

# ESTUDO DE TRELIÇA COMPOSTA POR 22 NÓS E 41 BARRAS USANDO O ABAQUS 6.12 STUDENT EDITION – ERRO NO DIMENSIONAMENTO DE TRELIÇAS – COBERTURA DO GALPÃO DE CASCAVEL

## 1. INTRODUÇÃO

Pretende-se, neste exemplo, analisar a treliça da cobertura objeto da foto abaixo.



Figura 1. Cobertura - Geometria da treliça a ser analisada.

Segundo o projeto, a cobertura deveria ser composta por 2 vãos cujas dimensões estão esquematizadas na figura 2. Algumas barras apresentam o fenômeno de flambagem. Houve erro de dimensionamento e execução, o que ocasionou o acidente acima.

### 1.1. DESCRIÇÃO DO ELEMENTO DE TRELIÇA PLANA:

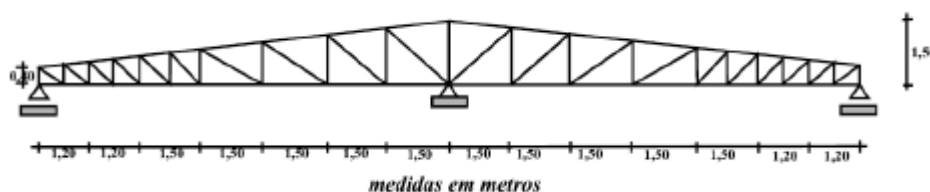


Figura 2. Esquema da Cobertura a ser analisada

No presente exemplo, analisaremos duas situações, visando tentar compreender o erro de dimensionamento cometido pelo projetista. Inicialmente vamos supor que a cobertura é composta por um único vão, conforme esquematizado na figura 3.

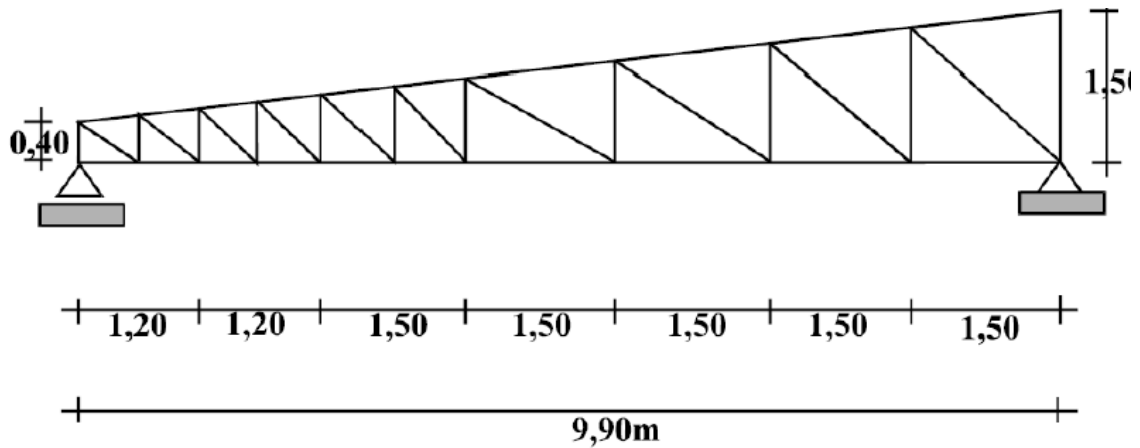


Figura 3. Situação 1 - Cobertura com um único vão.

Em seguida, analisaremos a situação com dois vãos, como mostrado na figura 2. Levando-se em conta a simetria, substituiremos a estrutura simétrica pelo apoio adequado, conforme mostra a figura 4. Além disso, a carga e a área da seção de simetria serão devidamente consideradas.

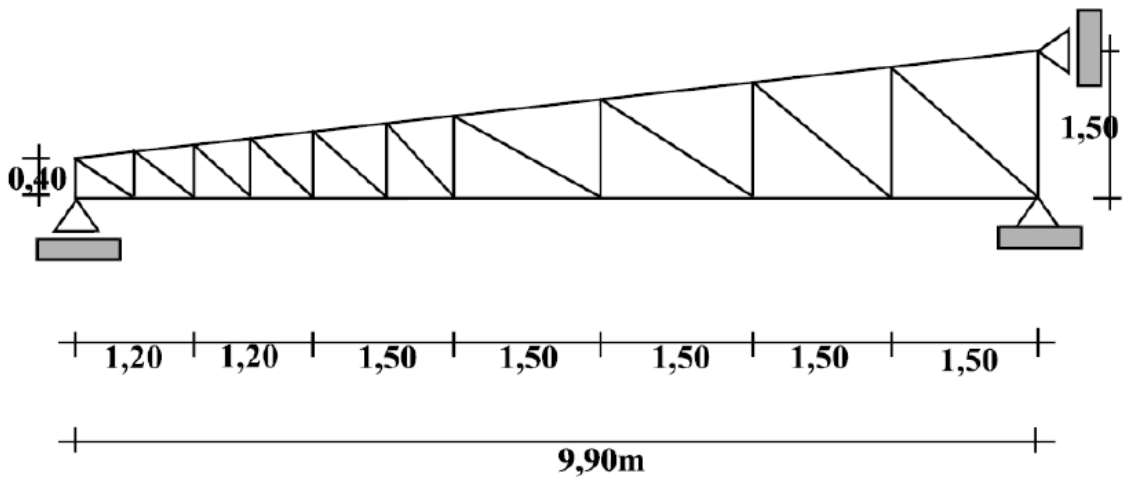


Figura 4. Situação 2 - Estrutura simétrica com 2 vãos.

A seguir, mostra-se nas figuras 5, 6 e 7, o esquema de carregamento e a malha de elementos finitos, com a numeração dos nós e elementos.

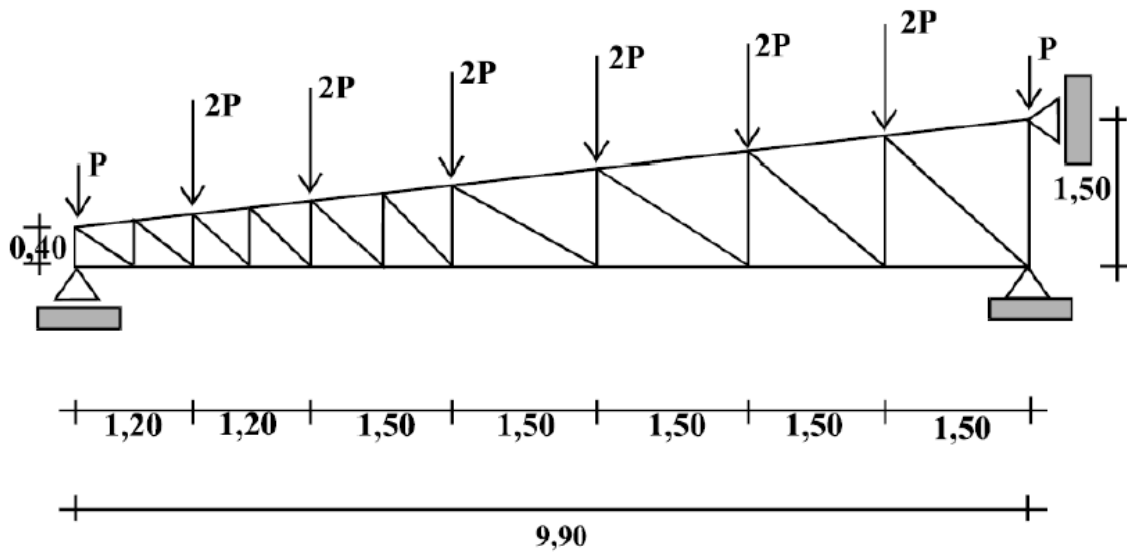


Figura 5. Esquema de carregamento.  $P = -108,66 \text{ Kgf}$

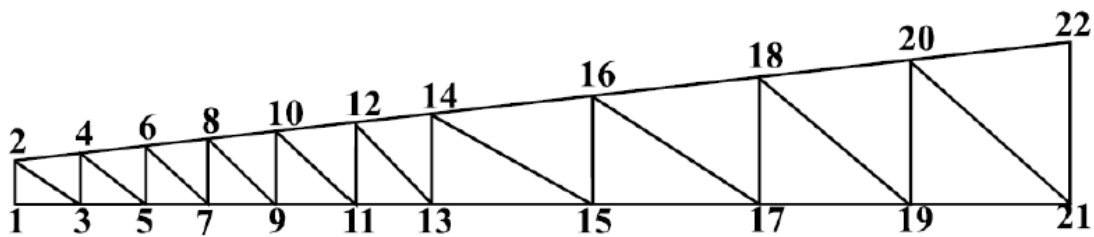


Figura 6. Numeração dos Nós

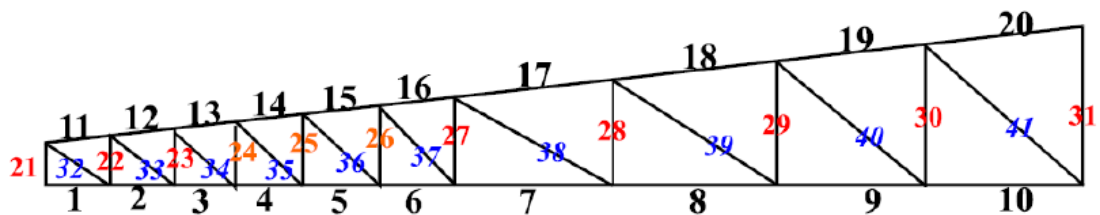


Figura 7. Numeração dos elementos

## 1.2. PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS

Área da seção transversal das barras que compõe o banzo inferior e o banzo superior:  $6,78 \text{ cm}^2 = 0,000678 \text{ m}^2$ .

Área da seção transversal das barras inclinadas (montantes) (perfil  $1\frac{1}{2} \times 1\frac{1}{2} \times 3/16$ ):  $3,42 \text{ cm}^2 = 0,000342 \text{ m}^2$ .

### 1.3. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

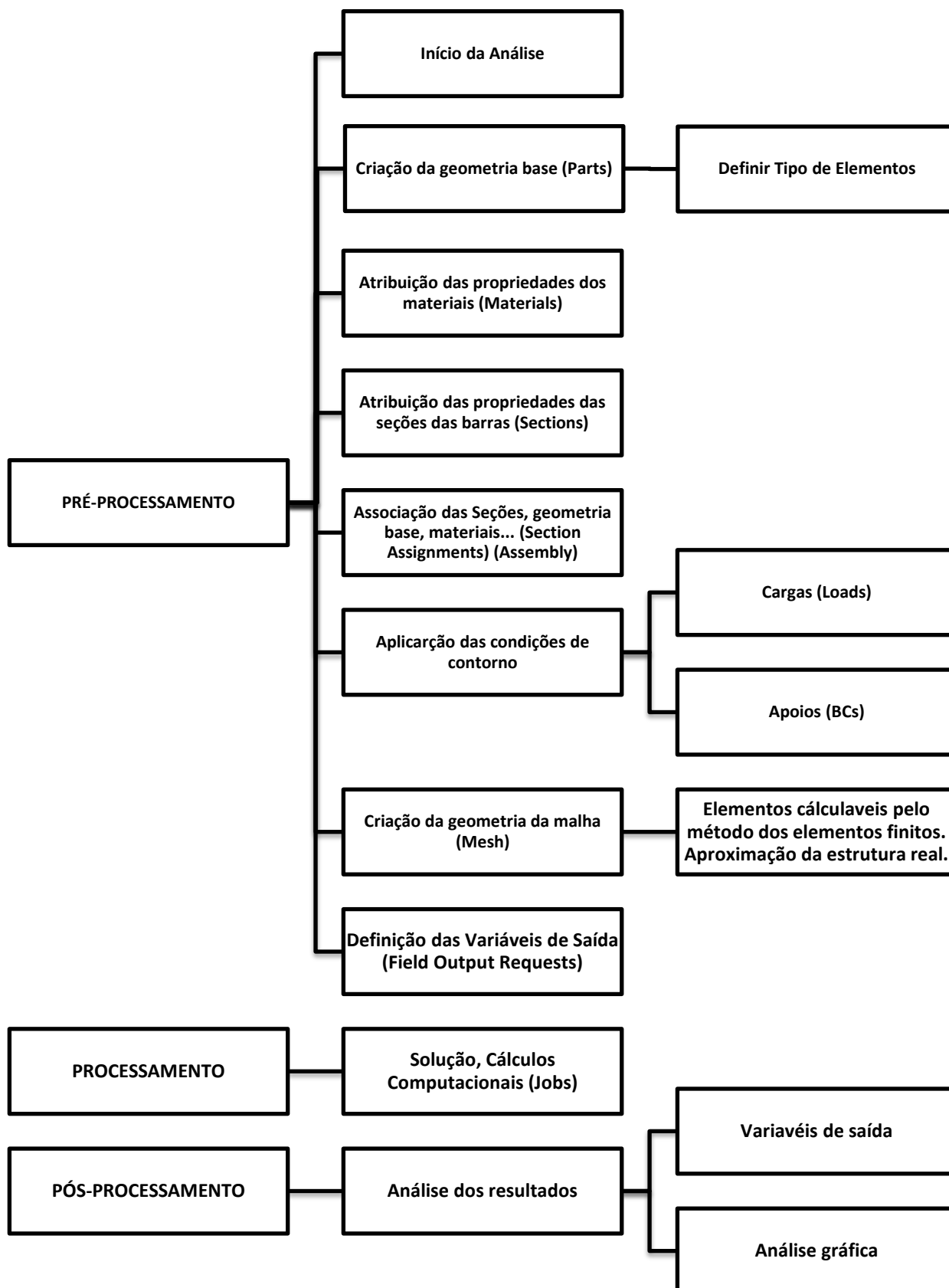
Módulo de elasticidade do material das barras:  $2.1E6 \text{ Kgf/cm}^2 = 2.1E10 \text{ Kgf/m}^2$

### 1.4. CARGA

Carga aplicada:  $P = 108,66 \text{ Kgf}$ .

