

ESTUDO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR USANDO O ABAQUS 6.12 STUDENT EDITION – CHAMINÉ COM VARIAÇÃO DE TEMPERATURA INTERNA E EXTERNA

1. INTRODUÇÃO

1.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA:

O Método dos Elementos Finitos aplicado à solução de problemas de campo

Durante o processo de solução de muitos problemas em Engenharia recai-se na solução de problemas de campos potenciais. Tais campos são governados pelas equações de Laplace e Poisson, podendo citar entre eles os problemas de condução de calor, distribuição do potencial elétrico ou magnético, fluxo em meios porosos, fluxo irrotacional de fluidos ideais, torção de barras prismáticas além de outros. Este tipo de problemas obedece a seguinte equação:

$$\nabla \cdot \nabla \phi \equiv 0$$

onde o escalar Φ é conhecido como potencial escalar. Tal campo é conhecido como campo conservativo e, portanto, teremos:

$$\nabla \cdot \nabla \phi \equiv \nabla^2 \phi \equiv 0$$

Que demonstra que tal potencial escalar satisfaz a equação de Laplace. O estudo de campos de fluidos incompressíveis irrotacionais e campos gravitacionais são dois fenômenos para os quais o desenvolvimento acima, envolvendo a solução da equação de Laplace se aplica e trataremos de estudar um deles em detalhes: o problema de condução de calor em regime estacionário.

Com relação às condições de contorno que podem aparecer em problemas potenciais, podemos subdividi-las em Condições de Contorno de Dirichlet, Neumann e Cauchy, ou ainda, de primeira, segunda e terceira espécie, respectivamente. Para problemas submetidos a condições de

contorno de Dirichlet, o valor do potencial é especificado na fronteira ∂B , ou seja:

$$\Phi = g \text{ em } \partial B$$

A especificação da voltagem no contorno no caso de um campo de condução elétrica e da temperatura no caso de um campo de condução de calor são exemplos desta condição de contorno. Na condição de contorno de Neumann a derivada normal do potencial é especificada no contorno, ou seja:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = p \quad \text{em} \quad \partial B$$

Condição de contorno cinemática de um campo de fluidos, no qual a componente normal da velocidade do fluido na fronteira deve ser igual à velocidade da fronteira é um exemplo da condição de contorno de Neumann. A condição de contorno de Cauchy ocorre quando o potencial e sua derivada normal obedecem a uma relação na forma:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} + \alpha \phi = -q \quad \text{em} \quad \partial B$$

Tipicamente, esta condição ocorre quando existe uma camada resistente no contorno, como, por exemplo, quando existe uma camada metálica na fronteira no problema de condução de calor.

Problema da transferência de calor

Estamos interessados em determinar a distribuição de temperatura em um determinado sólido B . Em geral, as equações que governam a distribuição de temperaturas, tensões e deformações são acopladas, quer dizer, estas variáveis estão inter-relacionadas e devem ser determinadas simultaneamente. No entanto, em numerosos problemas práticos, a influência da tensão e deformação na distribuição de temperaturas é bastante pequena e geralmente pode ser deixada de lado. Desta maneira, quando da análise de um problema de tensões-deformações com efeitos térmicos, podemos como primeiro passo determinar, independente de outras variáveis a temperatura considerando o sólido como rígido. O segundo passo consistirá em determinar a distribuição de

tensões e deformações no sólido quando submetido aos efeitos mecânico e térmico, sendo este último já conhecido.

Mecanismos de transferência de calor

Antes de abordarmos o problema de transferência de calor, devemos nos recordar que a energia calorífica se transfere de uma partícula para outra de uma certa matéria quando estas se encontram a diferentes temperaturas. Estas duas partículas podem ou não fazer parte de um mesmo sólido ou de um mesmo fluido, dependendo do sistema considerado. Teoricamente neste sistema deveríamos incluir não apenas o corpo em estudo, mas também todo o meio que o rodeia. Do ponto de vista prático, sempre será possível detectar uma região fechada de forma que a influência de todo o meio exterior possa ser deixada de lado. O mecanismo através do qual a transferência de calor se realiza entre as partículas depende da natureza (material) do sistema assim definido e mais especificamente da característica do material e do meio ambiente em que estas partículas se encontram. Podemos assim distinguir 3 modos de transferência de calor: condução, radiação e convecção.

Condução: entre duas partículas de um corpo sólido que estão a diferentes temperaturas, o calor se transfere através de condução, processo que tem lugar a nível atômico e molecular. A lei linear de condução de calor será dada por:

$$q = -K.\Delta.\theta$$

onde:

K é o tensor de condutividade térmica;

Φ é o operador gradiente;

Θ é a temperatura;

q é o vetor fluxo de calor.

Em particular, a densidade de fluxo por unidade de superfície de normal n será dada por:

$$q = q.n = -K.\Delta.\theta.n$$

Sendo que $q(P)$ nos indica a quantidade de calor que passa no ponto P por unidade de superfície orientada segundo a normal n . Observa-se que se $q(P) < 0$ indica que está sendo retirada energia calorífica da parte do corpo limitado pela superfície normal. Esta lei foi estabelecida por Fourier baseada em observações elementares e atualmente podemos obtê-la por aplicação dos Princípios da Termodinâmica;

Radiação: se as partículas que trocam calor estiverem separadas por vácuo, a transferência de calor não poderá se realizar através de condução, mas sim por radiação. Se as partículas estão separadas por um meio material também ocorrerá radiação, porém se este meio é um sólido ou um fluido esta radiação é desprezível. Já não ocorre o mesmo se o meio é um gás quando a transferência de calor por radiação pode ser importante. Algumas exceções ocorrem em sólidos como o quartzo e o vidro.

Convecção: Como vimos, em um fluido a transferência de calor se produz através dos mecanismos de condução e radiação, sendo em geral, o primeiro mecanismo predominante. Porém, se o fluido está em movimento ocorre um incremento na transferência de calor em virtude de porções deste fluido estarem a diferentes temperaturas mesmo que suficientemente próximas. Quando o movimento do fluido se deve exclusivamente à diferença de densidade pela diferença de temperatura, o processo é chamado convecção natural. Se o movimento do fluido se efetua por outro mecanismo, se chama convecção forçada.

Condução de calor em regime estacionário

Seja um corpo ocupando a região limitada e regular B do espaço euclidiano tridimensional pontual ξ , com densidade de energia calorífica r por unidade de volume prescrita ao corpo por radiação, com temperatura prescrita θ na fronteira ∂B com densidade de fluxo de calor q prescrita ao corpo por unidade de superfície ∂B .

Pretende-se encontrar o campo de temperaturas q para o qual:

$$\begin{cases} \operatorname{div} \mathbf{q} = \mathbf{r} & \text{em } B \\ \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} = \bar{q} & \text{em } \partial B - \partial B_{\theta} \\ \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} = q & \text{em } \partial B_{\theta} \end{cases}$$

Onde é válida a seguinte equação constitutiva:

$$\mathbf{q} = -K\nabla\theta$$

Determinação do campo de temperaturas

Pretende-se com este exemplo estudar a variação de temperatura em uma chaminé industrial constituída de um material que possui condutividade térmica de $k=1.4\text{W/m.K}$, como mostra a figura abaixo. A temperatura interna é $T_g=100^{\circ}\text{C}$ enquanto a temperatura externa é $T_a=30^{\circ}\text{C}$ com um coeficiente $h=20\text{W/m}^2.\text{K}$.

