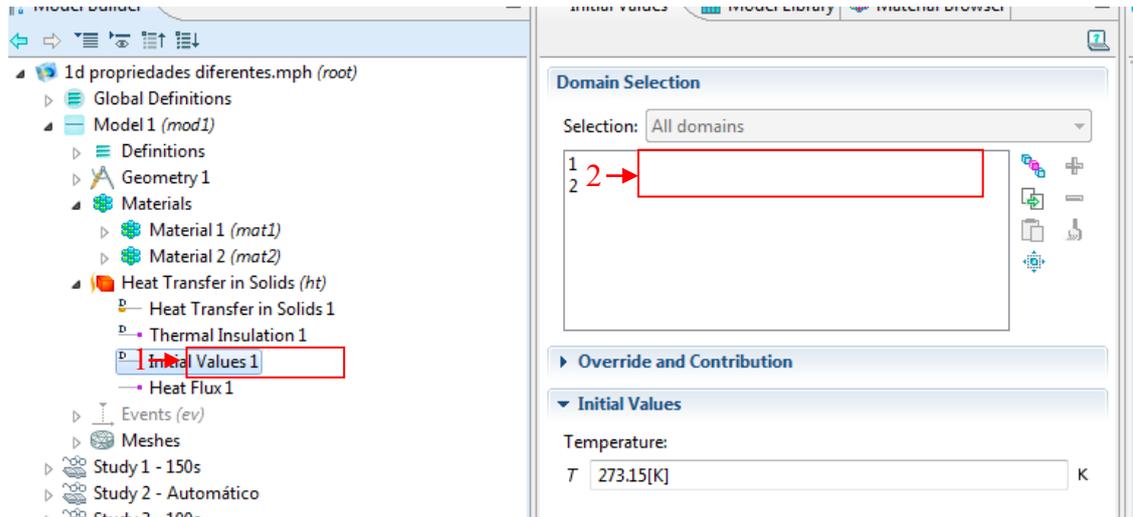
Figura 30 – Interface COMSOL: Inserir o valor do fluxo de calor.



Fonte: As autoras (2019)

Após inserir o valor do fluxo de calor, pode-se inserir o valor da temperatura. Para isso, como mostra a Figura 31, tem que clicar em *Initial value* no menu à esquerda e então inserir o valor no campo *Temperature*.

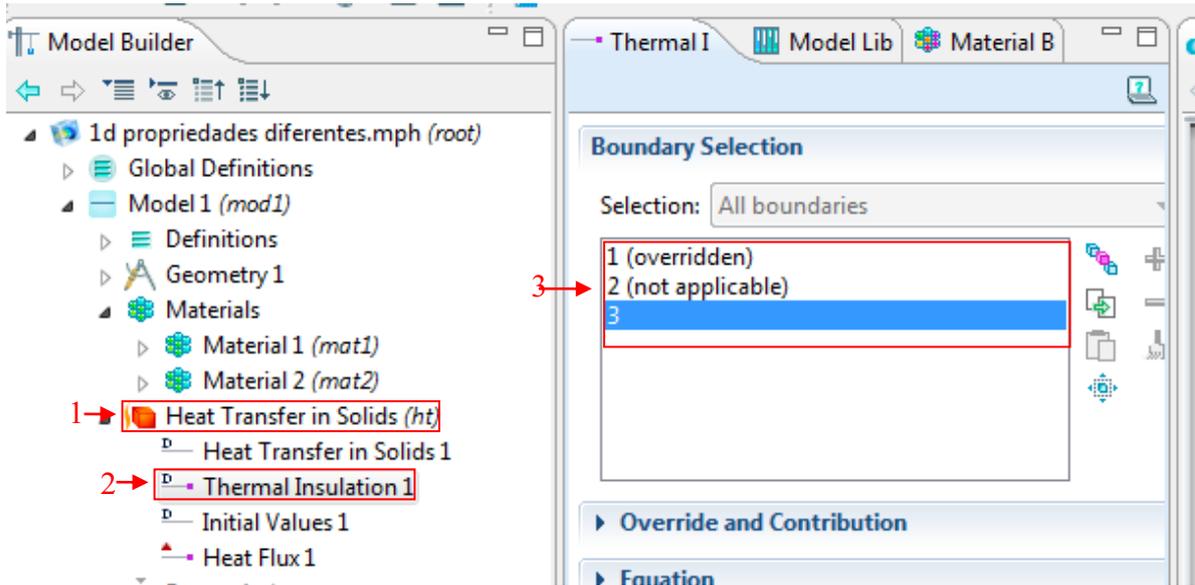
Figura 31– Interface *COMSOL*: Inserir temperatura inicial