## 2. RESOLUÇÃO

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

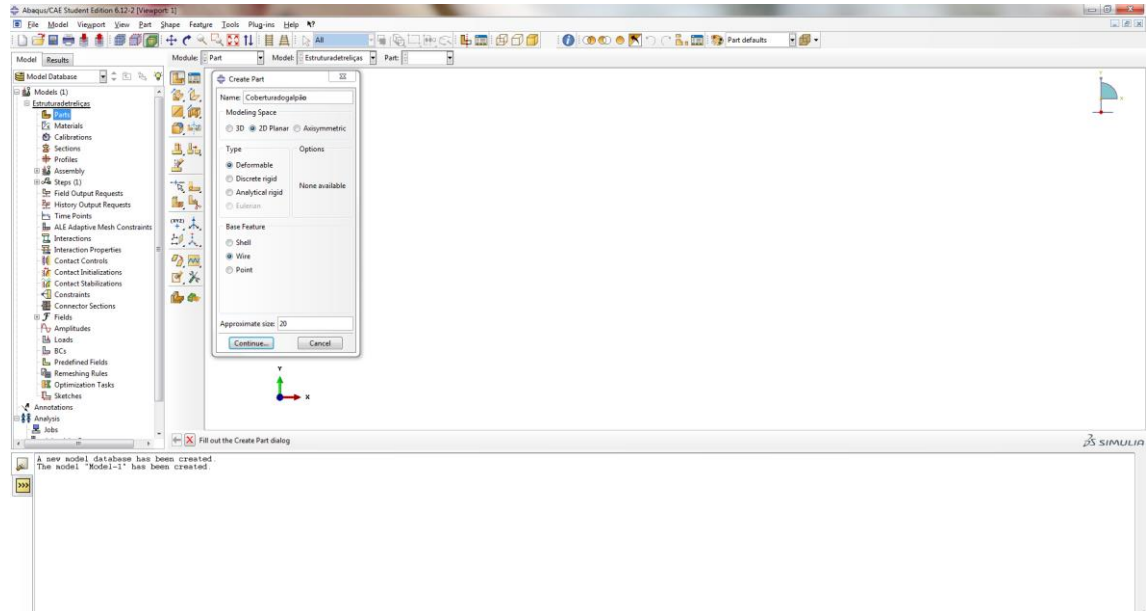


## 2.1. INÍCIO DA ANÁLISE

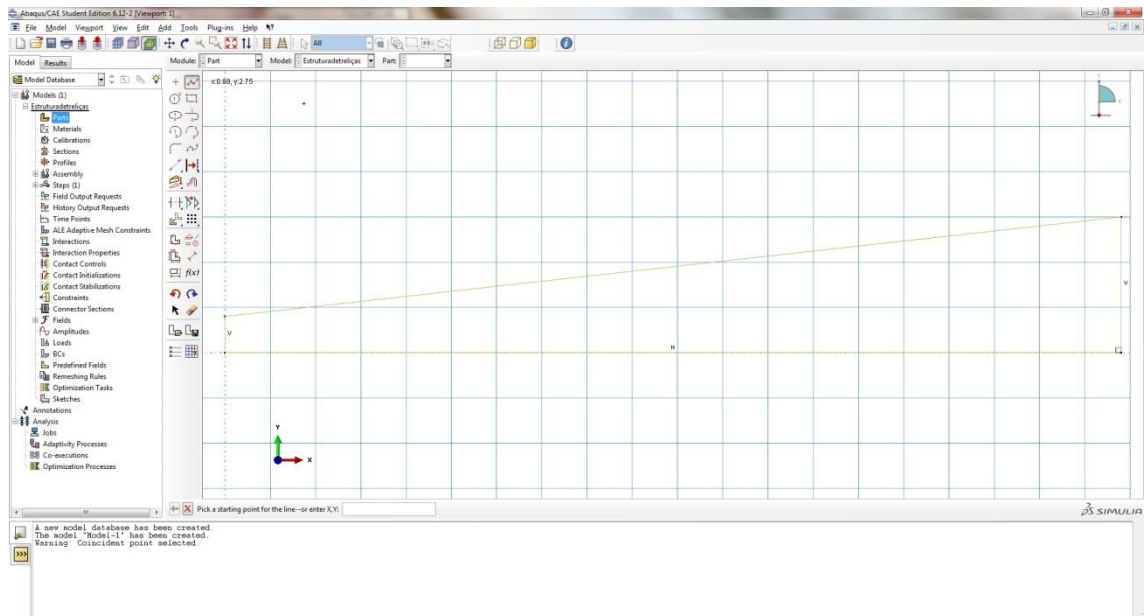
- ✓ Se você ainda não iniciou o programa **Abaqus/CAE**, **digite** *cmd* no **Menu Iniciar** para abrir o **Prompt de Comando** e nele **digite** *abq6122se cae* para executar o Abaqus.
- ✓ Em **Create Model Database** na caixa **Start Session** que aparece, **selecione** **With Standard/Explicit Model**.

## 2.2. PRÉ-PROCESSAMENTO

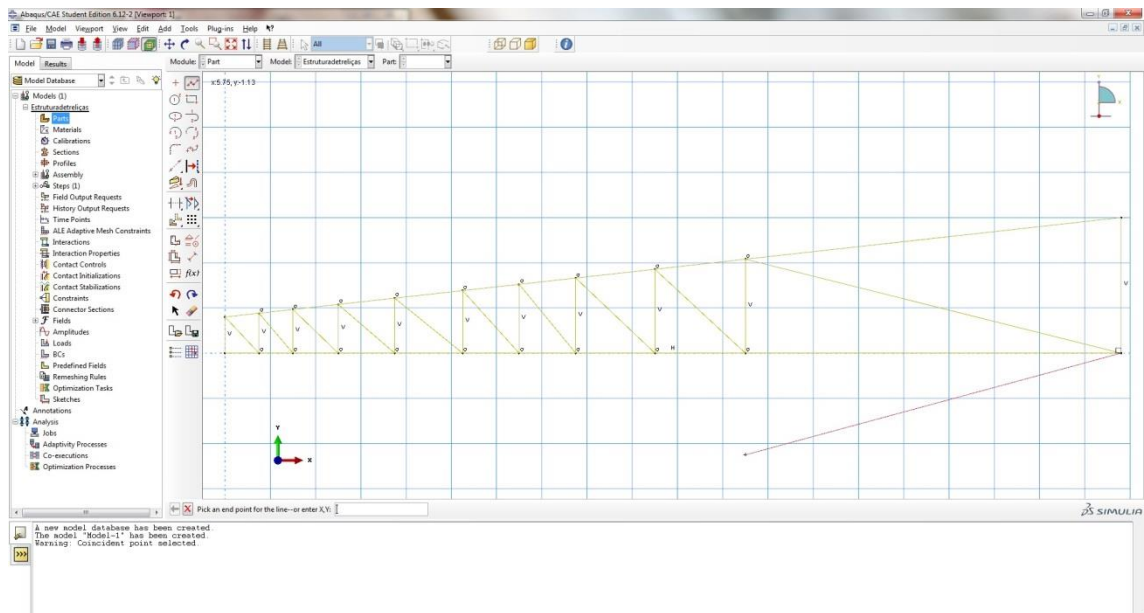
- ✓ No menu **Model** à esquerda, **clique** com o botão direito em **Model-1** e **selecione** **Rename**. **Digite** *Estruturadetreliças*.
- ✓ No menu **Model** à esquerda, **dê** duplo clique em **Parts**, no campo **Name** **digite** *Coberturadogalpão*, e **selecione** as opções: **2D Planar**, **Deformable**, **Wire**. Em **approximate size** **digite** *20*. **Clique** em **Continue...**



- ✓ Para começar a criar a estrutura, **clique** em **Create Lines: Connected** na caixa de ferramentas e **insira** as coordenadas: 0,0 ; 9,9,0 9,9,1,5 ; 0,0,4 ; 0,0.

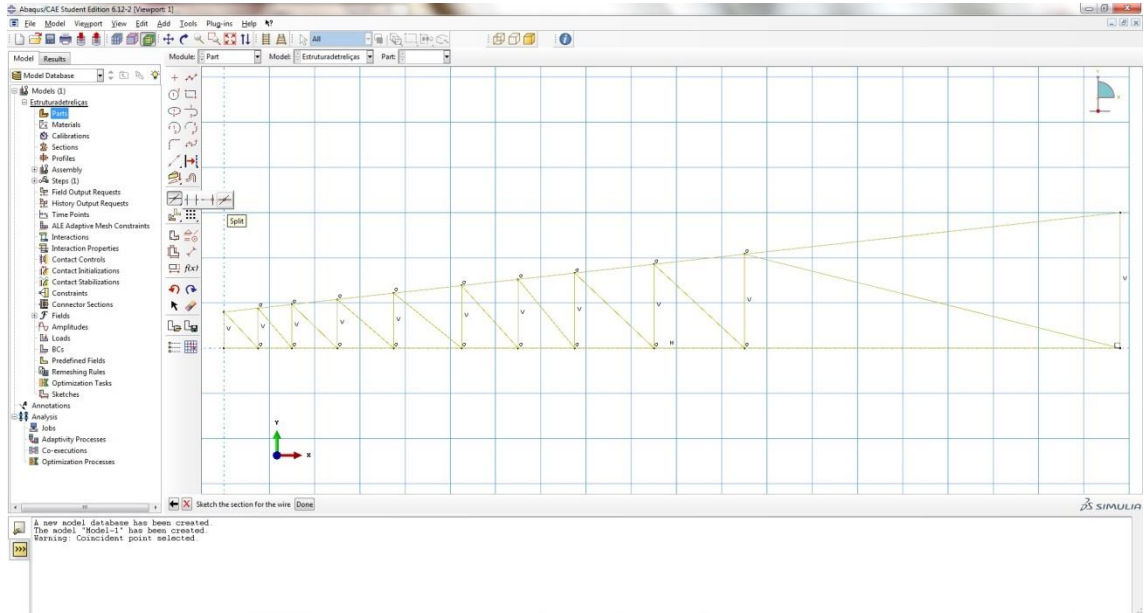


- ✓ Ainda na mesma função, **selecione** superior esquerdo, e **desenhe** livremente as montantes, clicando no banzo inferior e superior, seguindo essa sequencia até ter desenhado todas as 10 barras inclinadas e as 9 verticais, como segue na imagem:

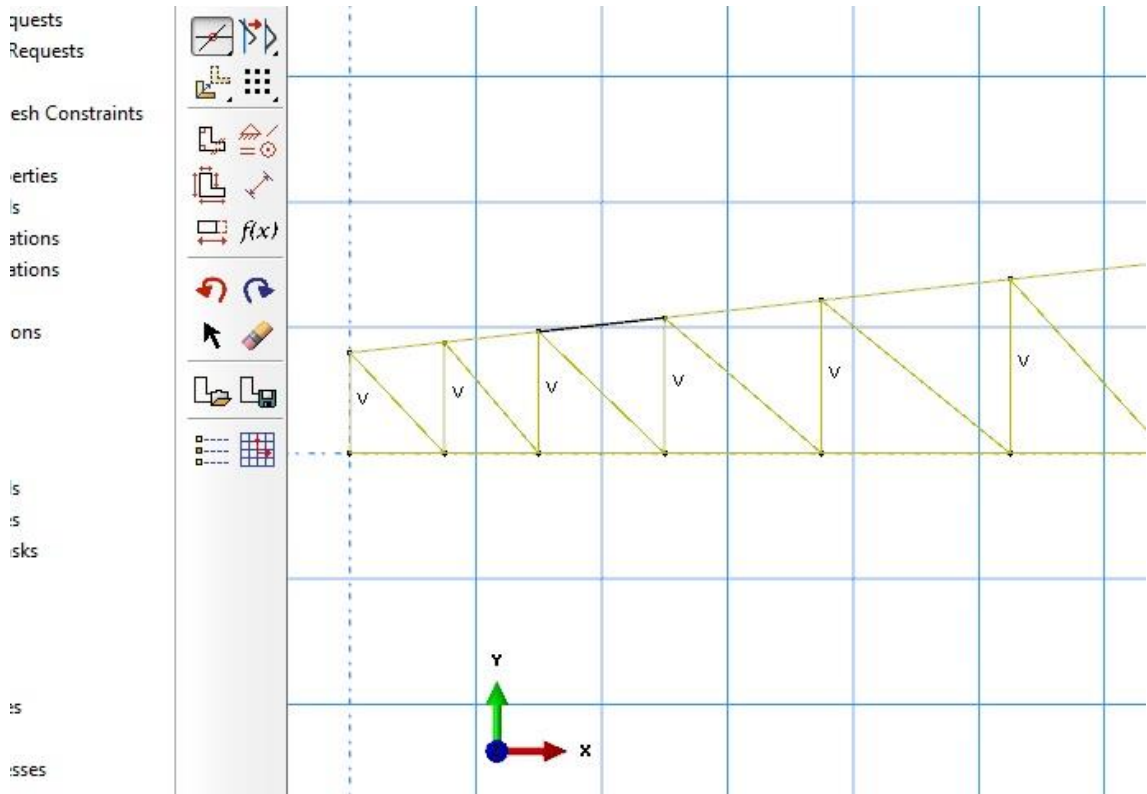


- ✓ Agora, devemos separar o banzo inferior e superior, para o contato com as barras inclinadas. Na caixa de ferramentas, **selecione** auto trim e a

opção da extrema direita **Split**. Com essa função, **selecione** a barra inferior, e todas as verticais, para separar os elementos (para cada vertical selecionada, **selecione** novamente a barra inferior). **Perceba** que ao fim desse passo, a barra inferior terá um nó em cada contato com as barras verticais.