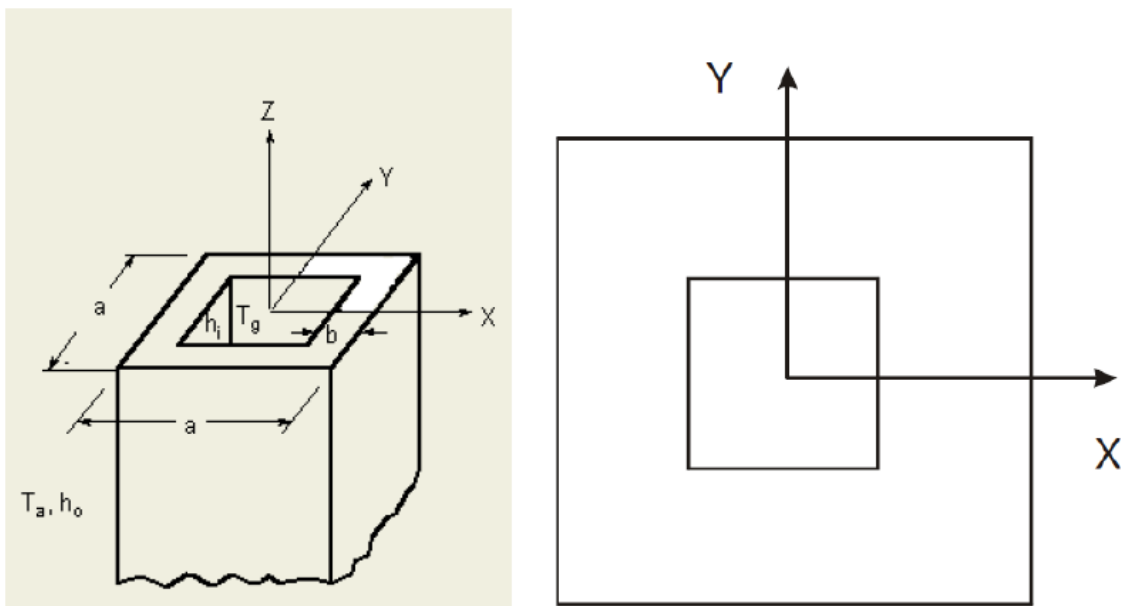


Figura 1. Esquema da chaminé a ser analisada

1.2. PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS

Como na figura:

$$a = 0.6 \text{ m}$$

$$b = 0.2 \text{ m}$$

1.3. PROPRIEDADES DO MATERIAL

Condutividade térmica = $k = 1.4 \text{ W/m.K}$

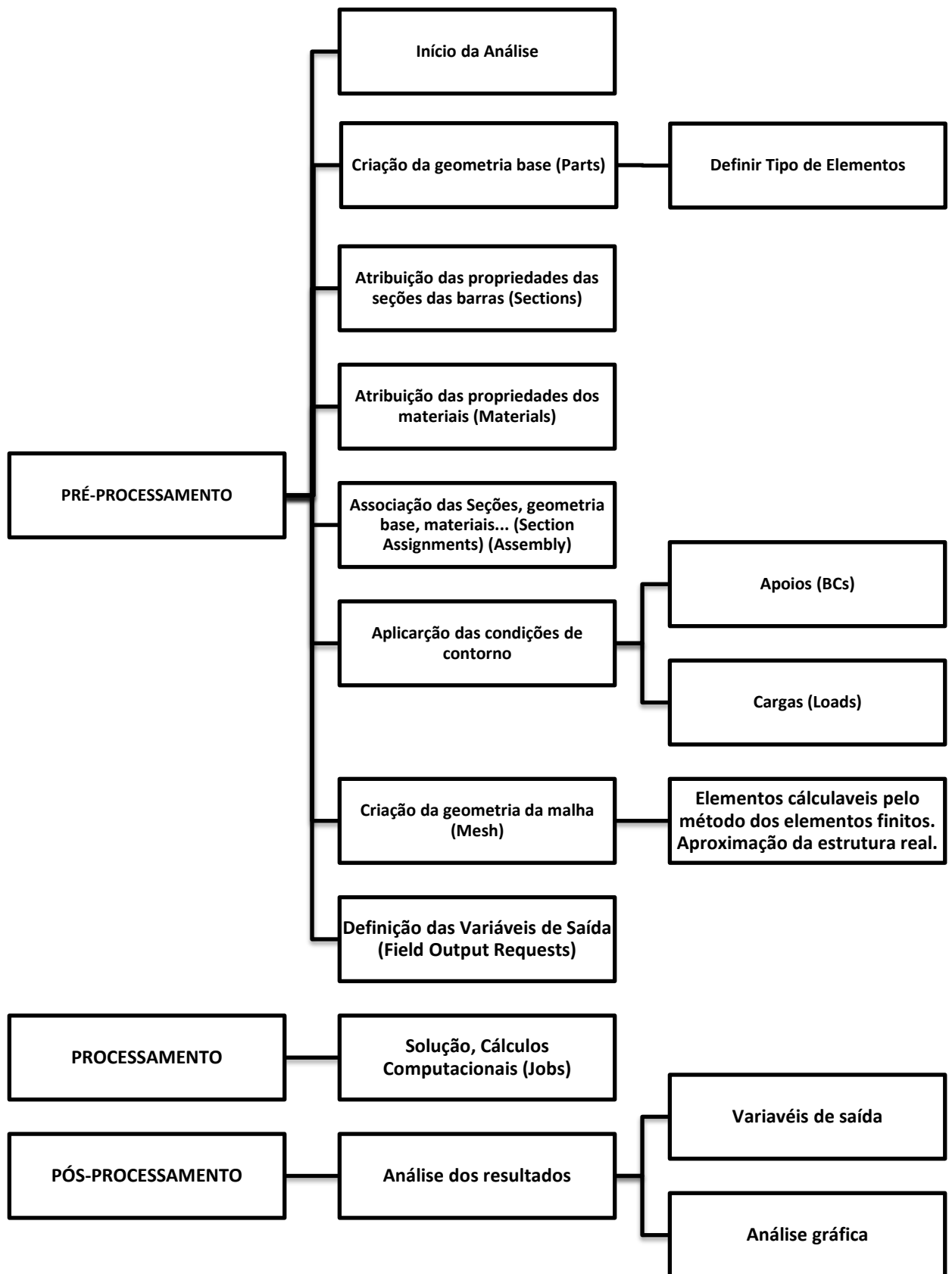
Coefficiente de transferência térmica = $h_o = 20 \text{ W/m}^2.\text{K}$

Temperatura interna = $T_g = 100^\circ\text{C} = 373.15 \text{ K}$

Temperatura externa = $T_a = 30^\circ\text{C} = 303.15 \text{ K}$

2. RESOLUÇÃO

O procedimento de resolução pode ser demonstrado no seguinte fluxograma (a ordem pode eventualmente ser quebrada em pontos específicos por conveniência):