Fonte: As autoras (2019)

Para verificar quais superfícies estão isoladas termicamente, basta selecionar *Heat Transfer in Solids* → *Thermal Insulation* (Figura 32).

Figura 32 – Interface COMSOL: Definir superfícies isoladas termicamente



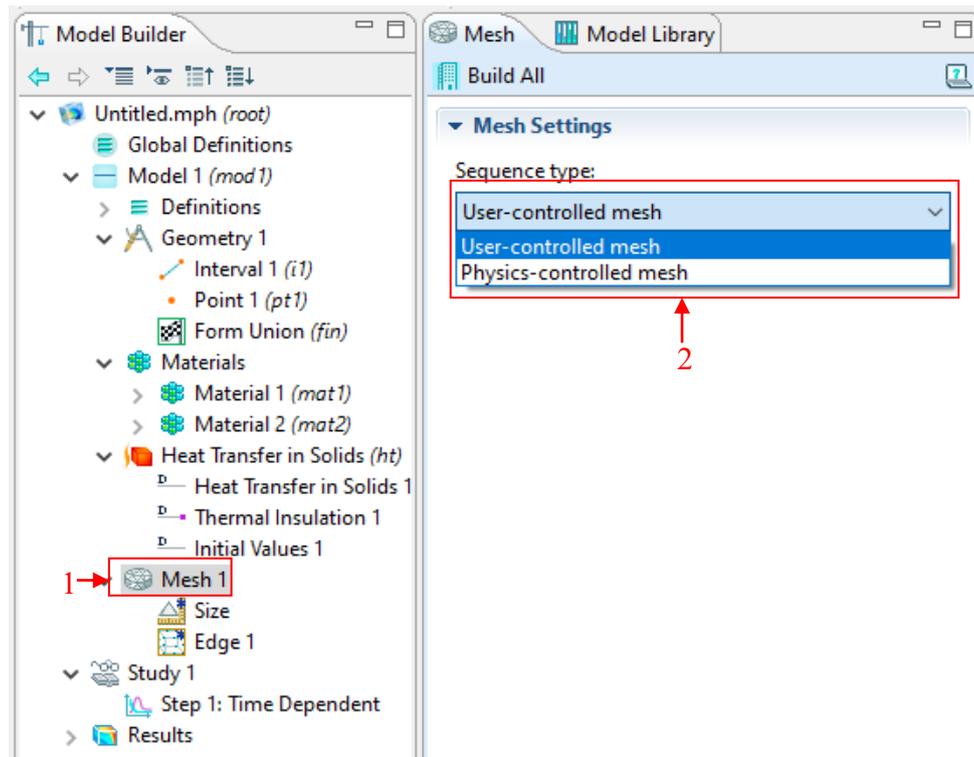
Fonte: As autoras (2019)

#### A.7 DEFINIR A MALHA:

Para definir a malha, primeiro deve-se clicar em *Mesh* no menu à esquerda e então a opção *User-controlled Mesh*, como mostra a Figura 33.