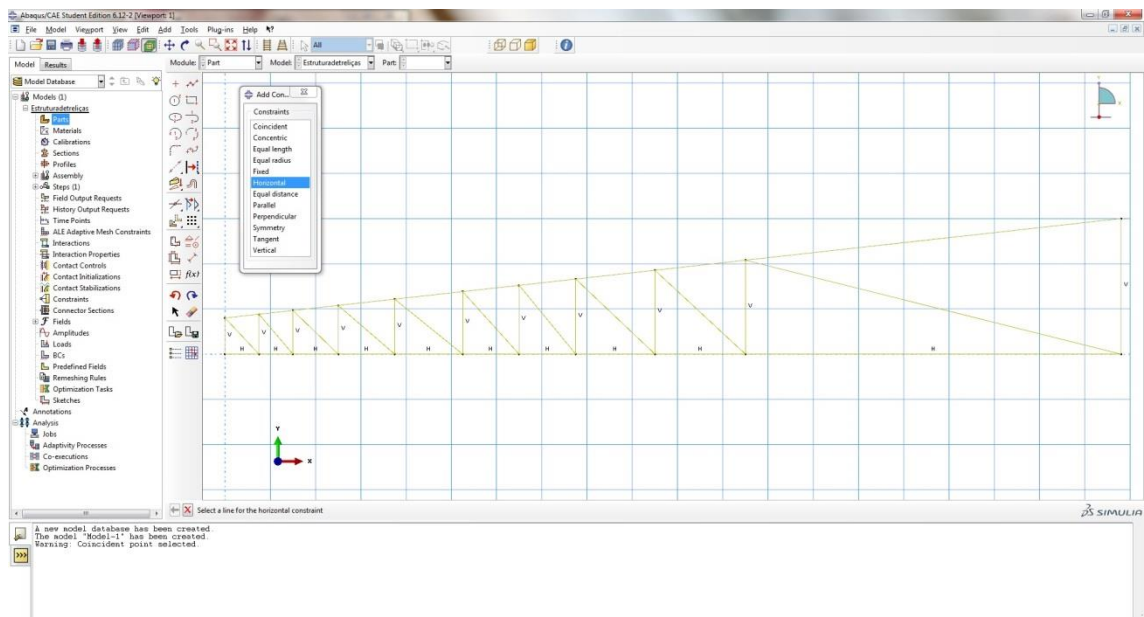


✓ **Repita** o procedimento para a barra superior.

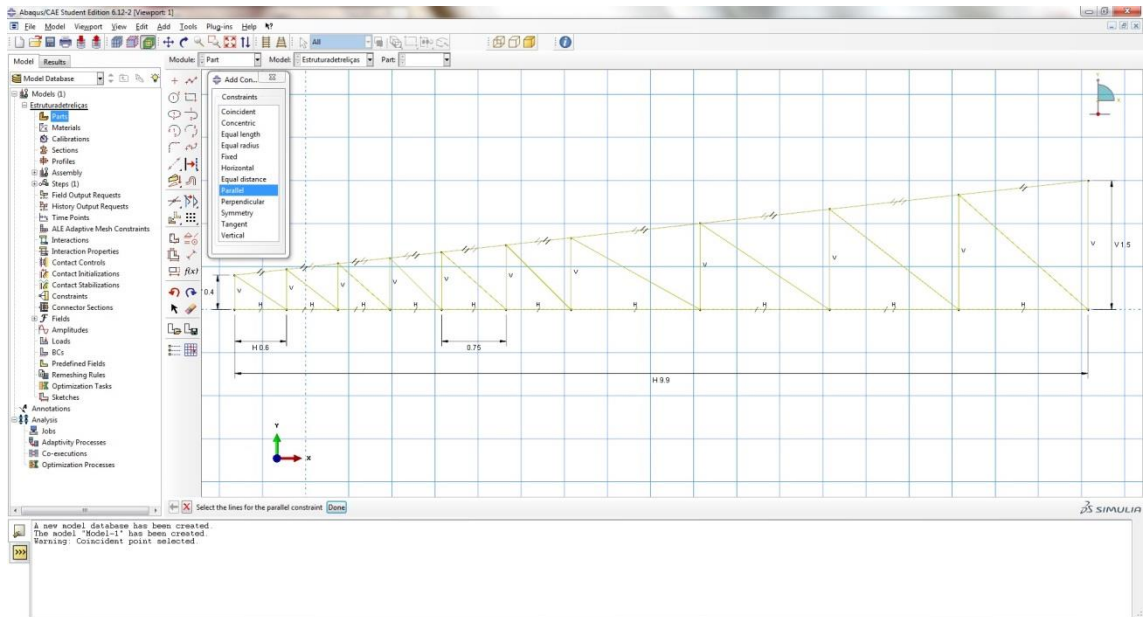




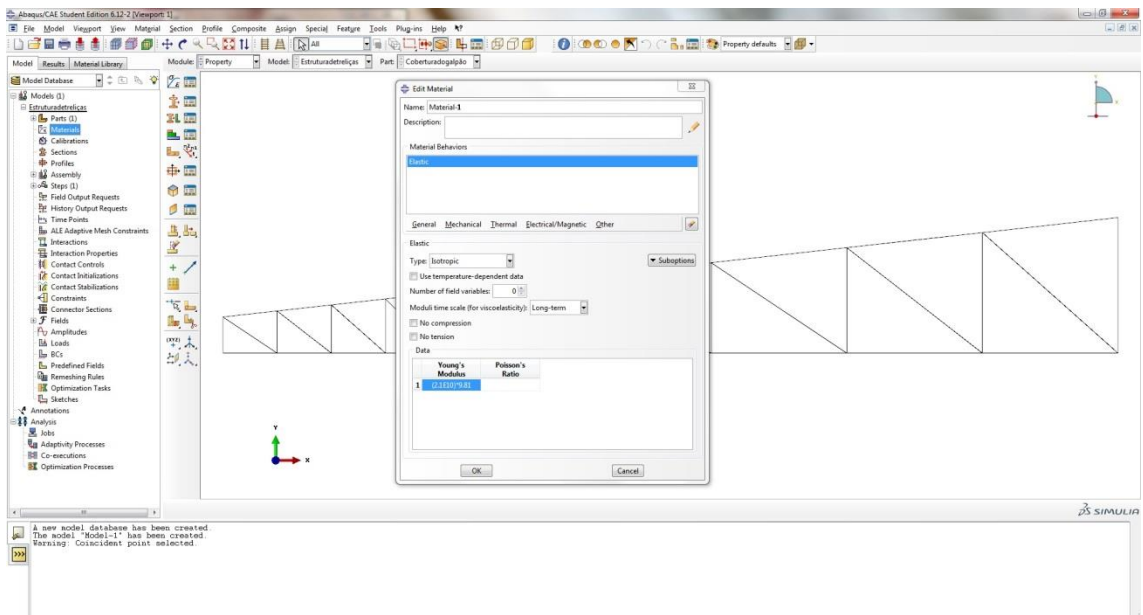
- ✓ Na caixa de ferramentas, **selecione Add Constraint**, e **defina** como horizontal as barras inferiores (se necessário, analogamente, **repita** esse processo para as barras verticais – apenas se nestas não existir um pequeno “v” confirmando essa característica). **Defina** as barras inferiores que devem ter tamanhos iguais, que são as 4 primeiras, as 2 seguintes, e as 4 últimas, selecionando **equal length**.



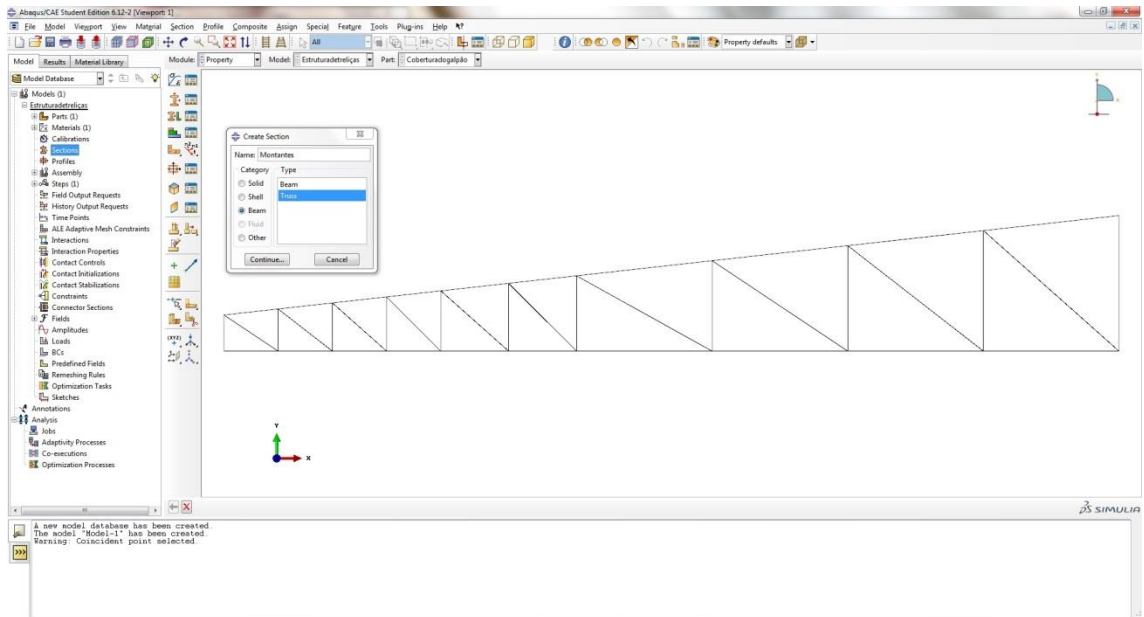
- ✓ Na caixa de ferramentas, **selecione Add Dimension**. **Defina** o comprimento total da barra, depois o da primeira barra e o da quinta. **Confira** o comprimento de 1.5 das últimas barras com essa mesma ferramenta, sem aplicar dimensão. **Defina** as dimensões das barras verticais da extrema esquerda e direita, usando **Add Dimension**. Com **Add Constraint, Parallel**, **defina** todas as barras superiores como paralelas entre si (selecionando todas com shift). **Desative** a função **Add Constraint** e **clique** em **Done**.



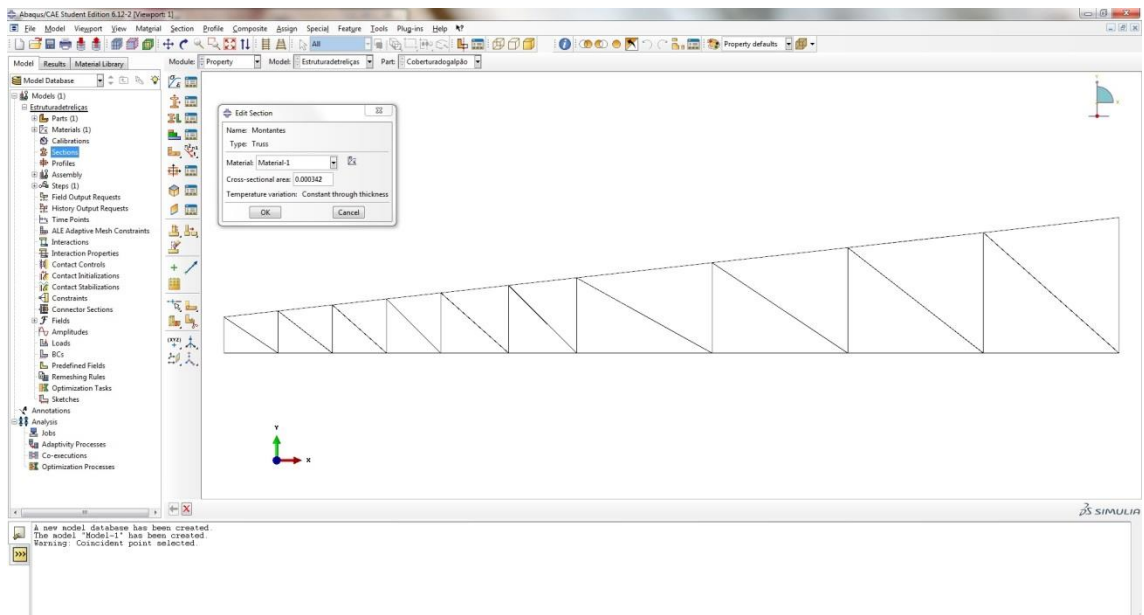
- ✓ No menu **Model** à esquerda, dê duplo clique em **Materials**. Clique em **Mechanical>Elasticity>Elastic**. Em **Data**, no campo **Young's Modulus** digite  $(2.1E10)*9.81$  e clique **OK**.