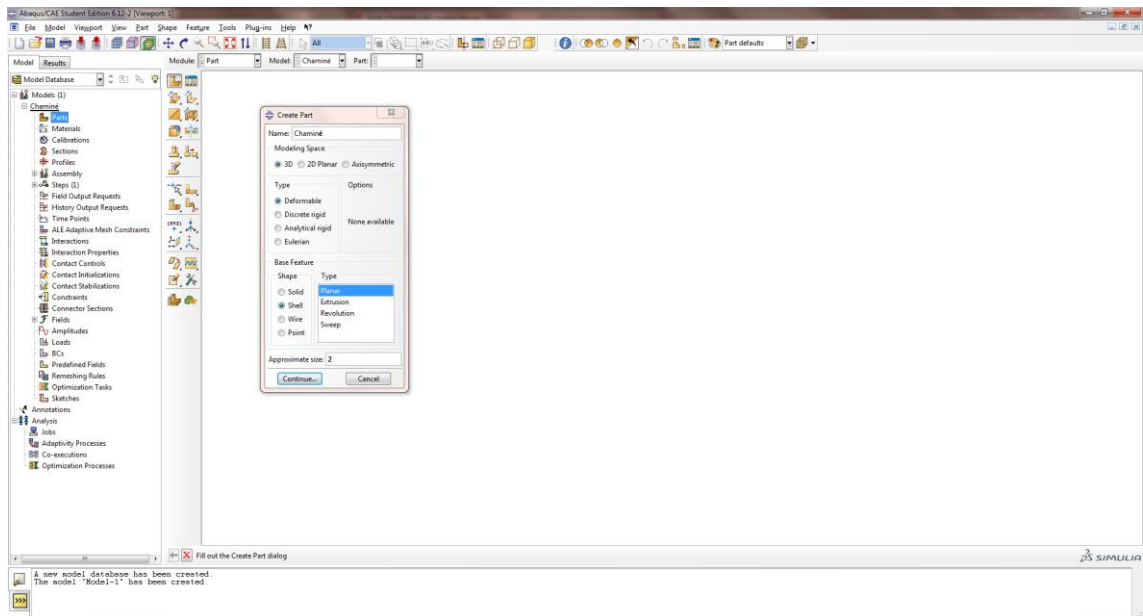


2.1. INÍCIO DA ANÁLISE

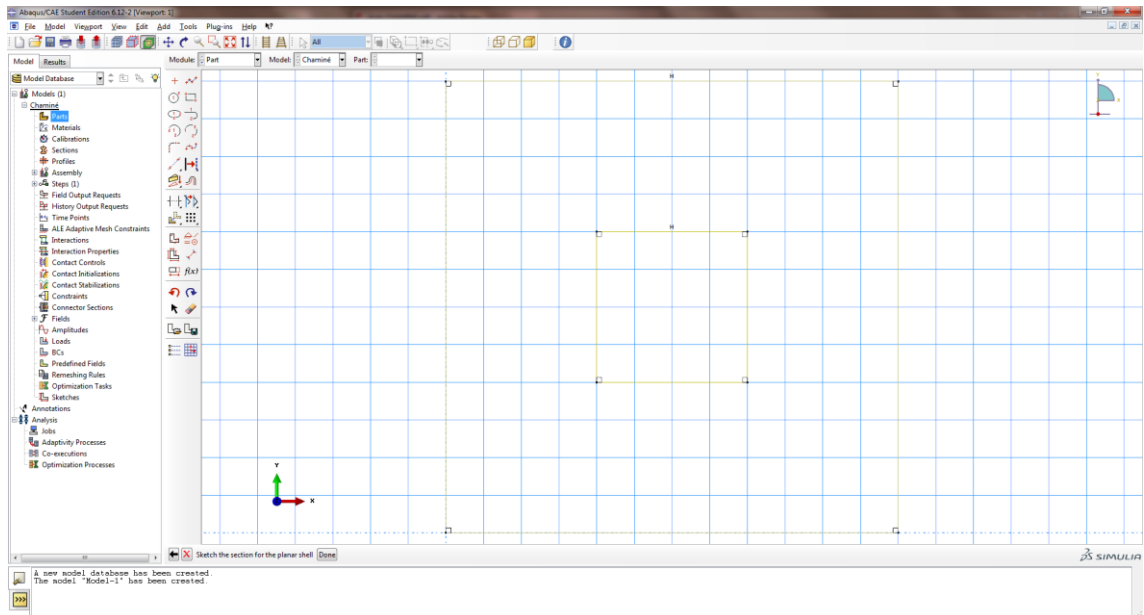
- ✓ Se você ainda não iniciou o programa **Abaqus/CAE**, **digite** *cmd* no **Menu Iniciar** para abrir o **Prompt de Comando** e nele **digite** *abq6122se cae* para executar o Abaqus.
- ✓ Em **Create Model Database** na caixa **Start Session** que aparece, **selecione** **With Standard/Explicit Model**.

2.2. PRÉ-PROCESSAMENTO

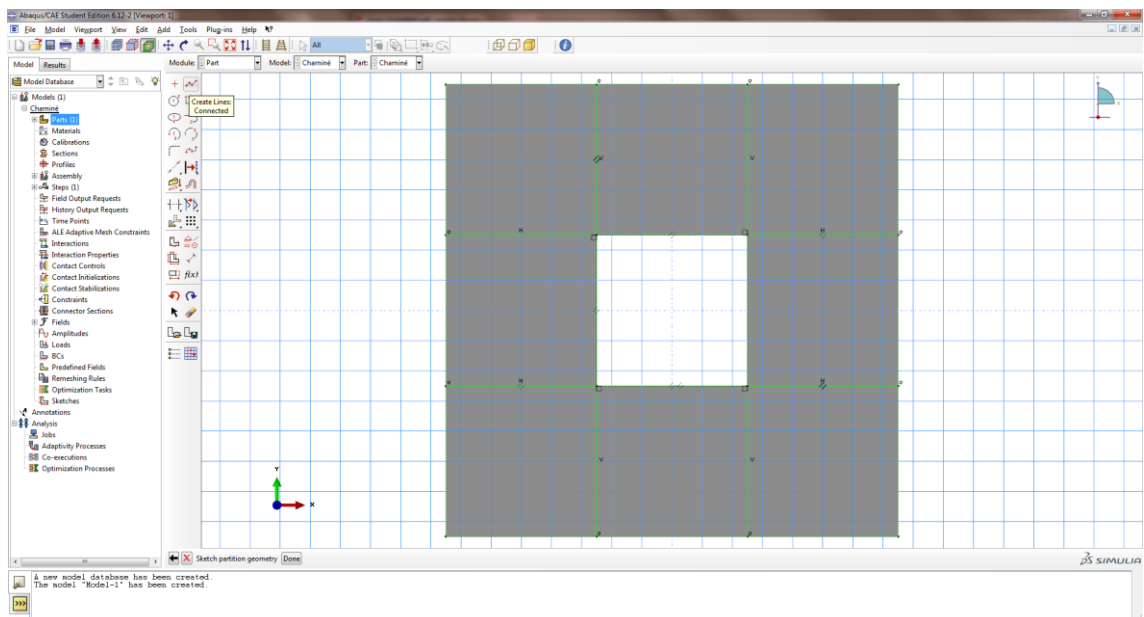
- ✓ No menu **Model** à esquerda, **clique** com o botão direito em **Model-1** e **selecione** **Rename**. **Digite** *Chaminé*.
- ✓ No menu **Model** à esquerda, **dê** duplo clique em **Parts**, no campo **Name** **digite** *Chaminé*, e **selecione** as opções: **3D**, **Deformable**, **Shell**, **Planar**. Em **approximate size** **digite** *2*. **Clique** em **Continue...**



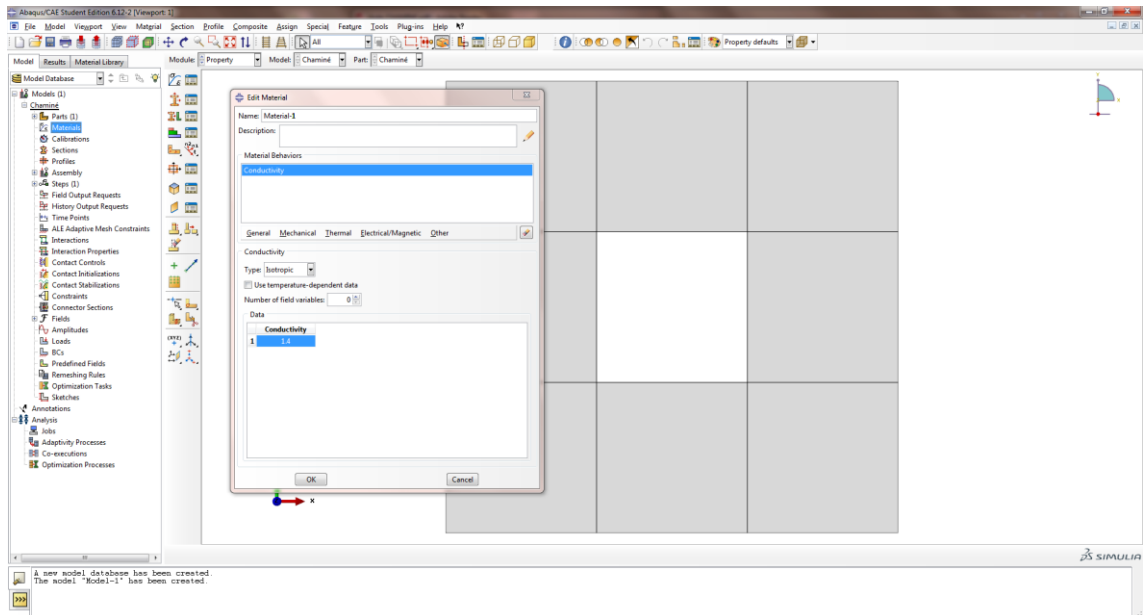
- ✓ **Clique** em **Create Lines: Rectangle (4 lines)** na caixa de ferramentas e **insira** as seguintes coordenadas *0,0 – 0.6,0.6 – 0.2,0.2 – 0.4,0.4*. Em seguida, **desative** a função **Create Lines: Rectangle (4 lines)** e **clique** em **Done**.



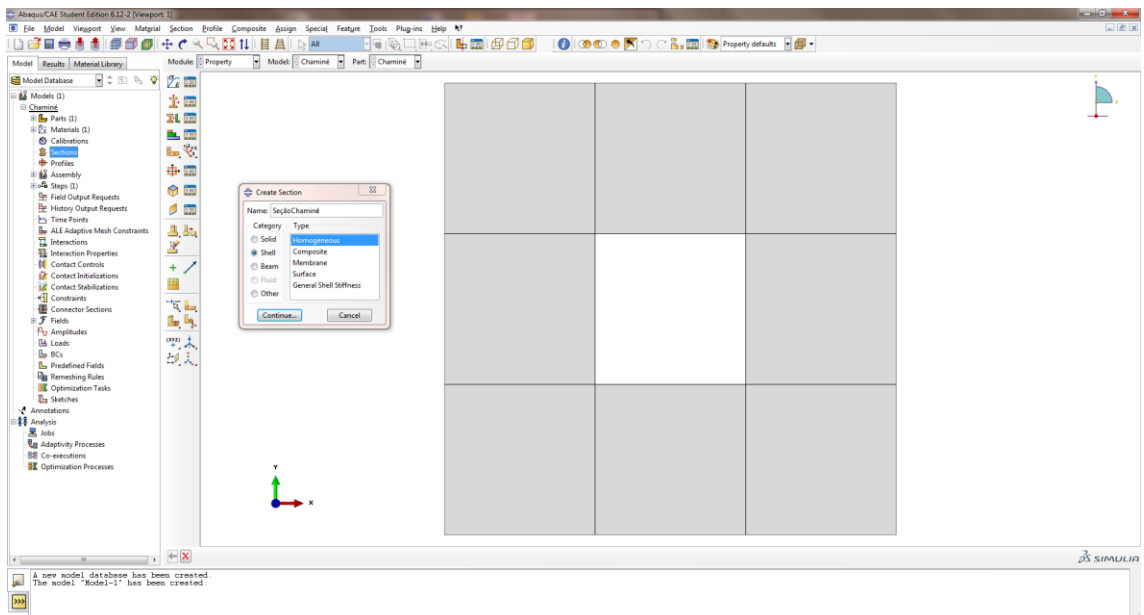
- ✓ Na caixa de ferramentas, **clique** em **Partition Face: Sketch**. **Selecione** a aresta externa direita. Na caixa de ferramentas **selecione** **Create Lines: Connected** e através dela **particione** a chaminé como na imagem. **Clique** em **Done**.