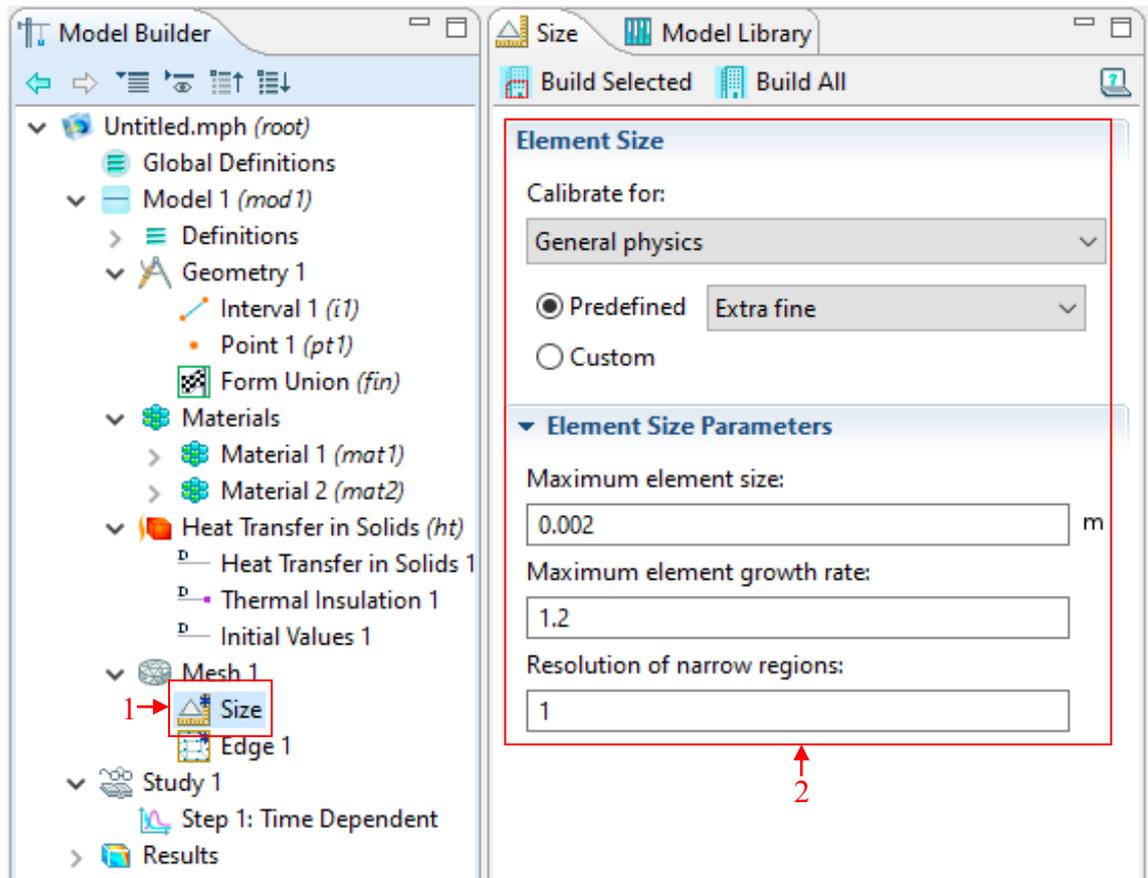
Ao fazer isso aparecerá a opção *Size* no menu à esquerda. Selecione essa opção e mude os parâmetros como desejar, como está na Figura 34.

Figura 33 – Interface *COMSOL*: Definição da malha



Fonte: As autoras (2019)