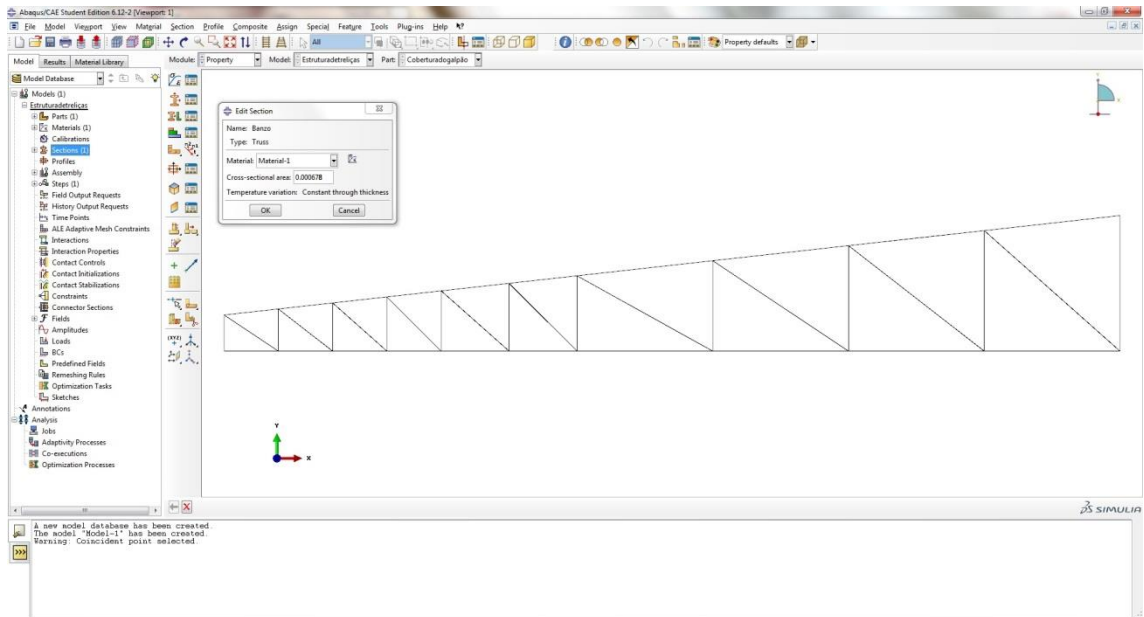
- ✓ No menu **Model** à esquerda, dê duplo clique em **Sections**. No campo **Name** digite **Montantes**, em **Category** **selecione** **Beam**, e em **Type** **selecione** **Truss**. Clique em **Continue...**



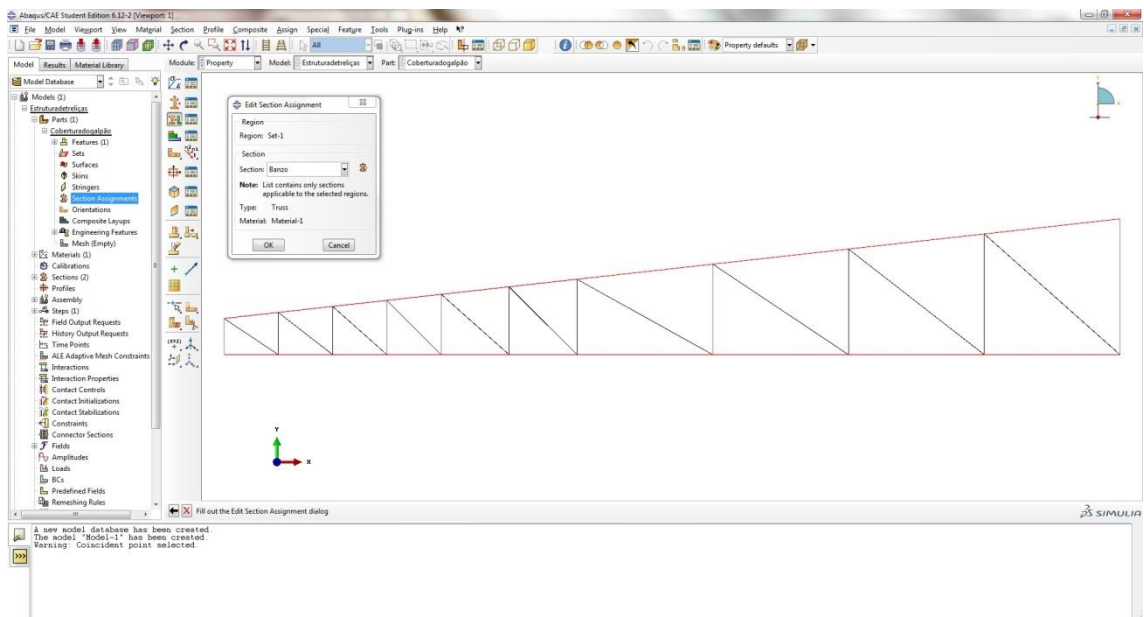
- ✓ Na janela **Edit Section**, que estará aberta, veja que Material-1 está selecionado e em **Cross-sectional área**, digite a área de 0.000342. **Clique em OK.**



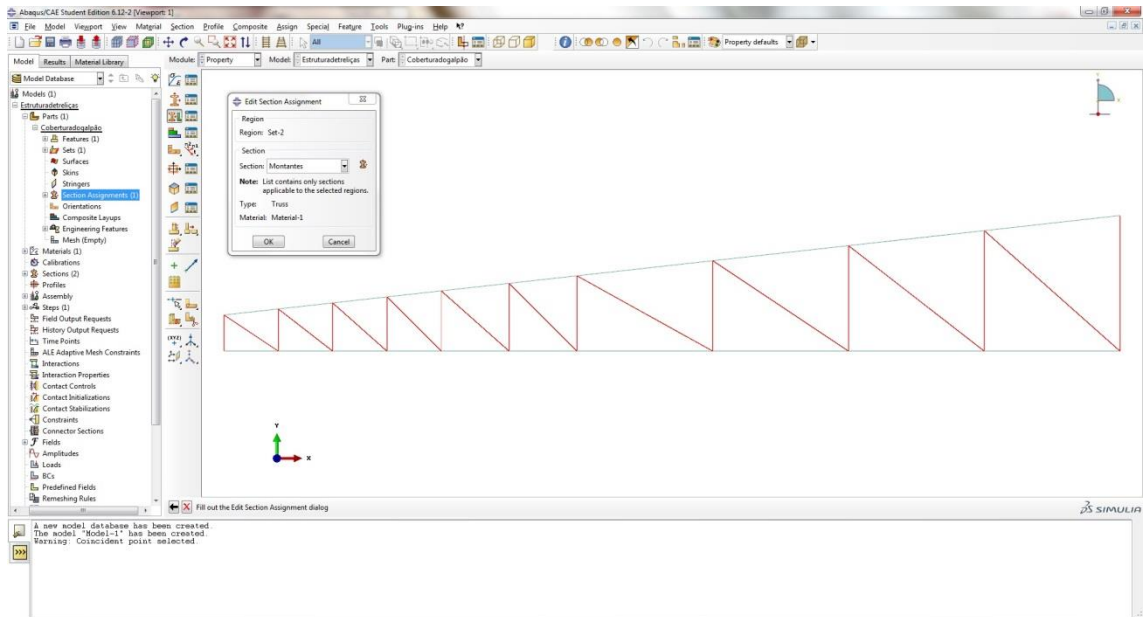
- ✓ **Repita** o ultimo procedimento para criar a seção das barras do banzo superior e inferior (**Name: Banzo**), com área de 0.000678.



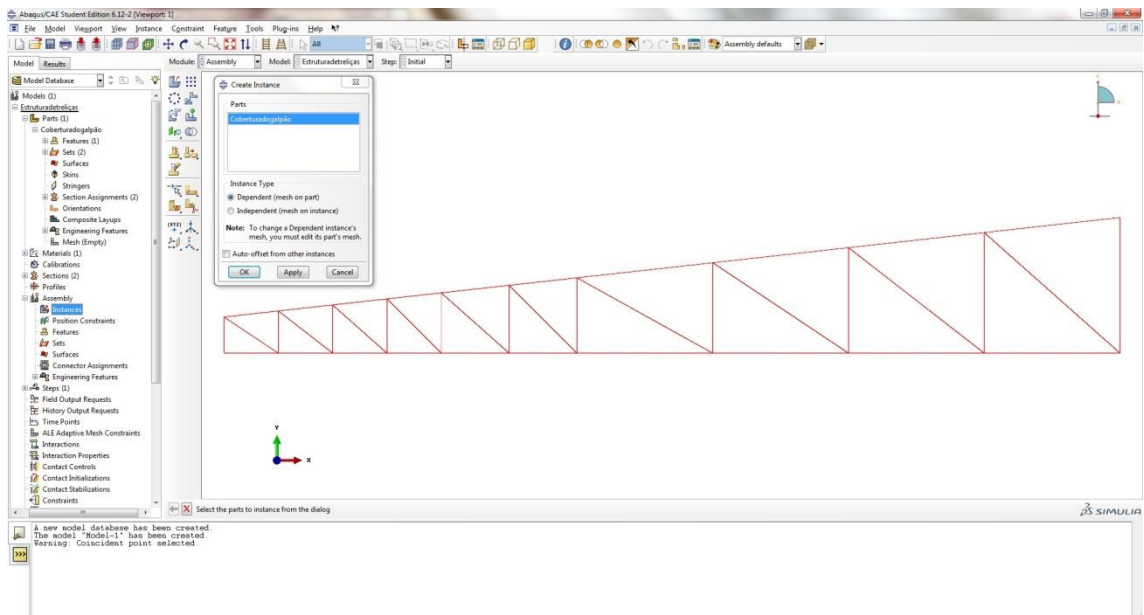
- ✓ No menu **Model** à esquerda, **abra** **Parts>Coberturadogalpão** e **dê** duplo clique em **Section Assignments**. **Selecione** as barras do banzo (superior e inferior) e **clique** em **Done**. **Selecione** a seção **Banzo** e clique em **OK**.



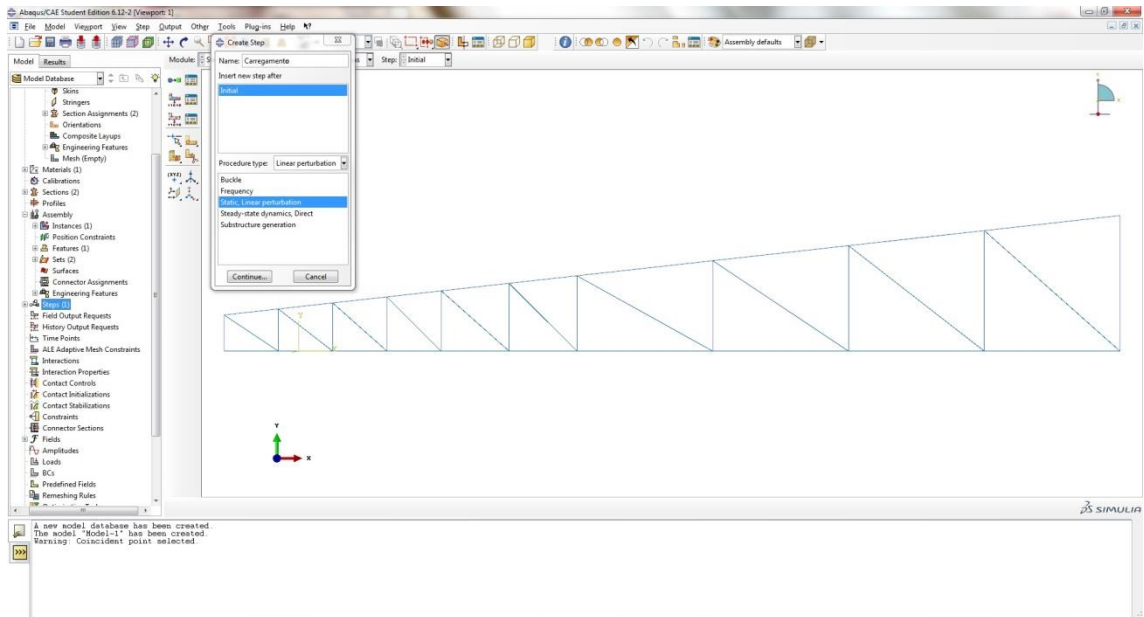
- ✓ **Repita** este procedimento, selecionando as barras do interior da treliça, associando à seção **Montantes**.



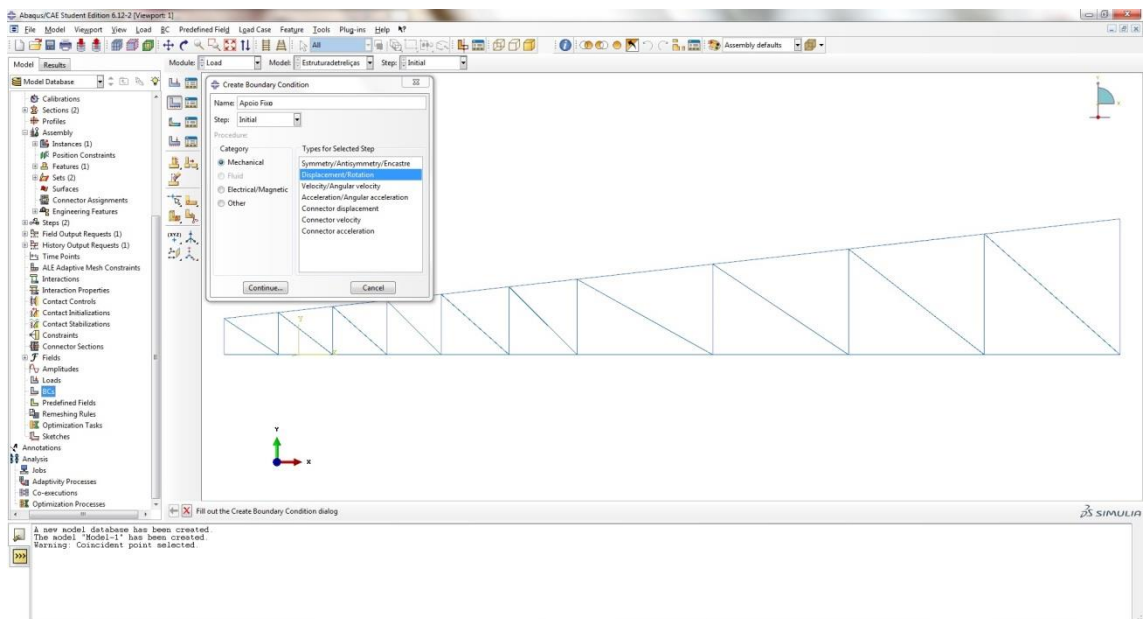
- ✓ No menu **Model** à esquerda, **abra** Assembly e **dê** duplo clique em Instances. **Certifique-se** que o Instance Type consta em “**Dependent (mesh on part)**” e **clique** em OK.



- ✓ No menu **model** à esquerda, **dê** duplo clique em Steps. No campo Name, **digite** Carregamento e em Procedure Type, **selecione** Linear perturbation>Static Linear perturbation. **Clique** em Continue.... Então **clique** OK na nova janela que se abre.