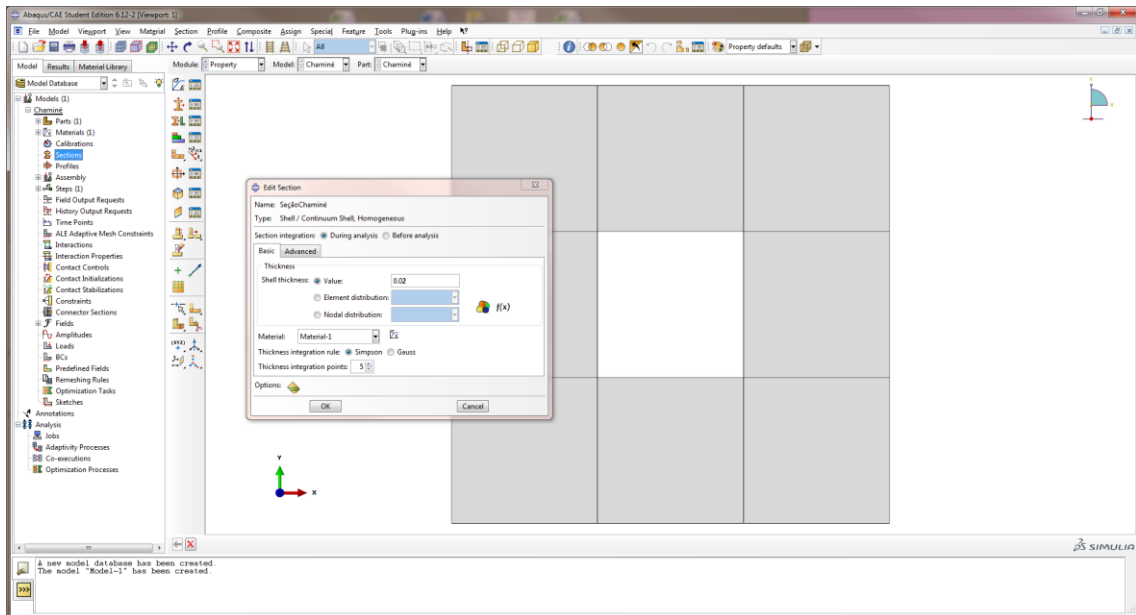
- ✓ No menu **Model** à esquerda, **dê** duplo clique em **Materials**. Na janela **Edit Material**. **Selecione** **Thermal>Conductivity** e **digite** **1.4** em **Conductivity**. **Clique** em **OK**.



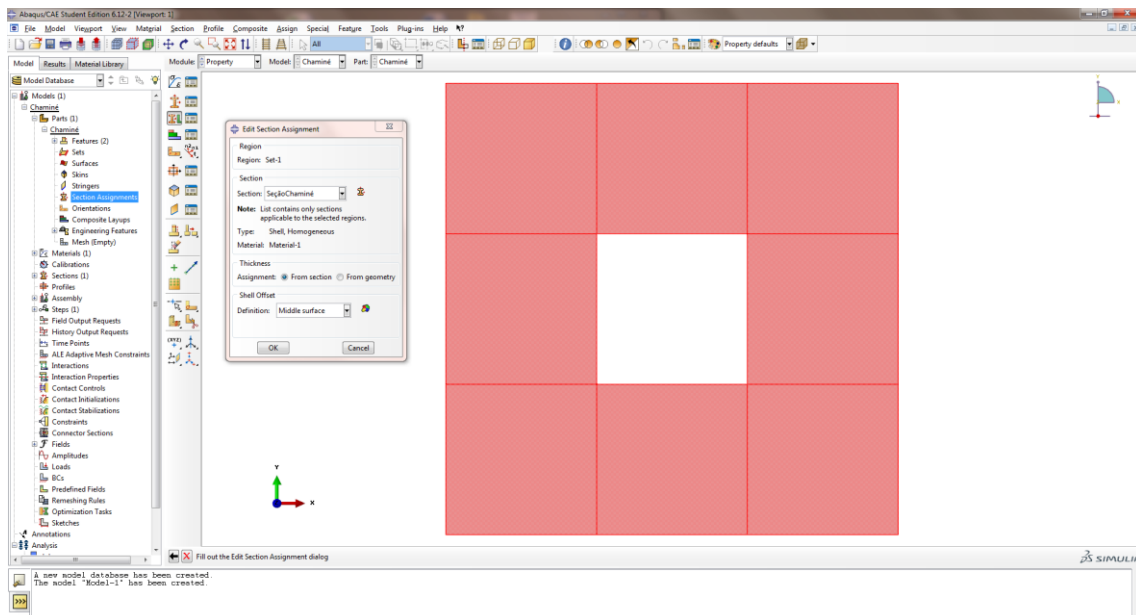
- ✓ No menu **Model** à esquerda, **dê** duplo clique em **Sections**. No campo **Name**: **digite** *SeçãoChaminé*, em **Category** **selecione** *Shell*, e em **Type** **selecione** *Homogeneous*. **Clique** em **Continue...**



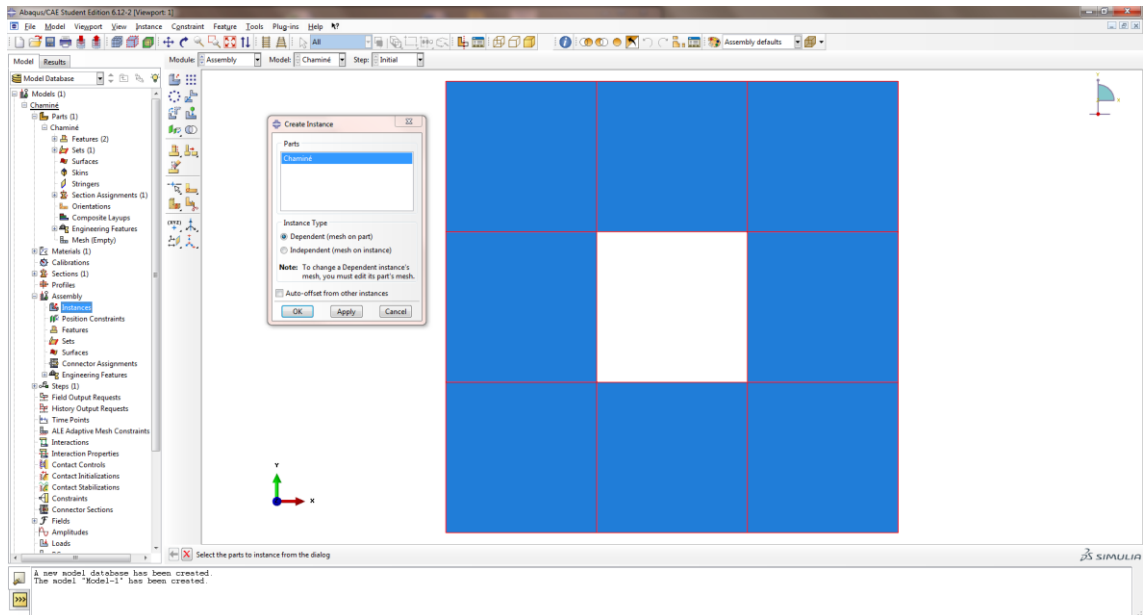
- ✓ Na janela **Edit Section**, **digite** 0.02 em **Shell thickness: Value:**, e **clique** em **OK**.