Figura 34 – Interface COMSOL: Definir o tamanho dos elementos da malha



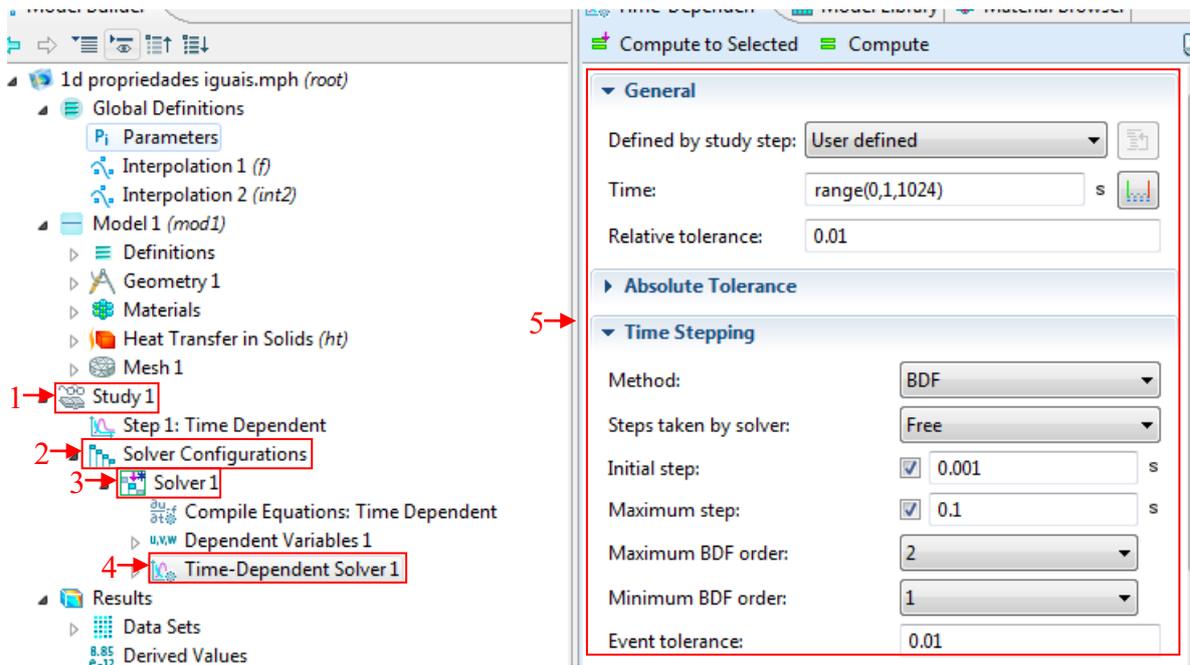
Fonte: As autoras (2019)

## A.8 DEFINIR PASSO DE TEMPO:

Para definir o passo de tempo, como mostra a Figura 35, é necessário selecionar: *Study* → *Solver configurations* → *Solver* → *Time dependent solver* e definir o passo de tempo como desejar.

Se a opção *Solver configurations* não estiver disponível, clique com o botão direito em *Study* e selecione a opção *Show Default Solver*.

Figura 35 – Interface *COMSOL*: Definir o passo de tempo

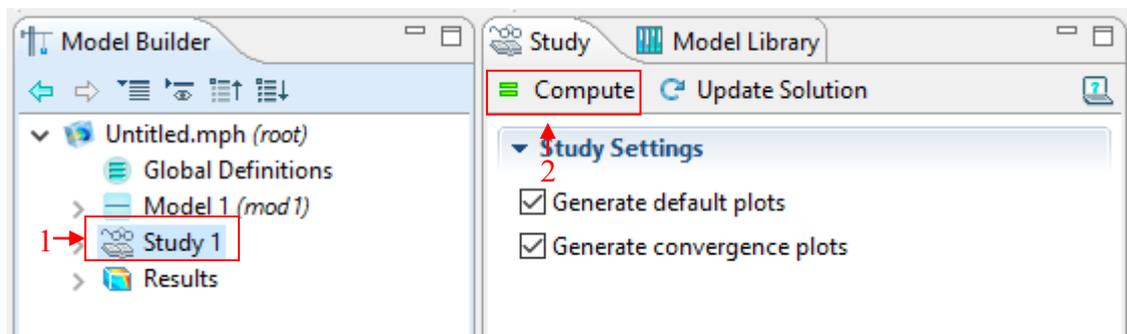


Fonte: As autoras (2019)