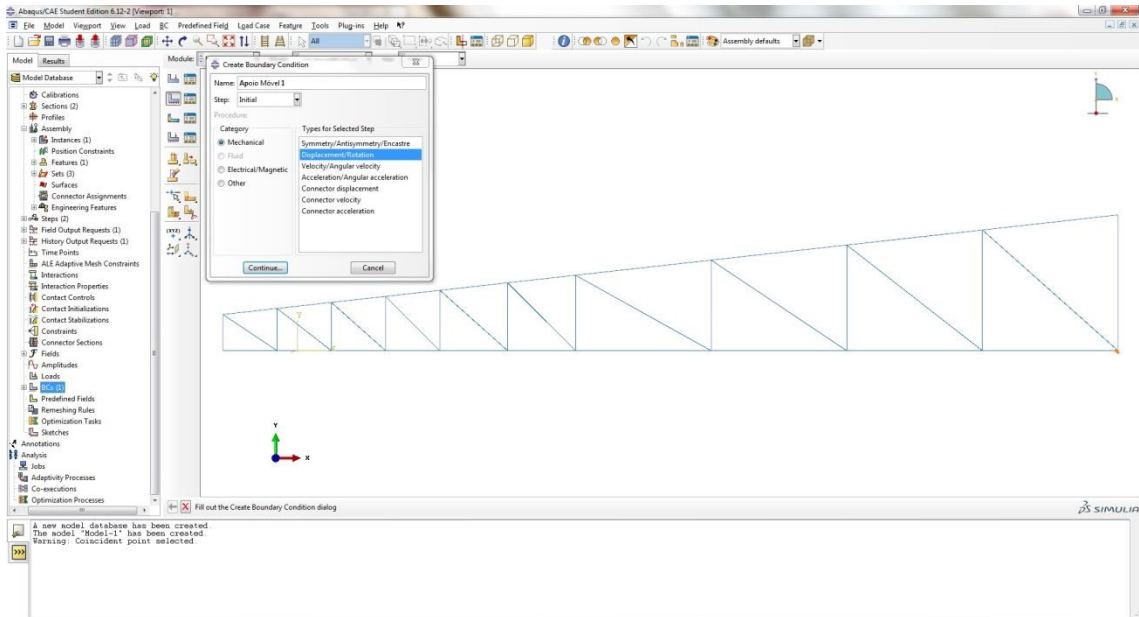
- ✓ No menu **model** à esquerda, **clique** duplo clique em **BCs**. Na janela **Create Boundary Condition**, **altere** o campo **Name** para **Apoio Fixo**, **Step** para **Initial** e **Types for Selected Step** para **Displacement/Rotation**. **Clique** em **Continue...**



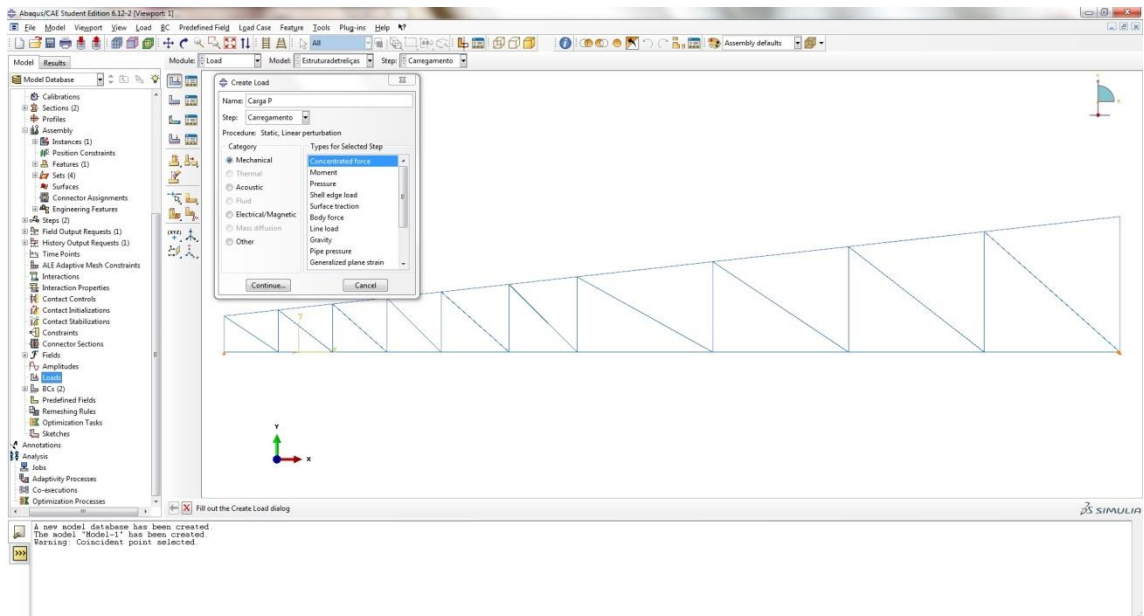
- ✓ **Selecione** o ponto inferior extremo direito da estrutura e **clique** em **Done**. **Marque** na nova janela **U1** e **U2**. **Clique** em **OK**.



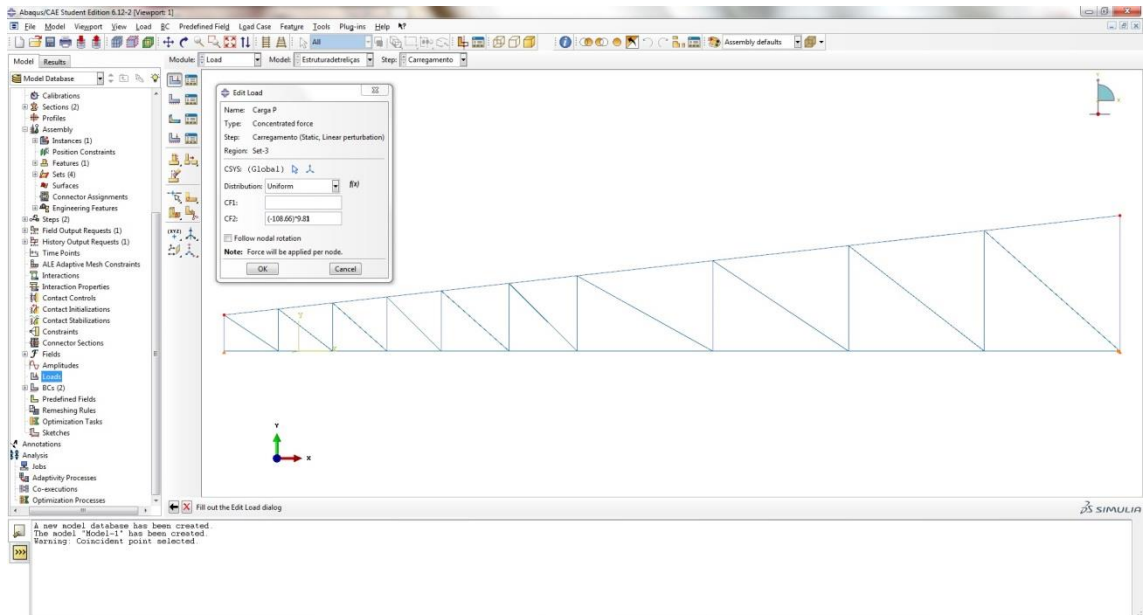
- ✓ **Repita** o procedimento anterior (2 últimos passos) para criar o Apoio Móvel 1 no ponto extremo inferior esquerdo, marcando desta vez apenas **U2**.



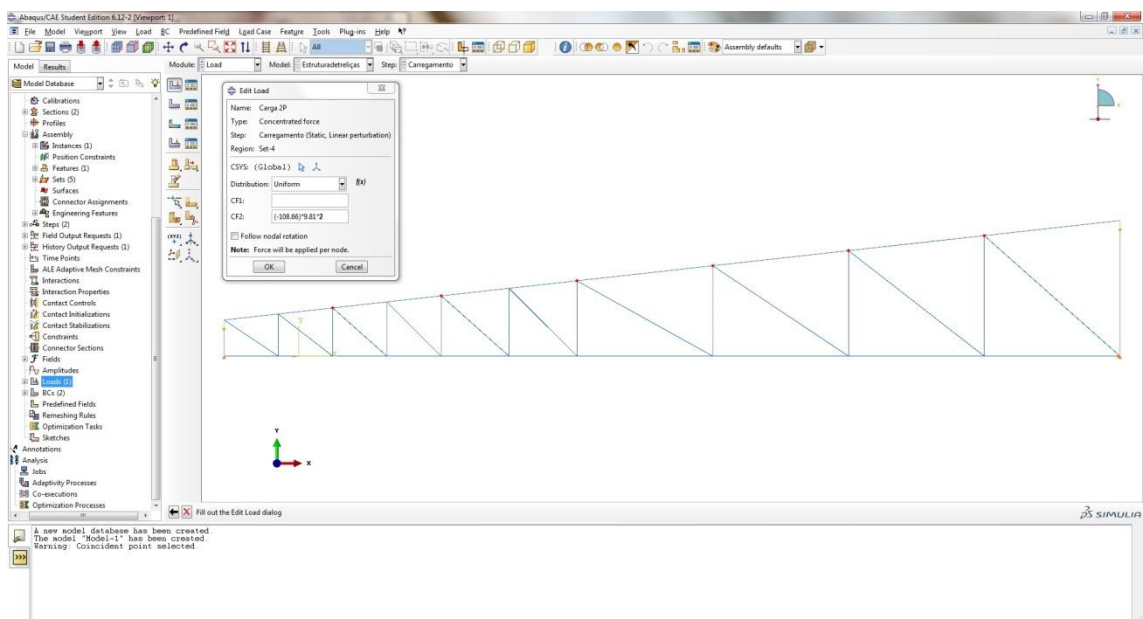
- ✓ No menu **model** à esquerda, **dê** duplo clique em **Loads**. Na janela **Create Load**, no campo **Name** **digite** *Carga P*, **troque** o **Step** para **Carregamento** e **clique** em **Continue....**



- ✓ **Selecione** os nós extremos do banzo superior e **clique** em **Done**. Na janela **Edit Load**, no campo **CF2** **digite**  $(-108.66) \cdot 9.81$  e **clique** em **OK**.

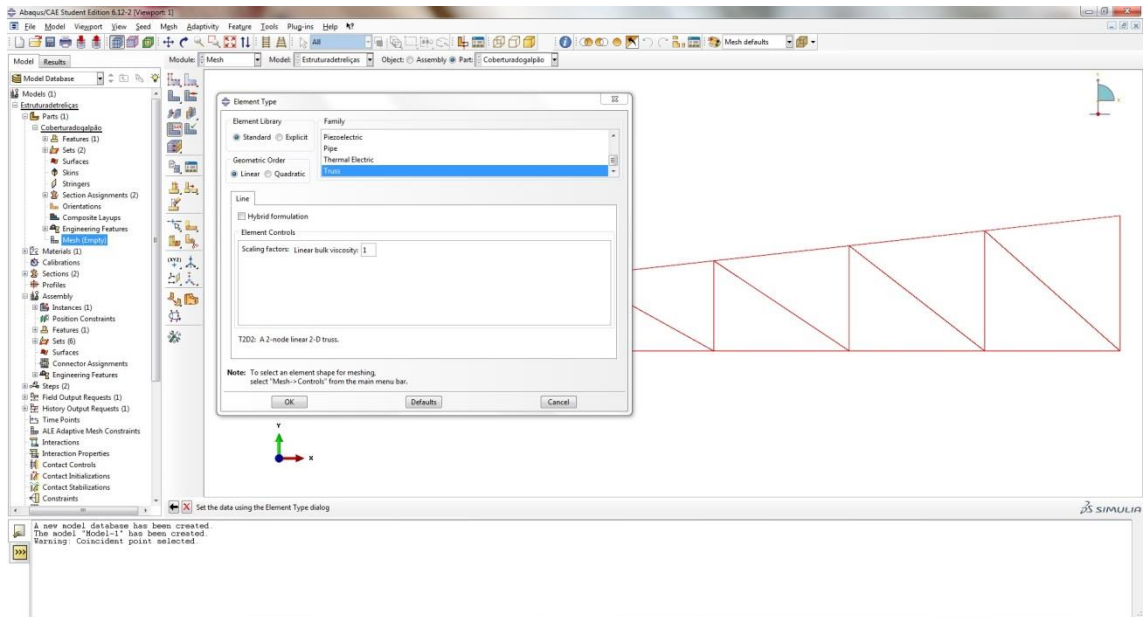


- ✓ **Repita** o procedimento para criar a *Carga 2P*, aplicada nos 3º, 5º, 7º, 8º, 9º e 10º nós do banzo superior da estrutura de intensidade  $(-108.66) \cdot 9.81 \cdot 2$ , aplicando em **CF2**.

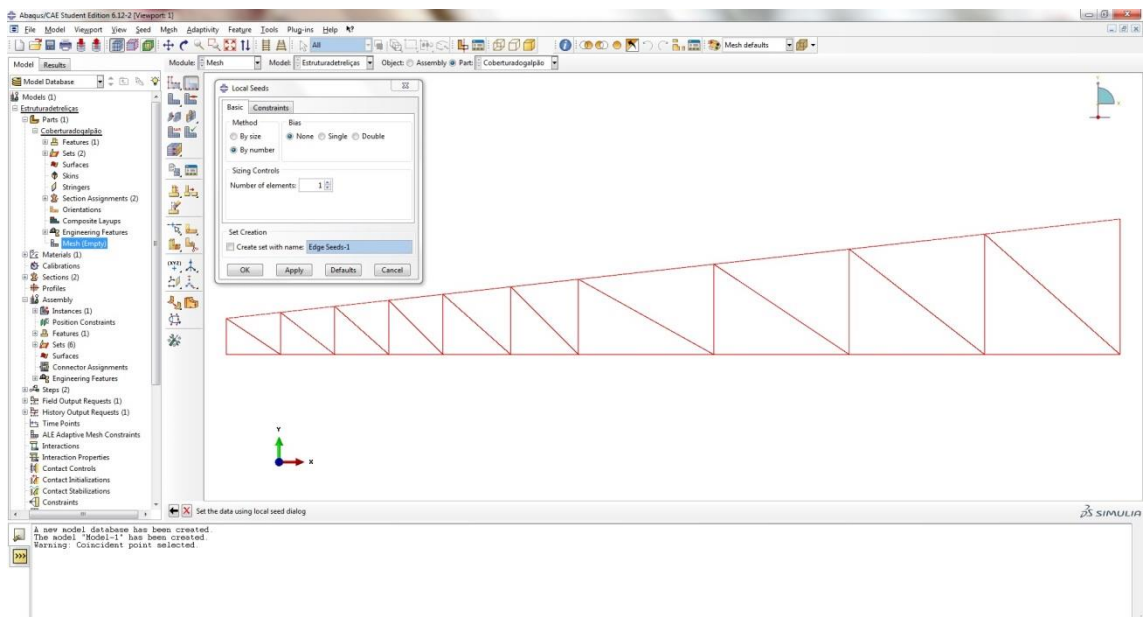


- ✓ No menu **model** à esquerda, **abra** **Parts**>**Coberturadogalpão** e **dê** dois cliques em **Mesh**. Na barra de contexto, em **Object**, **selecione** **Part**. Na barra do menu principal, **clique** em **Mesh**>**Element Type** e **selecione** toda a região da treliça. Clicando em **Done**, abrirá a janela **Element Type**. Em **Family**, **selecione** **Truss** e **clique** **OK**.