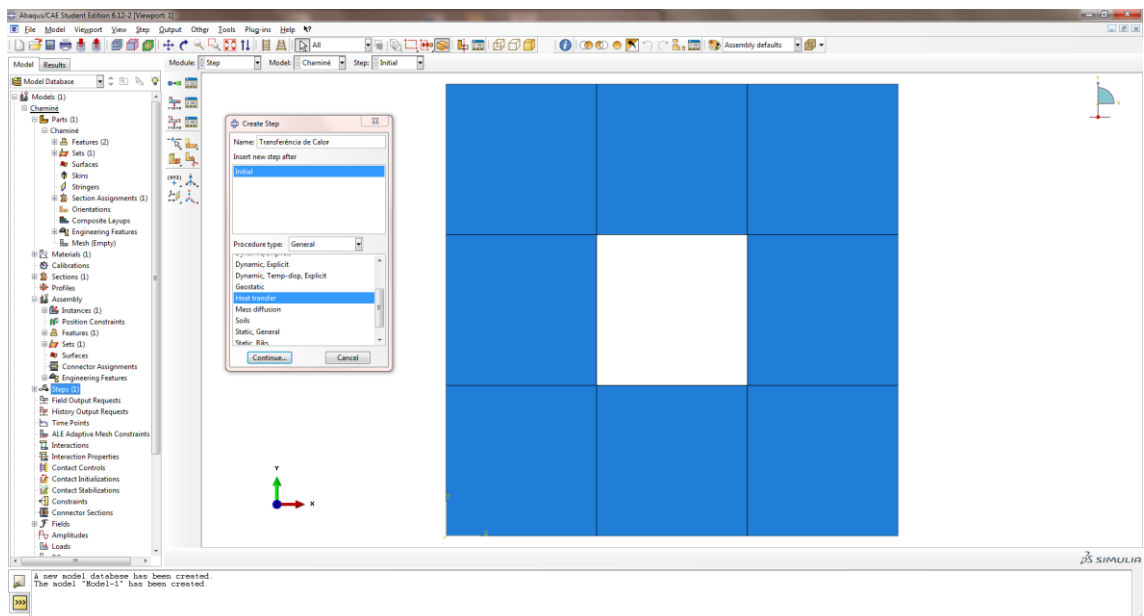
- ✓ No menu **Model** à esquerda, **abra** **Parts>Chaminé** e **dê** duplo clique em **Section Assignments**. **Selecione** a chaminé por inteiro e **clique** em **Done**. **Clique** em **OK**.



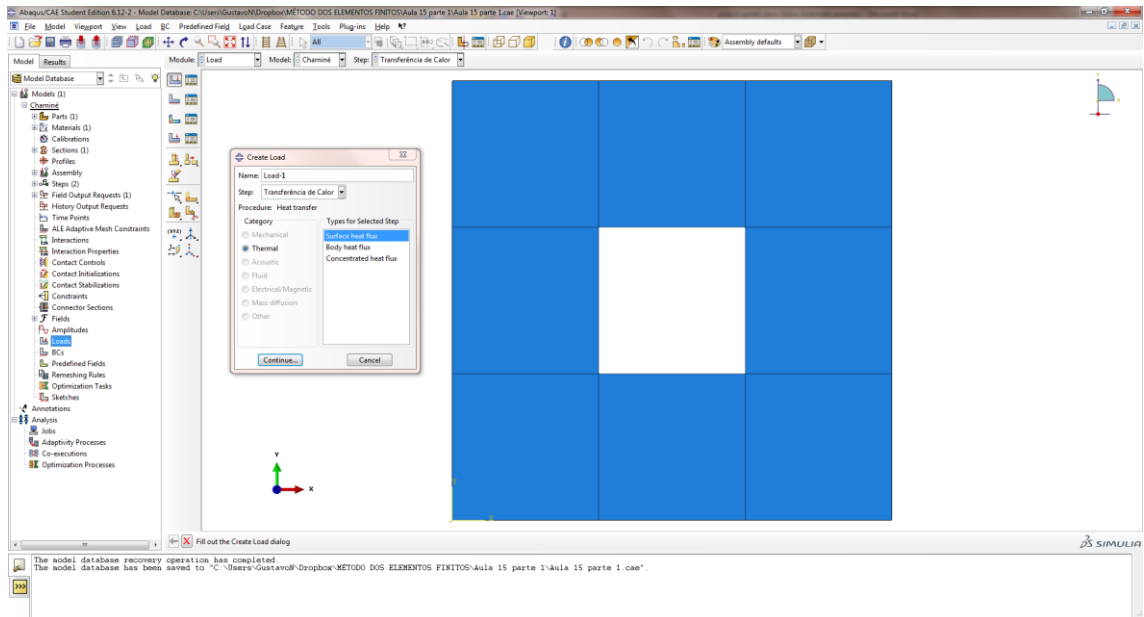
- ✓ No menu **Model** à esquerda, **abra** **Assembly**, **dê** duplo clique em **Instances** e **clique** em **OK** na janela **Create Instance**.



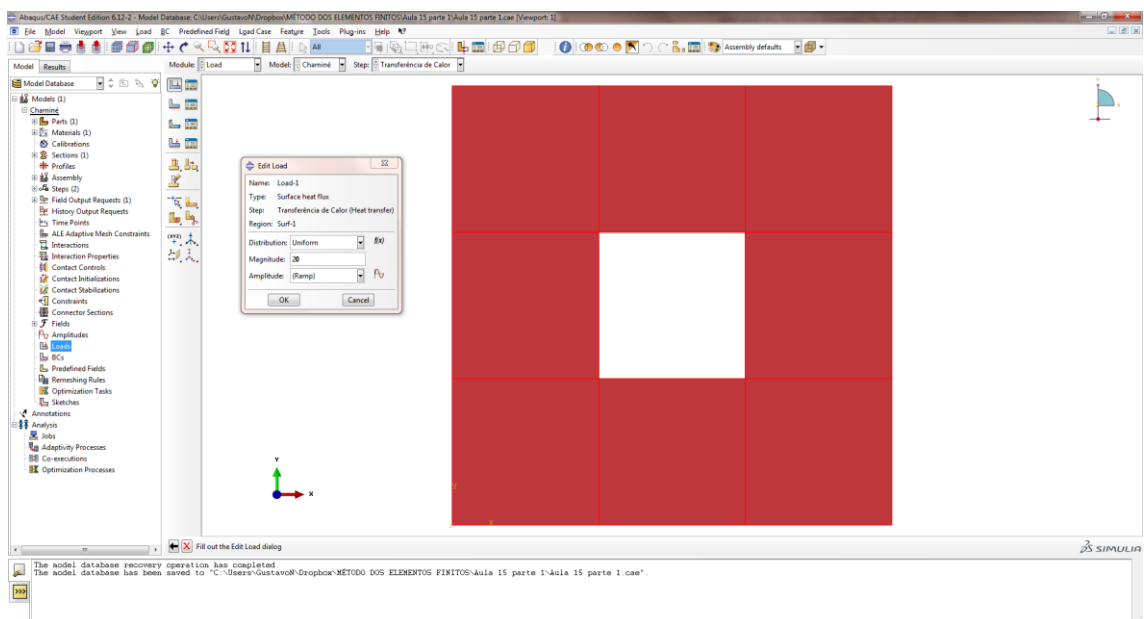
- ✓ No menu **model** à esquerda, **dê** duplo clique em **Steps**. **Digite** *Transferência de Calor* no campo **Name:** e **selecione** Procedure type: **General>Heat transfer**. **Clique** em **Continue...** Na janela **Edit Step**, **marque** **Steady-state** em **Response:** e **clique** em **Dismiss** no aviso: “Default load variation with time has changed to Ramp linearly over step.”. **Clique** em **OK**.