## A.9 CALCULAR OS RESULTADOS:

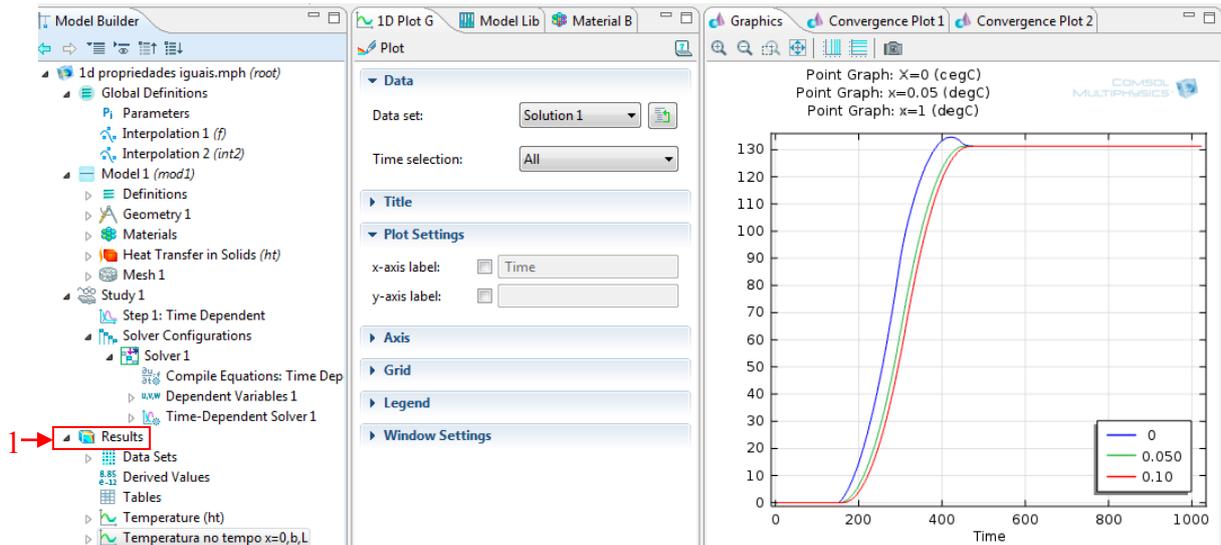
Para calcular os resultados, como mostra a Figura 36, tem que selecionar *Study* → *Compute*. Os resultados estão na opção *Results*, na Figura 37.

Figura 36– Interface *COMSOL*: Calcular os resultados



Fonte: As autoras (2019)

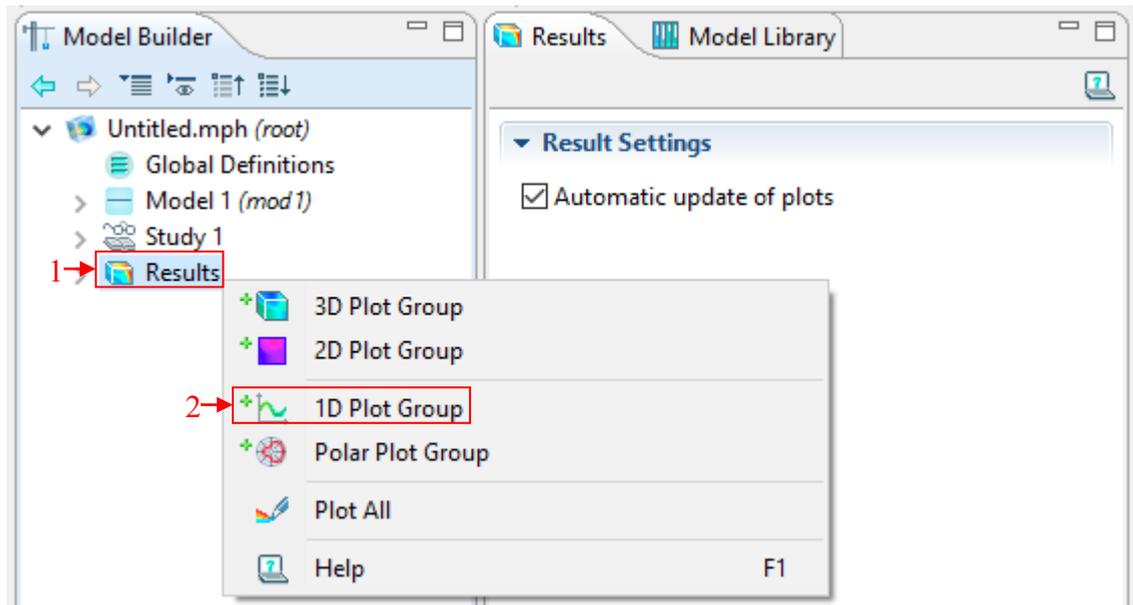
Figura 37– Interface *COMSOL*: Resultados



Fonte: As autoras (2019)