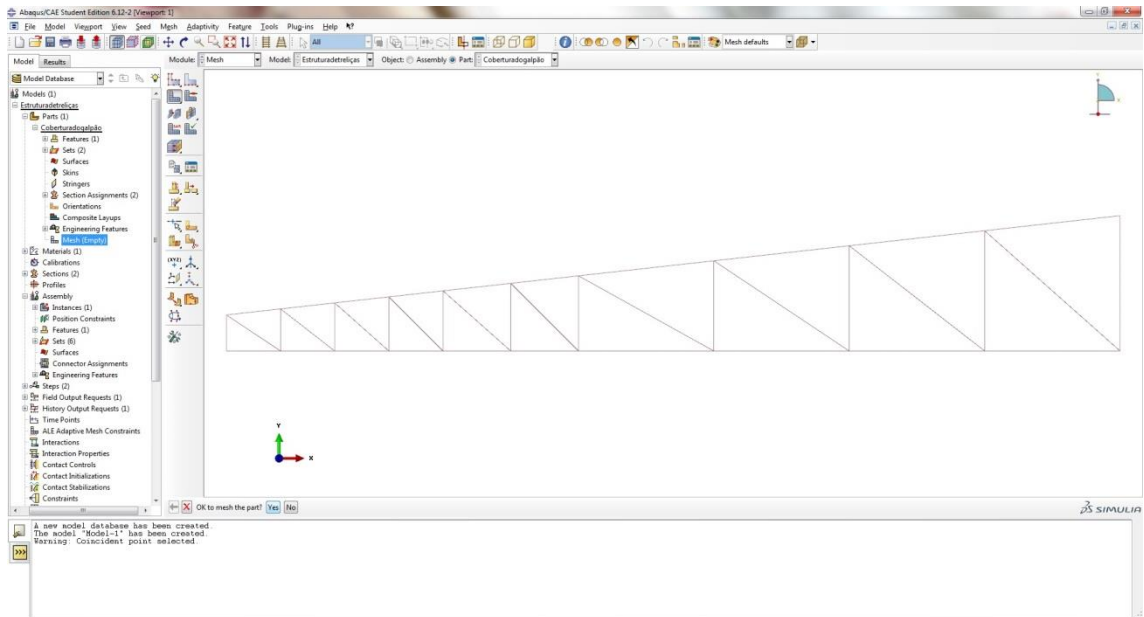




- ✓ Na barra do menu principal, **clique** em **Seed>Edges** e **selecione** toda a região da treliça novamente e **clique** em **Done**. Na janela **Local Seeds**, **altere** **Method** para **By number** e em **Sizing Controls**, **altere** **Number of elements** para **1**. **Clique** em **OK**.

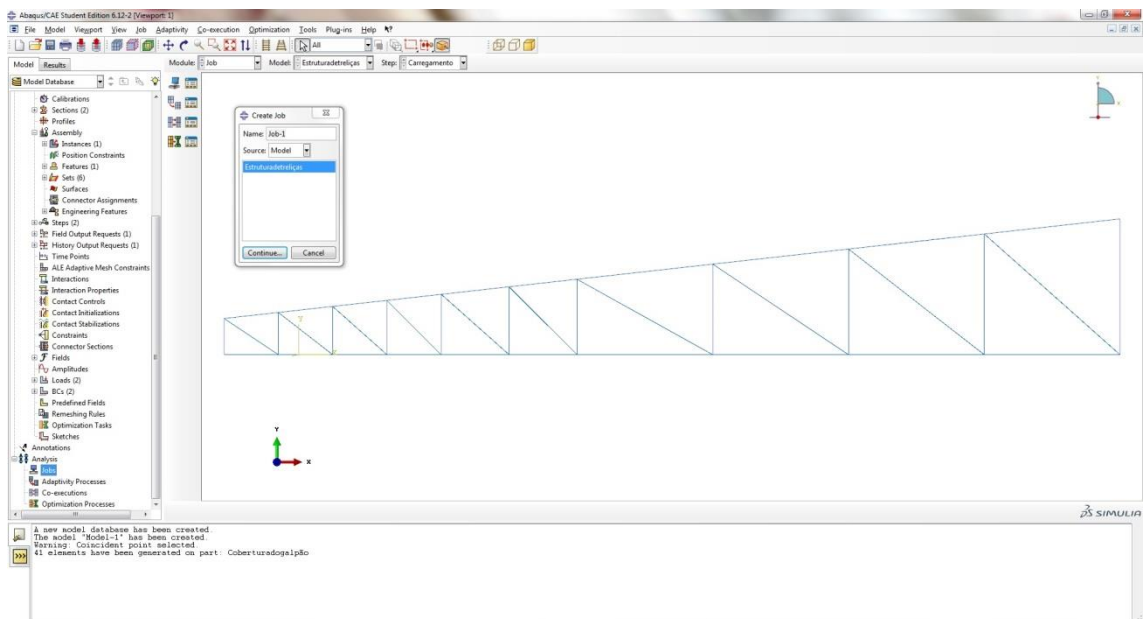


- ✓ Na barra do menu principal, **clique** em **Mesh>Part**. Aparecerá a pergunta “OK to mesh the part?”, **clique** **Yes**. **Note** que a treliça fica na cor azul.

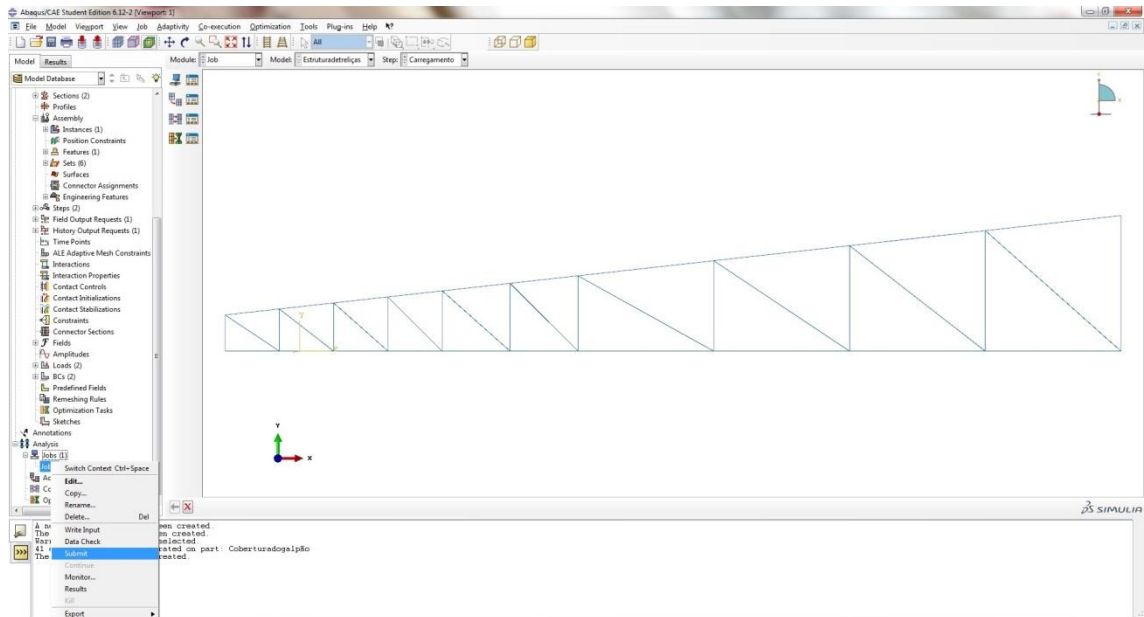


## 2.3. PROCESSAMENTO

- ✓ . No menu model à esquerda, **duplo clique** em Jobs. Na janela Create Job, apenas **clique** em Continue.... Na janela Edit Job, **clique** em OK.

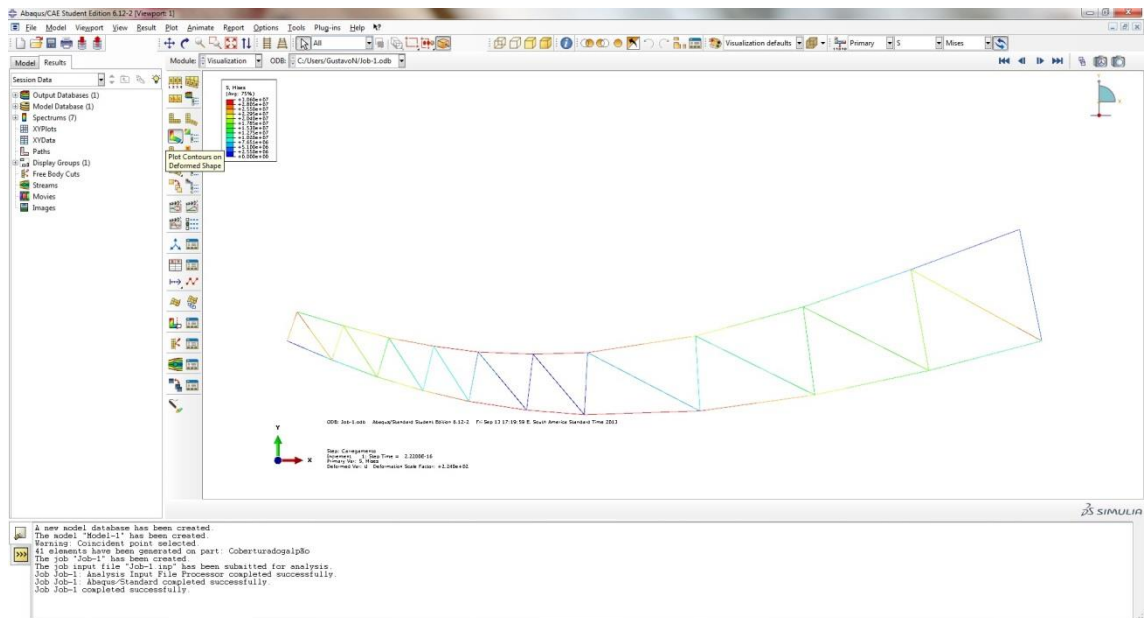


- ✓ **Abra Jobs** e **clique** com o botão direito em Job-1. **Clique** em Submit. Se aparecer uma janela dizendo “Job files already exist for Job-1. OK to overwrite?”, **clique** OK. **Aguarde** o processamento dos dados. Estará concluído quando aparecer “(Completed)” ao lado de Job-1 no menu model à esquerda.



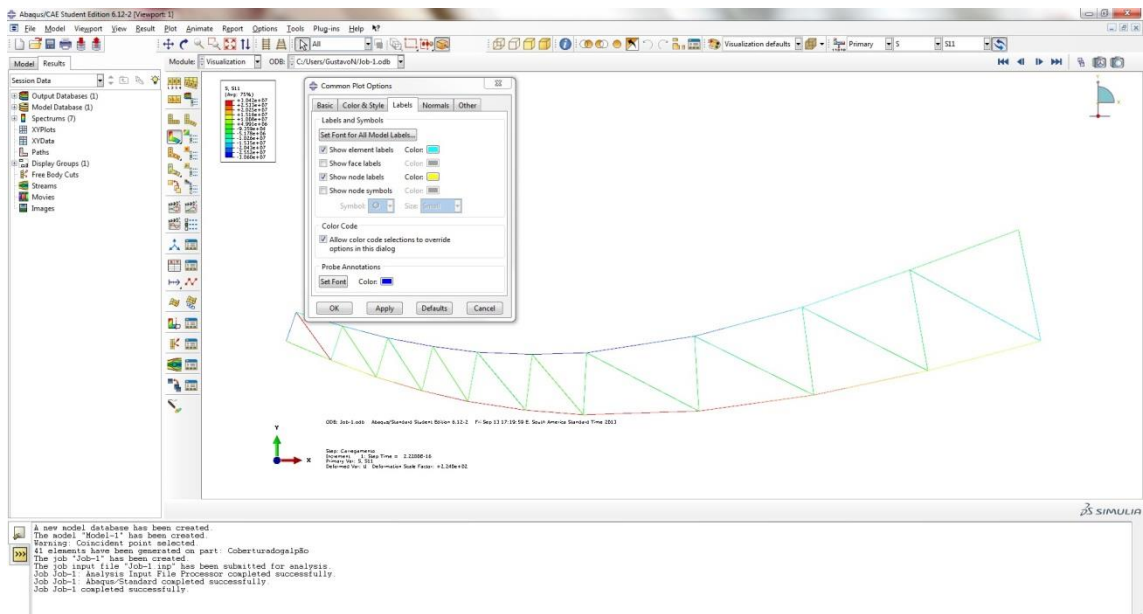
## 2.4. PÓS-PROCESSAMENTO

- ✓ No menu **model** à esquerda, **clique** com o botão direito em **Job-1(Completed)>Results**. A tela de análise de dados se abrirá. Na caixa de ferramentas, **clique** em **Plot Contours on Deformed Shape**.