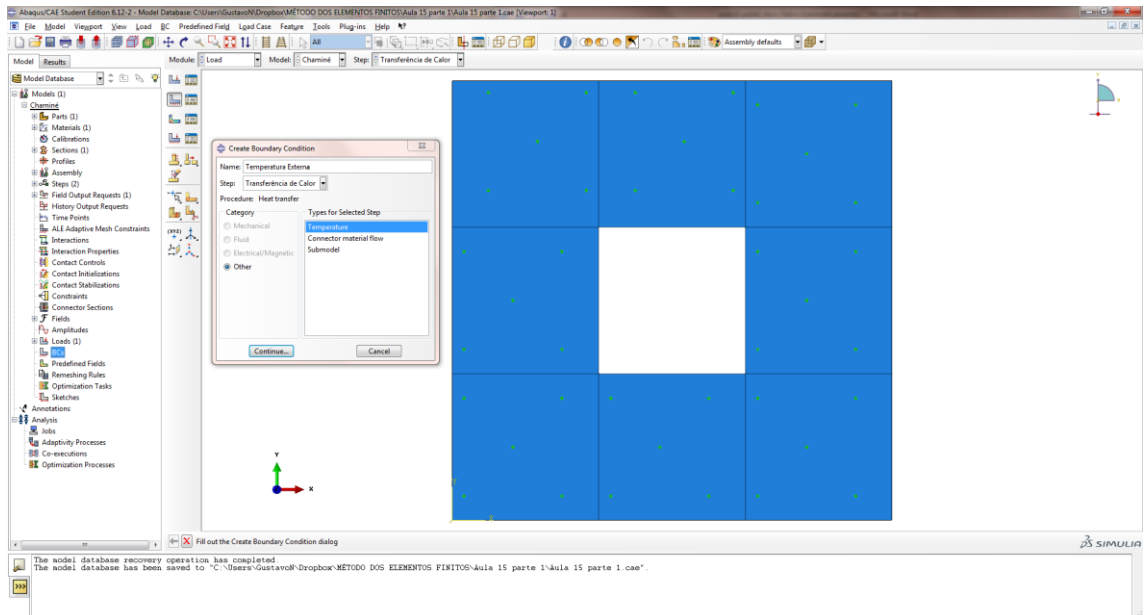
- ✓ No menu **model** à esquerda, **dê** duplo clique em **Loads**. Na janela **Create Load** **selecione** o **Step** *Transferência de Calor*, em **Types for Selected Step** **selecione** **Surface heat flux** e **clique** em **Continue...**



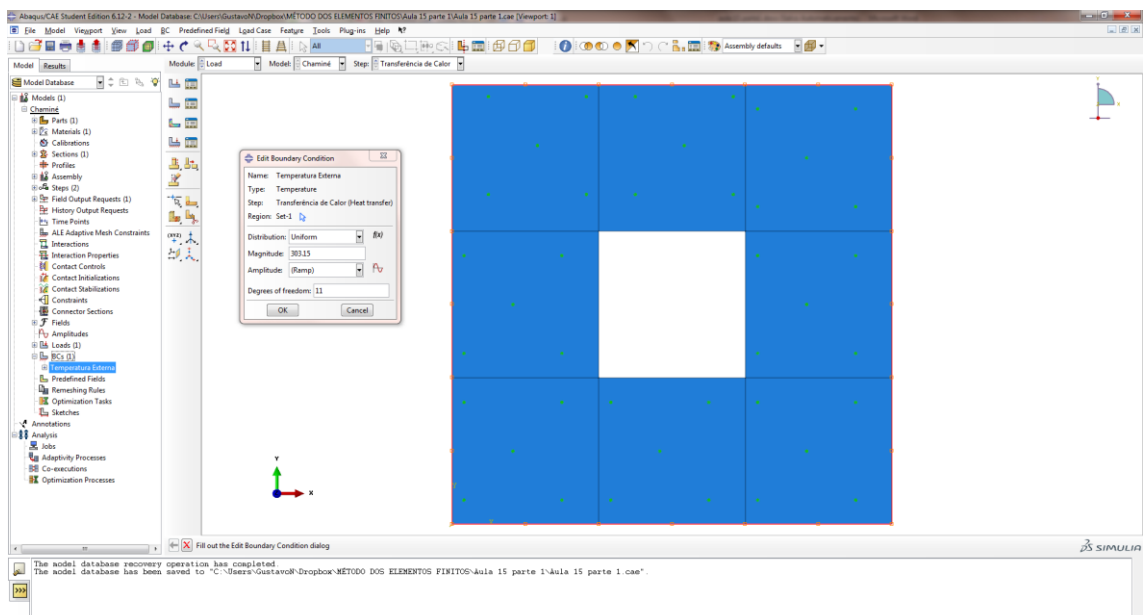
- ✓ **Selecione** toda a chaminé, **clique** em Done e então em Brown. Na janela Edit Load, **digite 20** no campo Magnitude: e **clique** em OK.



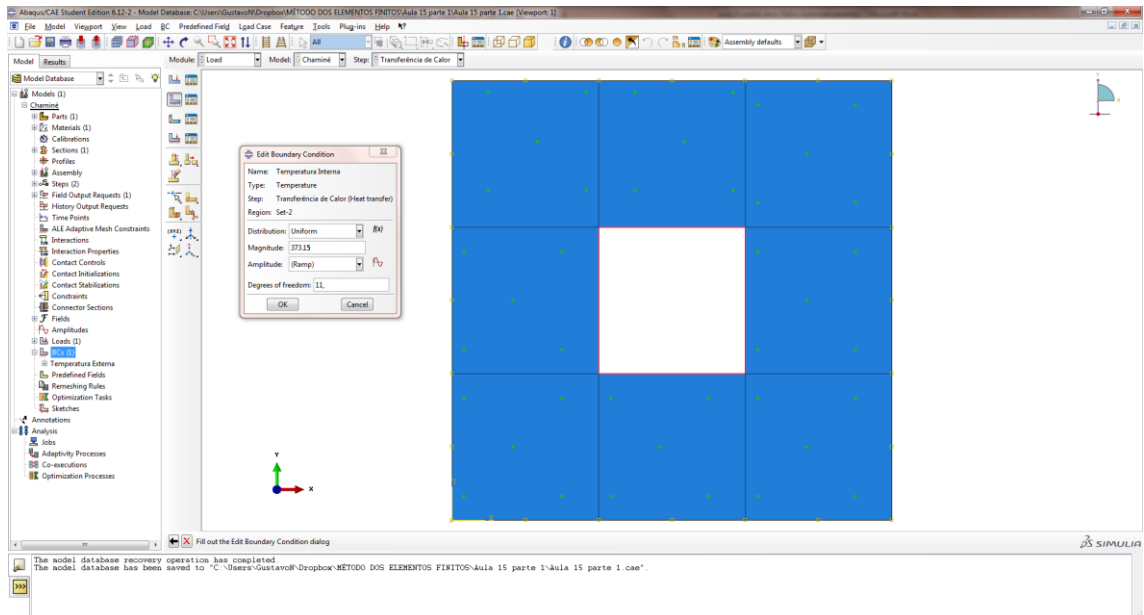
- ✓ No menu **model** à esquerda, **dê** duplo clique em **BCs**. Na janela **Create Boundary Condition**, **altere** o campo **Name** para *Temperatura Externa*, **Step** para **Transferência de Calor** e **Types for Selected Step** para **Temperature**. **Clique** em **Continue....**



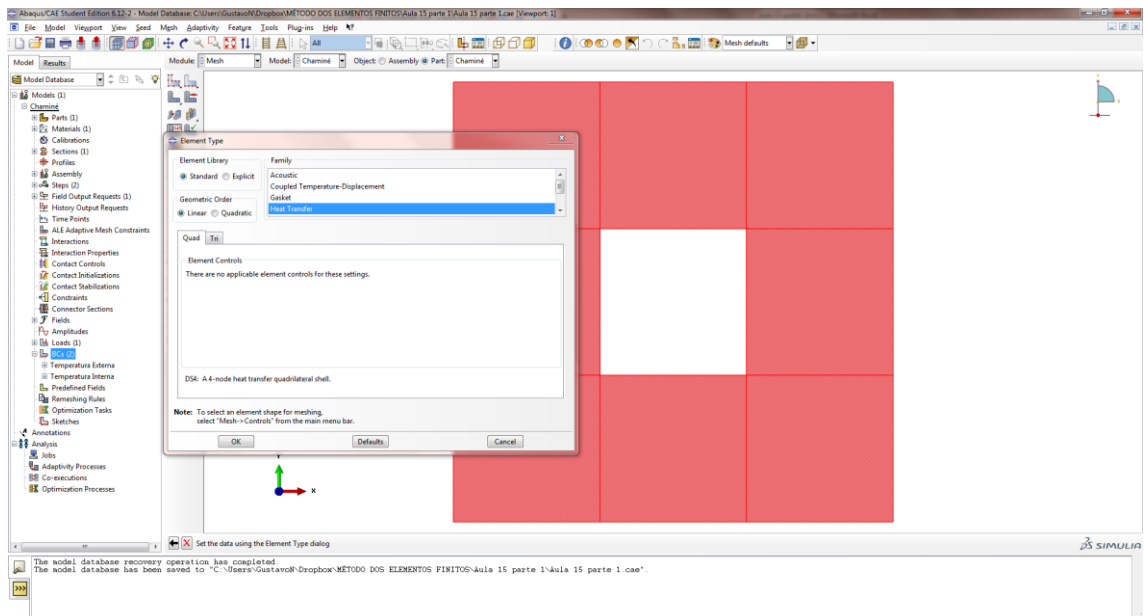
- ✓ **Selecione** as arestas externas e **clique** em Done. **Digite** 303.15 no Campo Magnitude na janela Edit Boundary Condition e **clique** em OK.