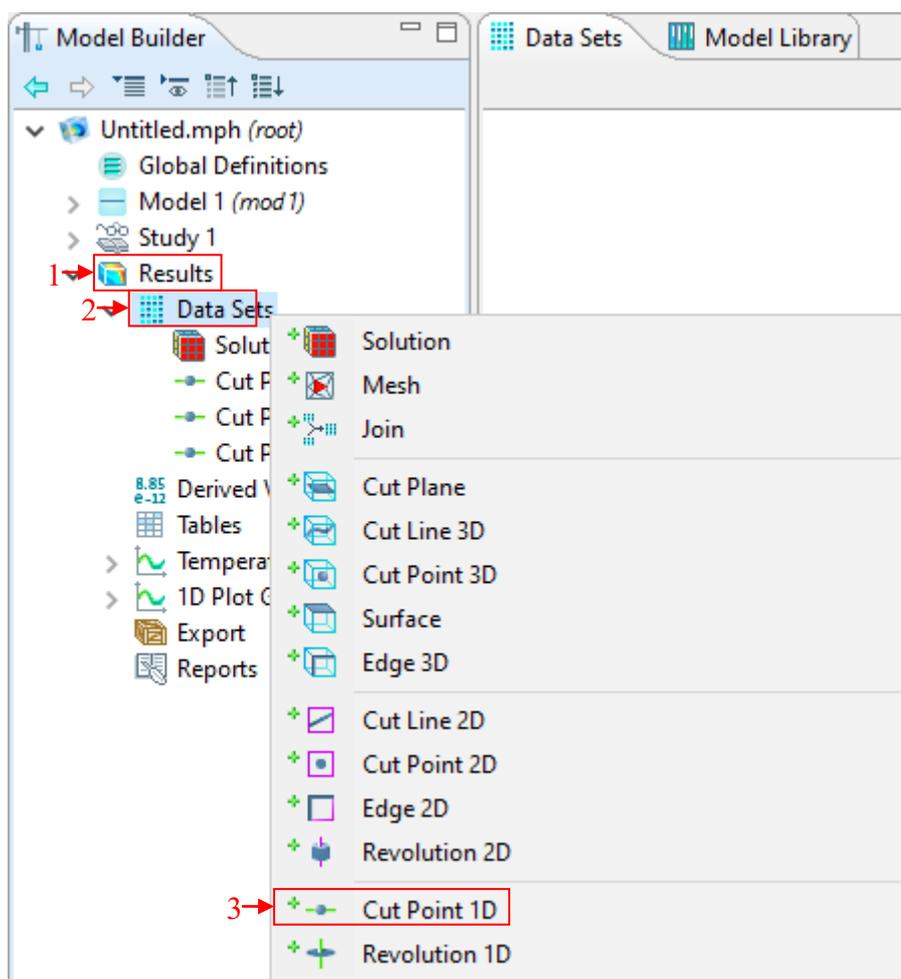
Para plotar a temperatura em cada camada em cada instante de tempo, tem que clicar com o botão direito em *Results* e selecionar a opção *1D Plot Group*, Figura 38. Após selecionar *Results* e clicar com o botão direito *Data sets* e selecionar *Cut Point 1D*, Figura 39. Então, definir as coordenadas do Cut Point, que é a coordenada que aparecerá no gráfico, Figura 40. O procedimento das Figuras 39 e 40 deve ser repetido para cada camada que deve aparecer no gráfico. Feito isso, clicar com o botão direito *1D Plot Group* e selecionar a opção *Point Graph*, Figura 41. Selecionar essa opção que foi adicionada e acrescentar os *Cut Points* que devem aparecer no gráfico, clicar em *Plot* para gerar os gráficos, Figura 42.