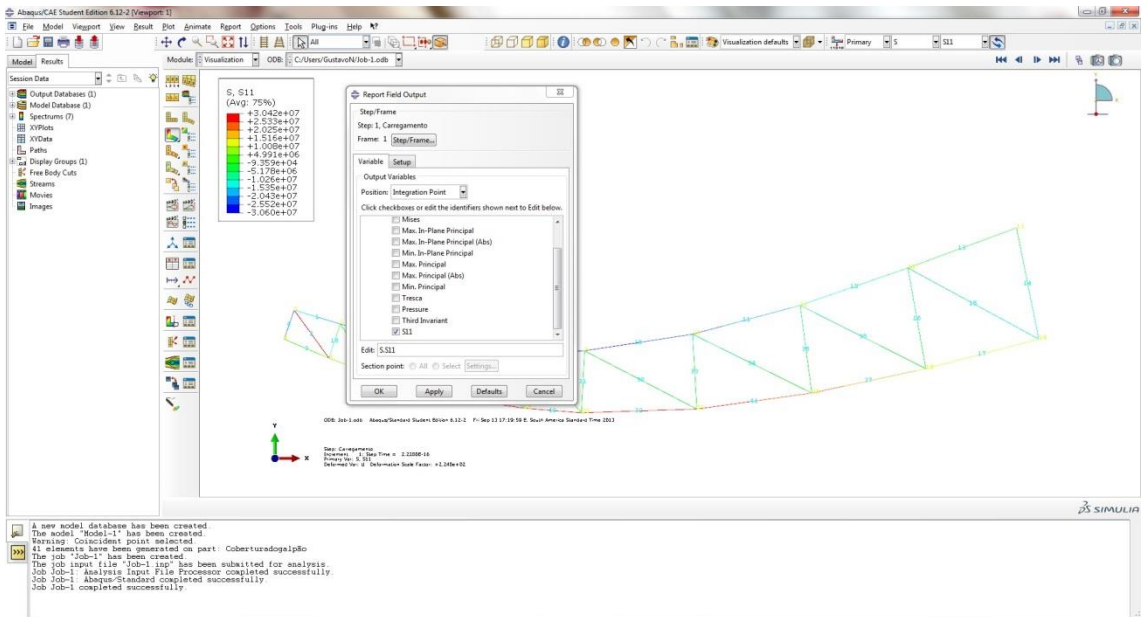


- ✓ Na barra de ferramentas no canto superior à direita, **selecione S11** onde, por padrão, estava selecionado **Mises**. Na caixa de ferramentas, **clique** em **Common Options**. Na janela **Common Plot Options**,

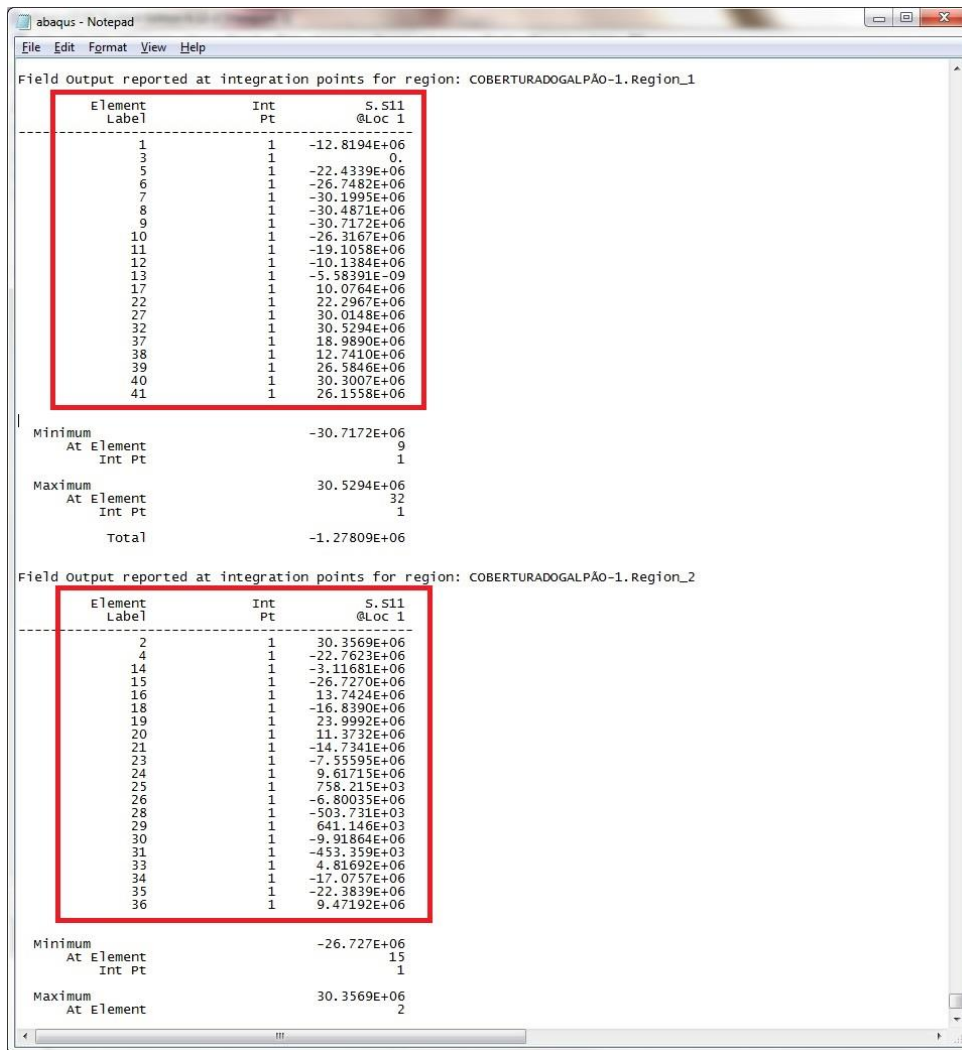
selecione a aba Labels e **marque** Show element labels e show node labels. **Clique** OK.



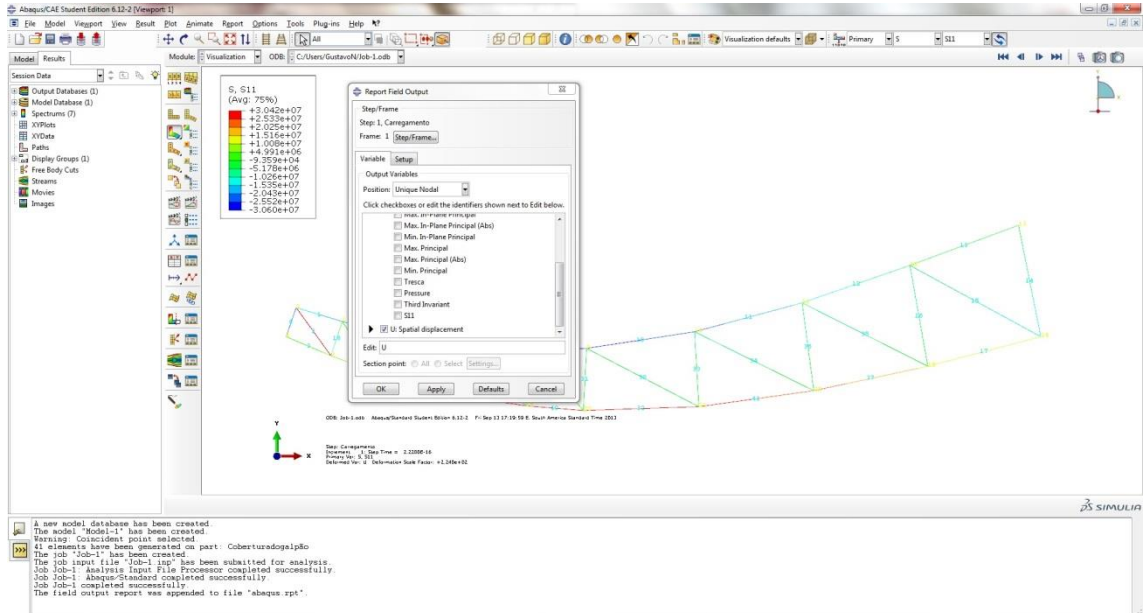
- ✓ Na barra de menu principal, **clique** em **Viewport>Viewport Annotation Options....** Na janela aberta, **selecione** a aba Legend. **Clique** em **Set Font**. Na nova janela, **altere** Size para 14. **Clique** OK nas duas janelas abertas. **Os esforços nas barras já estão exibidos em escala de cores**, mas é possível ainda salvar os valores dos esforços em um documento de texto.
- ✓ Na barra de menu principal, **clique** em **Report>Field Output**. Na janela **Report Field Output**, **clique** em **S: Stress components>S11** e **clique** em **OK**. A mensagem aparecerá: “The field output report was appended to file “abaqus.rpt.”” O arquivo **abaqus.rpt** pode ser encontrado em **C:\Users\”Nome do Usuário”\abaqus.rpt**.



✓ O arquivo listará os esforços das barras.



- ✓ Na barra do menu principal, **clique** em Report Field Output. Na janela Report Field Output, **desmarque** Stress Components e no campo Position **selecione** Unique Nodal. Então **marque** U: Spatial Displacement e **clique** OK.



- ✓ O arquivo listará o deslocamento dos nós.



```

abaqus - Notepad
File Edit Format View Help
29          1      641.146E+03
30          1      9.91864E+06
31          1     -453.359E+03
33          1      4.81692E+06
34          1     -17.0757E+06
35          1     -22.3839E+06
36          1      9.47192E+06

Minimum
At Element          -26.727E+06
Int Pt              15
                   1

Maximum
At Element          30.3569E+06
Int Pt              2
                   1

Total              -44.0938E+06

*****
Field output Report, written Fri Sep 13 17:26:15 2013

Source 1
-----
ODB: c:/Users/[redacted]/Job-1.odb
Step: Carregamento
Frame: Increment      1: Step Time = 2.2200E-16

Loc 1 : Nodal values from source 1
Output sorted by column "Node Label".
Field output reported at nodes for part: COBERTURADOGALPÃO-1

Node  U.Magnitude  U.U1  U.U2
Label @Loc 1    @Loc 1 @Loc 1
-----
1      1.22153E-03  -335.111E-06 -1.17466E-03
2      425.224E-06 -422.921E-06 -44.1964E-06
3      1.52940E-03  -1.02342E-03 -1.13652E-03
4      1.02342E-03  -1.02342E-03 -7.78470E-33
5      2.21312E-03  -287.962E-06 -2.19430E-03
6      3.00846E-03  -277.793E-06 -2.99561E-03
7      3.65175E-03  -295.258E-06 -3.63980E-03
8      4.15646E-03  -351.871E-06 -4.14154E-03
9      4.44180E-03  -434.081E-06 -4.42054E-03
10     4.22071E-03  -655.965E-06 -4.16943E-03
11     3.30665E-03  -906.743E-06 -3.17990E-03
12     2.03726E-03  -1.14778E-03 -1.68316E-03
13     1.33247E-03  -1.33228E-03 -22.6941E-06
14     0.          0.          -7.13866E-33
15     1.77363E-03  -73.3684E-06 -1.77211E-03
16     2.37104E-03  -986.317E-06 -2.15616E-03
17     3.11308E-03  -921.378E-06 -2.97361E-03
18     3.71492E-03  -843.951E-06 -3.61779E-03
19     4.20439E-03  -734.679E-06 -4.13970E-03
20     4.46260E-03  -624.367E-06 -4.41870E-03
21     4.21204E-03  -402.076E-06 -4.19281E-03
22     3.24046E-03  -211.631E-06 -3.23354E-03

Minimum
At Node          0.      -1.33228E-03  -4.42054E-03
Int Pt          14      13      9

Maximum
At Node          4.4626E-03  0.      -7.13866E-33
Int Pt          20      14      14

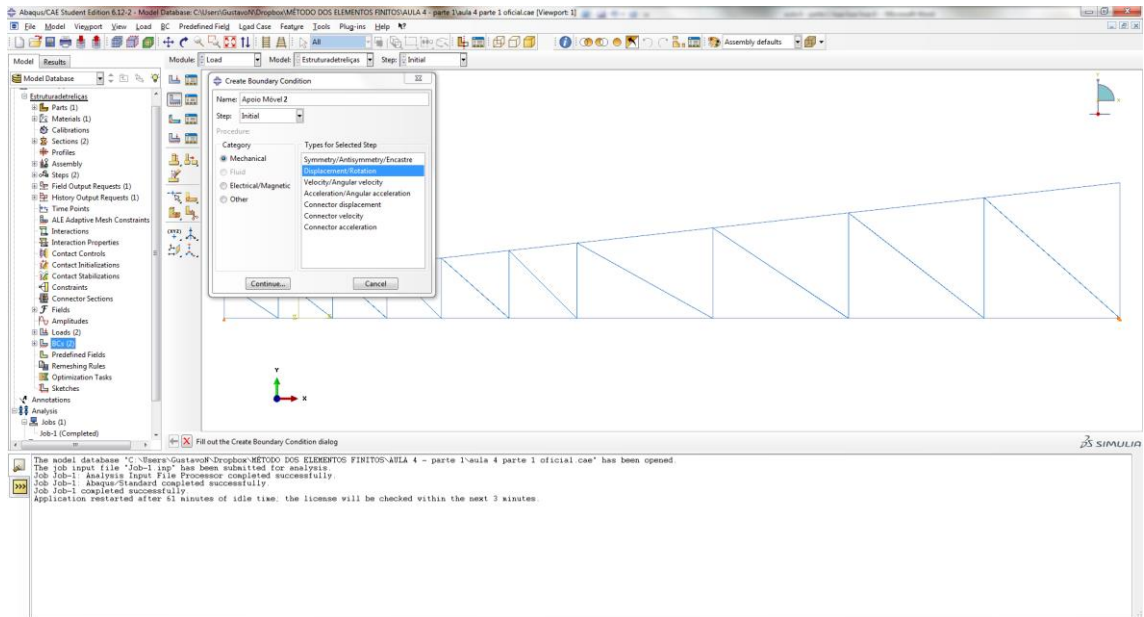
Total          59.6604E-03  -13.2924E-03  -55.3068E-03