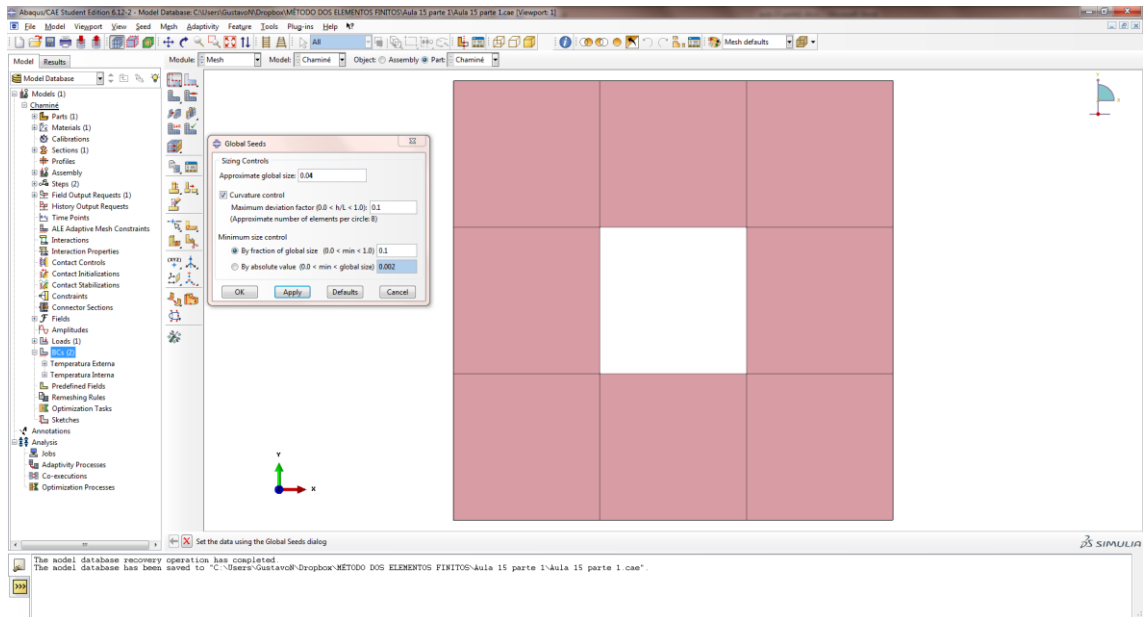
- ✓ **Repita** para criar a condição de contorno da Temperatura Interna que possui magnitude de 373.15.



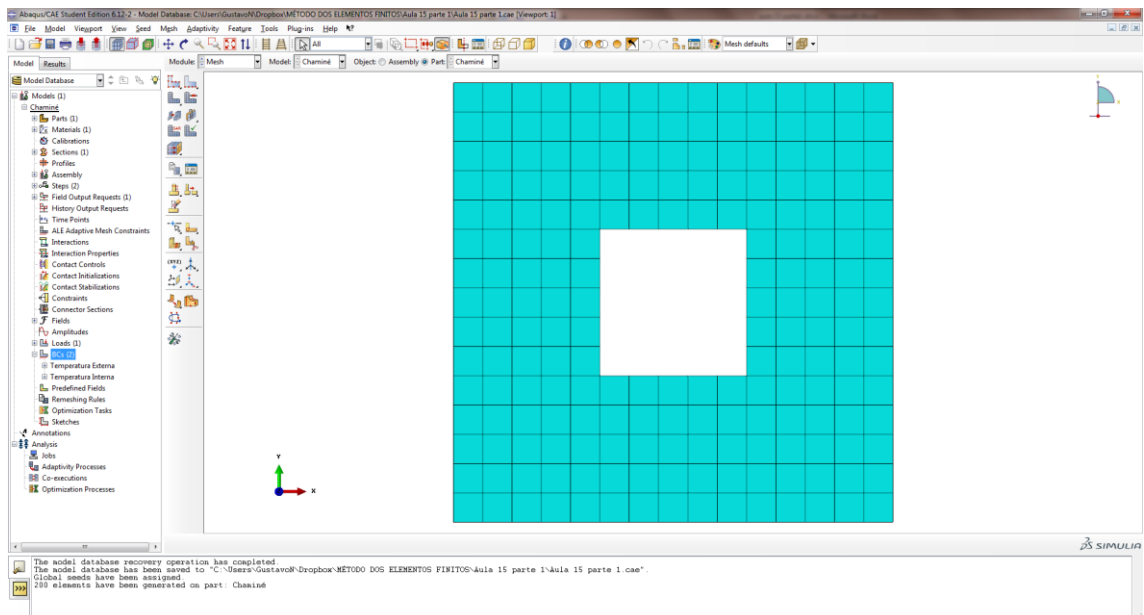
- ✓ Na barra de contexto, em **Module**, **selecione** Mesh, e em **Object**, **selecione** Part. Na barra do menu principal, **clique** em Mesh>Element Type e **selecione** com o mouse toda a chaminé. **Clique** em Done, Abrirá a janela Element Type. Em Family, **selecione** Heat Transfer e em Geometric Order, **selecione** Linear. **Clique** em OK.



- ✓ Na barra do menu principal, **clique** em Seed>Part e **altere** approximate global size para 0.04. **Clique** em OK.

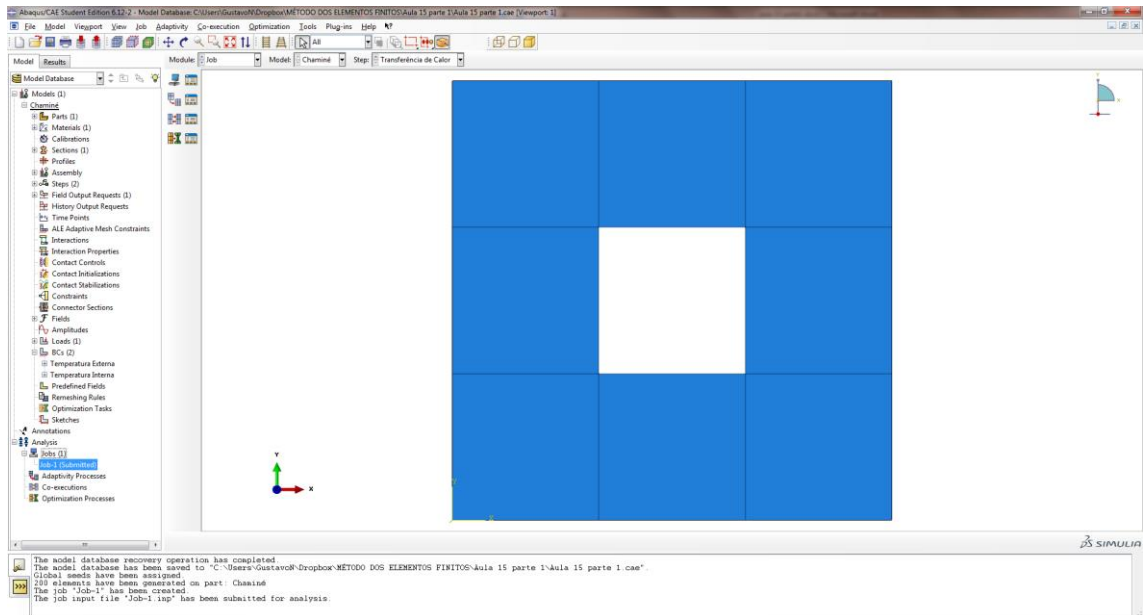


- ✓ Na barra do menu principal, **clique** em **Mesh>Part**. Aparecerá a pergunta “OK to mesh the part?”, **clique** Yes. **Perceba** que a Chaminé fica na cor azul.