Figura 38 – Interface COMSOL: Criar 1D plot group



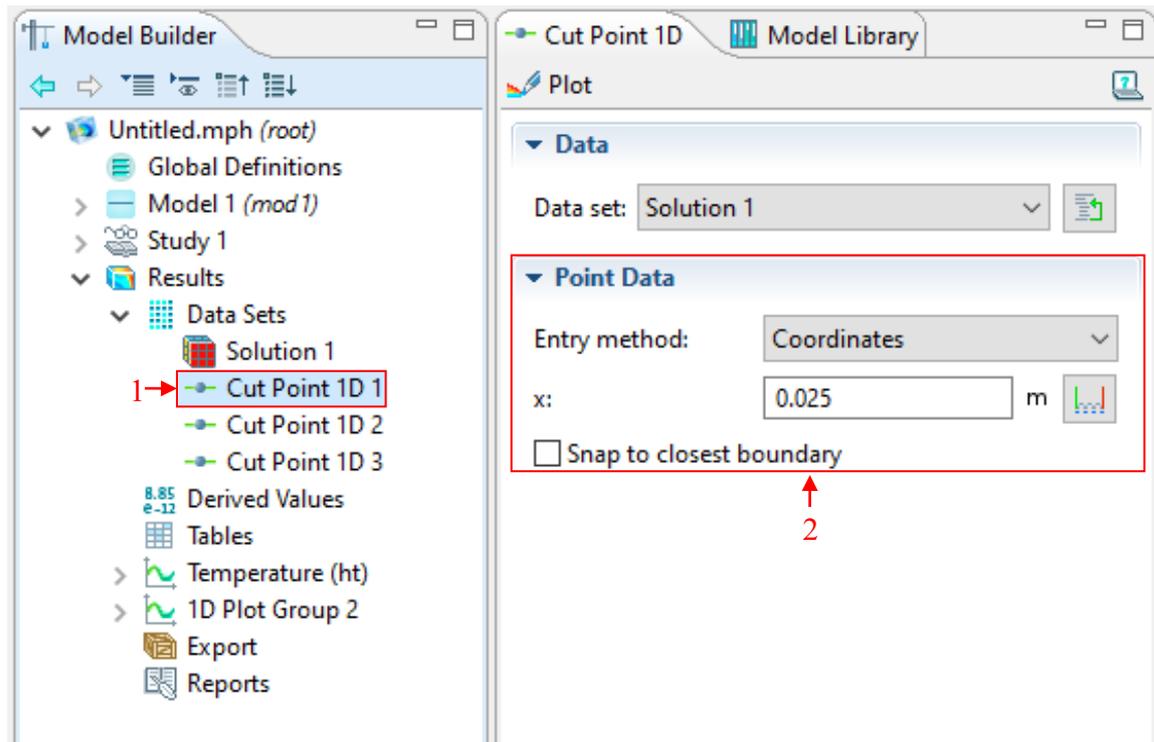
Fonte: As autoras (2019)

Figura 39 – Interface COMSOL: Criar Cut point 1D para selecionar os pontos que aparecerão no gráfico.



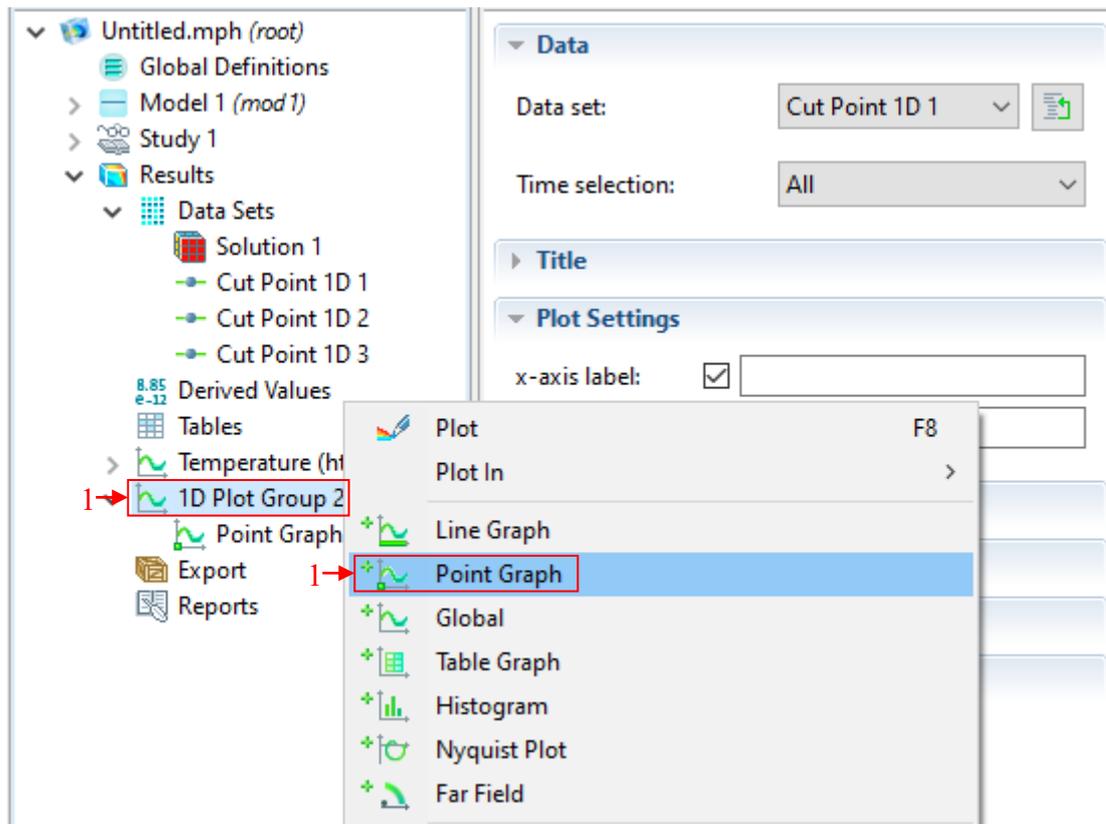
Fonte: As autoras (2019)

Figura 40 – Interface COMSOL: Definir a coordenada do Cut point 1D



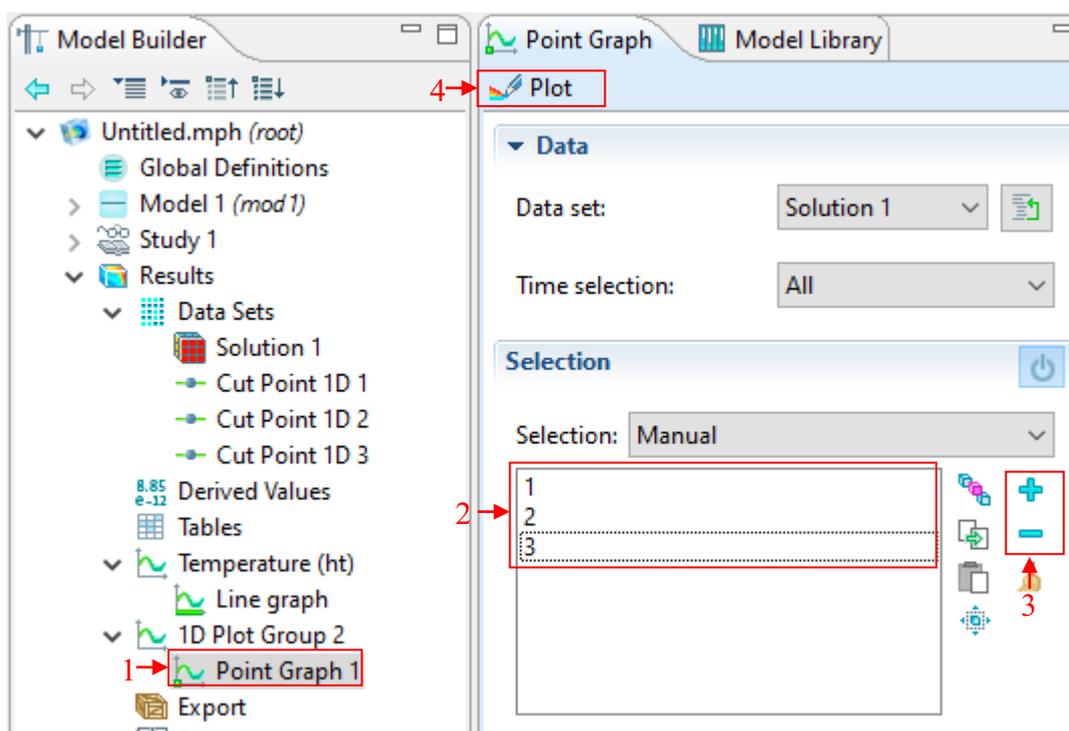
Fonte: As autoras (2019)

Figura 41 – Interface *COMSOL*: Criar Point Graph



Fonte: As autoras (2019)

Figura 42 – Interface COMSOL: Selecionar os pontos que aparecerão no gráfico e plotar o gráfico



Fonte: As autoras (2019)