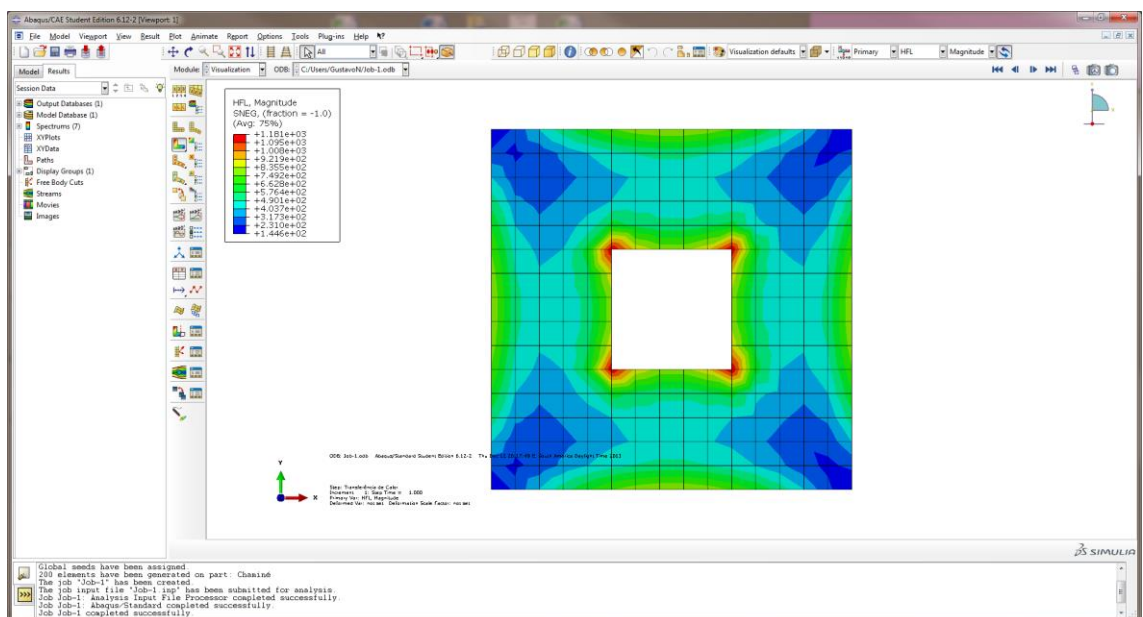
2.3. PROCESSAMENTO

- ✓ No menu **model** à esquerda, **dê** duplo clique em **Jobs** e **clique** em **OK**. **Abra** **Jobs (1)**, **clique** com o botão direito em **Job-1** e **clique** em **Submit**. Nas janelas que se abrem, **clique** em **OK** e em **Yes**. **Aguarde**.

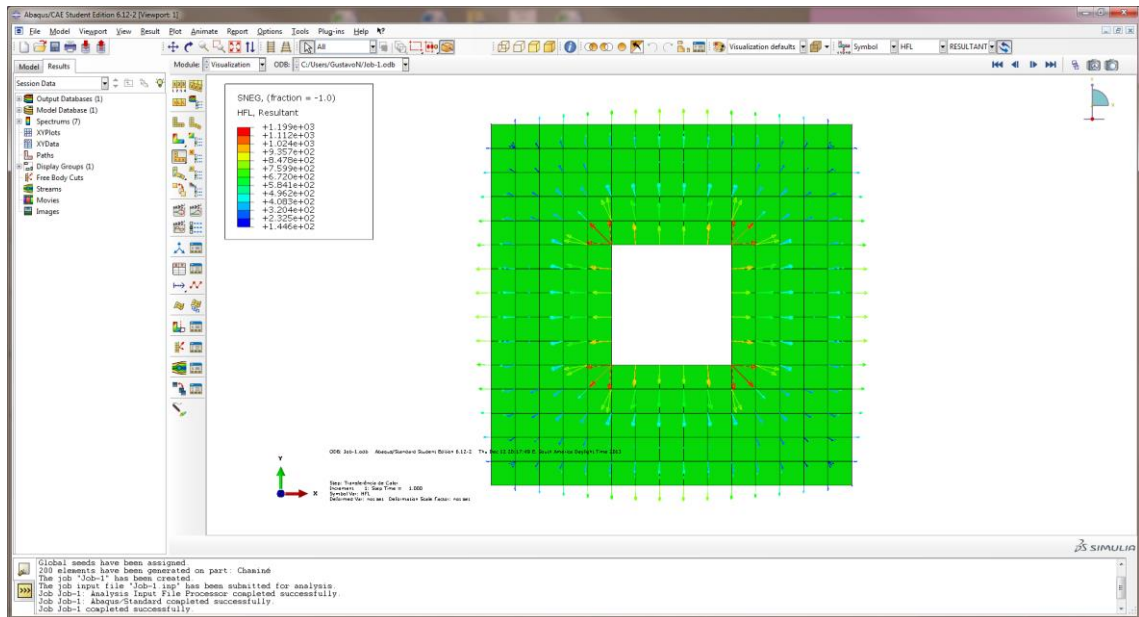


2.4. PÓS-PROCESSAMENTO

- ✓ No menu **model** à esquerda, em **Jobs**, **clique** com o botão direito em **Job-1** e **clique** em **Results**. Na caixa de ferramentas, **clique** em **Plot Contours on Undeformed Shape**.
- ✓ Na barra de ferramentas no canto superior à direita, **selecione** **HFL>Magnitude**. Na barra de menus principal, **clique** em **Viewport>Viewport Annotation Options...** Na janela aberta, **selecione** a aba **Legend**. **Clique** em **Set Font**. Na nova janela, **altere** **Size** para **14**. **Clique** **OK** nas duas janelas abertas.



- ✓ Na caixa de ferramentas, **clique** em **Plot Symbols on Undeformed Shape**.



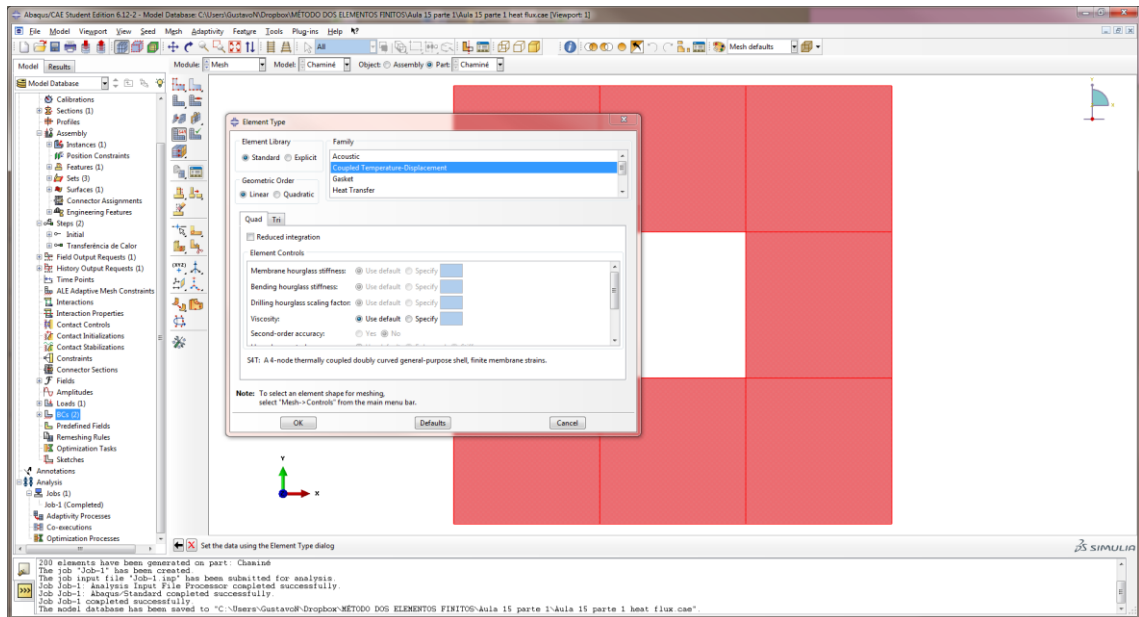
- ✓ Na barra do menu principal, **clique** em **File>Save As....** **Dê** um nome ao arquivo e **clique** em **OK** (É possível também salvar o arquivo com os resultados já calculados - **job-1.odb**).

Determinação do campo de tensões gerado pela variação de temperatura interna e externa

Muitas vezes estamos interessados em obter o campo de tensões do corpo gerado pelo campo de temperaturas devido a diferença de temperatura interna e externa. Temos um problema "termo-elástico" para solucionar. O programa ABAQUS nos permite solucionar o problema. A solução desse problema envolve a execução dos mesmos passos do problema apenas térmico, seguindo os passos a seguir:

- ✓ **Altere** Material-1, adicionando as características: **Mechanical>Expansion [Expansion Coeff alpha = 1E-5]** e **Mechanical>Elasticity>Elastic [Young's Modulus = 2.1E9 / Poisson's Ratio = 0.15]**
- ✓ **Recrie Step – Type: Coupled temp-displacement**

- ✓ **Recoloque** as Temperaturas externa e interna (BCs) – Type: Temperature
- ✓ **Recoloque** a condição de fluxo de calor (Loads) - Type: Surface heat flux
- ✓ **Apague** a malha anterior e **crie** uma nova malha de elementos (Mesh) – Mesh>Element Type: Family: Coupled Temperature-Displacement, Geometric Order: Linear.



- ✓ **Reprocessamento.**