```

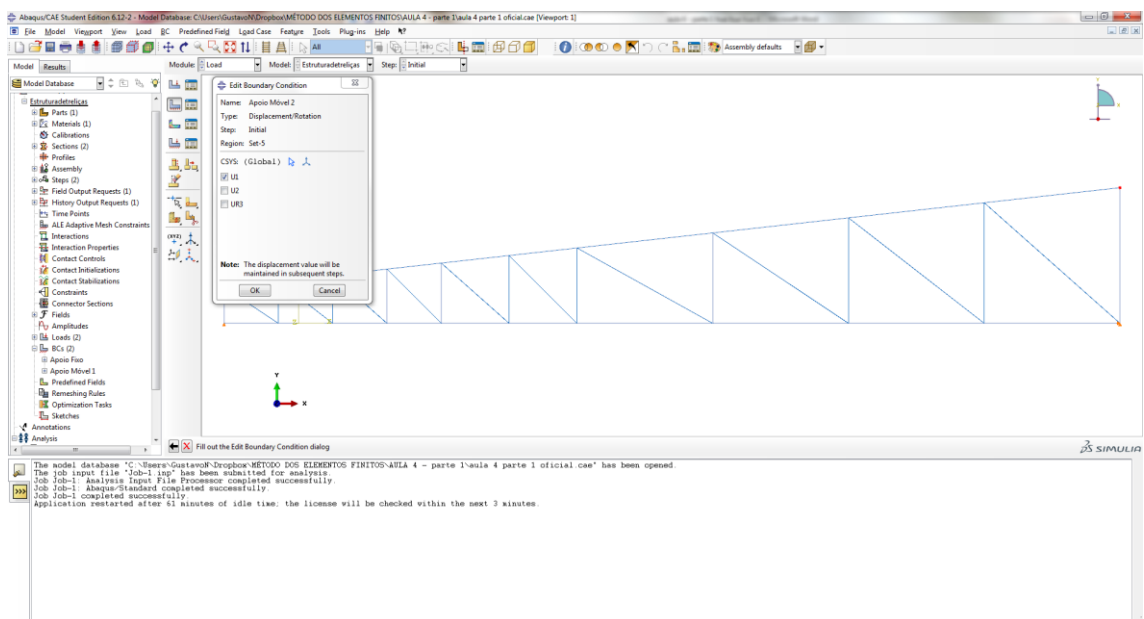
- ✓ Na barra do menu principal, **clique** em **File>Save As...** **Dê** um nome ao arquivo e **clique** em **OK** (É possível também salvar o arquivo com os resultados já calculados da situação 1- **job-1.odb**).

## 2.5. SEGUNDO PRÉ-PROCESSAMENTO

- ✓ Até aqui o problema foi resolvido segundo a situação 1 onde o outro lado simétrico da treliça foi desprezado. Agora deve-se assumir essa simetria aplicando um apoio do tipo móvel no ponto extremo direito da cobertura, conforme sugere o problema.
- ✓ O menu a esquerda está na aba Results, logo **troque** para a aba **Model**. **Dê** duplo-clique em **BCs**. No campo **Name**: **digite** Apoio Móvel 2, em **Types for Selected Step** **selecione** Displacement/Rotation e **clique** em **Continue...**



- ✓ **Selecione** o ponto extremo direito do banzo superior e **clique** em Done. Na janela Edit Boundary Condition, **marque U1** e **clique** em OK.



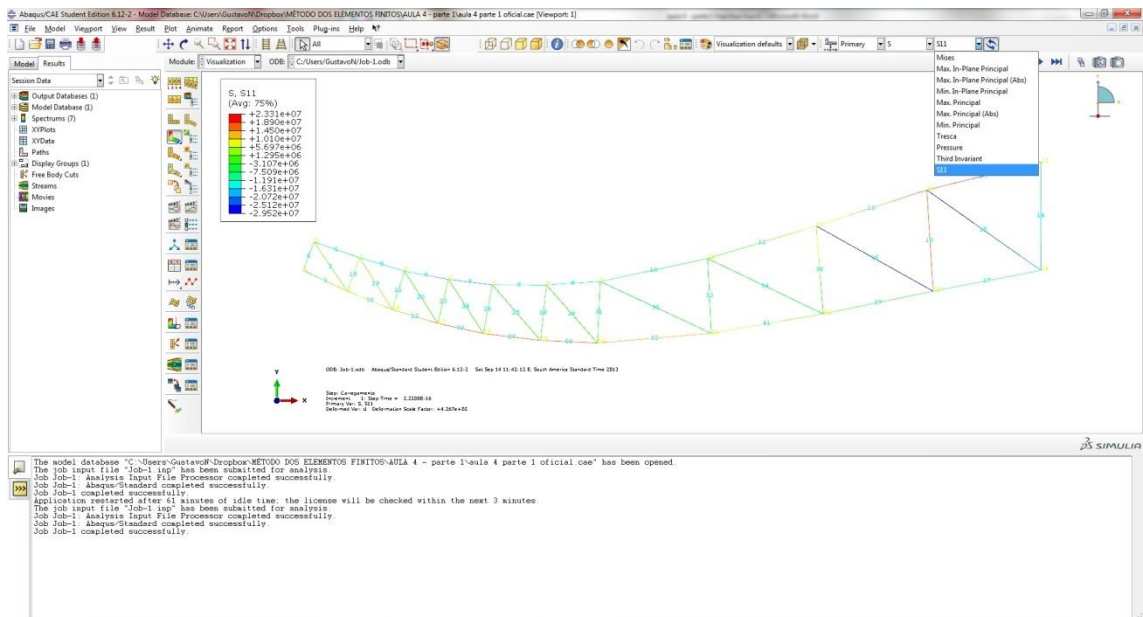
## 2.6. SEGUNDO PROCESSAMENTO

- ✓ No menu Model a esquerda, **clique** com o botão direito do mouse em **Job-1 (Completed)** e **selecione** Submit. Aparecerá a mensagem “Job files already exist for Job-1. OK to overwrite?”, **clique** em OK. **Aguarde** o re-processamento.

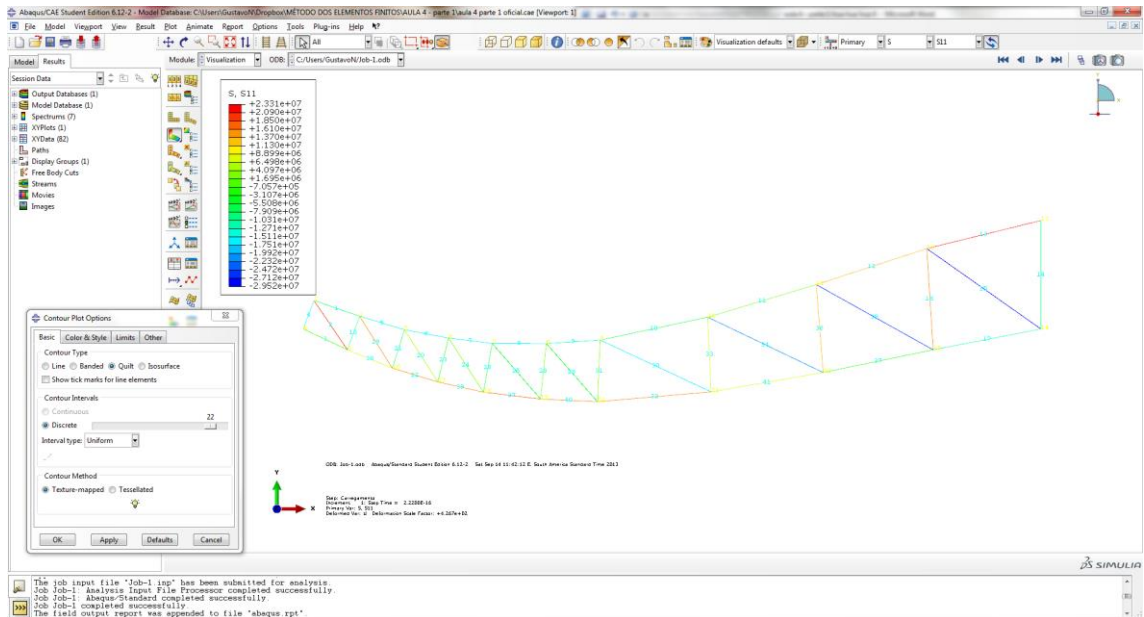


## 2.7. SEGUNDO PÓS-PROCESSAMENTO

- ✓ No menu Model a esquerda, **clique** com o botão direito do mouse em **Job-1 (Completed)** e **selecione Results**. A tela de análise de dados se abrirá. Na caixa de ferramentas, **clique** em **Plot Contours on Deformed Shape** e na barra de ferramentas no canto superior à direita, **selecione S11** onde estava selecionado Mises.



- ✓ Na caixa de ferramentas, **clique** em **Contour Options**, e na janela **Contour Plot Options** **altere** **Contour Type** para **Quilt** e em **Contour Intervals**, **defina** outro valor ao lado da seleção **Discrete**. **Clique** **Apply** e **perceba** quais foram as mudanças (Na legenda e nas cores das barras). **Clique** **OK**.



- ✓ Na barra de menu principal, **clique** em **Report>Field Output**. Na janela **Report Field Output**, **clique** em **S: Stress components>S11** e **clique** em **OK**. A mensagem aparecerá: “The field output report was appended to file “abaqus.rpt”.” O arquivo **abaqus.rpt** pode ser encontrado em **C:\Users\Nome do Usuário\abaqus.rpt**. **Repita** desmarcando **Stress Components** na janela **Report Field Output**, e no campo **Position** selecionando **Unique Nodal** e marcando **U:Spatial Displacement**. **Clique OK**.
- ✓ Os esforços nas barras e os deslocamentos dos nós.

```

abaqus - Notepad
File Edit Format View Help
Field output reported at integration points for region: COBERTURADOGALPÃO-1.Region_1

```

Element Label	Int PT	S, S11 @Loc 1
1	1	-8.27928E+06
5	1	0.
5	1	-14.4887E+06
6	1	-16.1546E+06
7	1	-17.4872E+06
8	1	-15.6561E+06
9	1	-14.1912E+06
10	1	-7.24825E+06
11	1	1.77870E+06
12	1	12.1081E+06
13	1	23.3059E+06
17	1	-12.0341E+06
22	1	14.4001E+06
27	1	17.3803E+06
32	1	14.1044E+06
37	1	-1.76782E+06
38	1	8.22864E+06
39	1	16.0557E+06
40	1	15.5803E+06
41	1	7.20392E+06

```

Minimum -17.4872E+06
At Element 7
Int PT 1

Maximum 23.3059E+06
At Element 13
Int PT 1

Total 22.8190E+06

Field output reported at integration points for region: COBERTURADOGALPÃO-1.Region_2

```

Element Label	Int PT	S, S11 @Loc 1
2	1	19.6057E+06
4	1	-15.8046E+06
14	1	-8.21908E+06
15	1	-29.5197E+06
16	1	15.8297E+06
18	1	-10.8753E+06
19	1	15.4897E+06
20	1	4.39145E+06
21	1	-9.51587E+06
23	1	-2.91752E+06
24	1	3.71340E+06
25	1	-4.82719E+06
26	1	-2.62575E+06
28	1	3.20701E+06
29	1	-4.08185E+06
30	1	-15.6493E+06
31	1	2.88631E+06
33	1	7.59997E+06
34	1	-21.3762E+06
35	1	-25.7837E+06
36	1	11.8574E+06

```

Minimum -29.5197E+06
At Element 15
Int PT 1

Maximum 19.6057E+06
At Element 2
Int PT 1

Total -66.6056E+06

```

```

abaqus - Notepad
File Edit Format View Help

```

29	1	-4.08185E+06
30	1	-15.6493E+06
31	1	2.88631E+06
33	1	7.59997E+06
34	1	-21.3762E+06
35	1	-25.7837E+06
36	1	11.8574E+06

```

Minimum -29.5197E+06
At Element 15
Int PT 1

Maximum 19.6057E+06
At Element 2
Int PT 1

Total -66.6056E+06

*****
Field Output Report, written Sat Sep 14 12:02:28 2013
Source 1
ODB: C:/Users/.../Job-1.odb
Step: Carregamento
Frame: Increment 1: Step Time = 2.2200E-16
Loc 1 : Nodal values from source 1
Output sorted by column "Node Label".
Field output reported at nodes for part: COBERTURADOGALPÃO-1

```

Node Label	U.Magnitude @Loc 1	U.U1 @Loc 1	U.U2 @Loc 1
1	695.828E-06	101.035E-06	-688.454E-06
2	60.6906E-06	52.3607E-06	-30.6871E-06
3	723.302E-06	-287.247E-06	-663.818E-06
4	287.247E-06	-287.247E-06	-5.40519E-33
5	1.28061E-03	123.448E-06	-1.27465E-03
6	1.70122E-03	122.723E-06	-1.69679E-03
7	2.02707E-03	107.544E-06	-2.02422E-03
8	2.22452E-03	71.9688E-06	-2.22336E-03
9	2.30877E-03	29.1363E-06	-2.30859E-03
10	1.97024E-03	-61.0941E-06	-1.96926E-03
11	1.32667E-03	-120.896E-06	-1.32115E-03
12	575.001E-06	-115.861E-06	-563.207E-06
13	59.8447E-06	-15.7048E-33	-59.8447E-06
14	0.	15.7048E-33	-9.51817E-33
15	671.402E-06	87.6226E-06	-665.660E-06
16	1.27744E-03	-263.281E-06	-1.25001E-03
17	1.70274E-03	-221.341E-06	-1.68829E-03
18	2.02327E-03	-174.579E-06	-2.01572E-03
19	2.23780E-03	-111.305E-06	-2.23503E-03
20	2.32090E-03	54.6558E-06	-2.32026E-03
21	2.00673E-03	48.0413E-06	-2.00615E-03
22	1.39193E-03	100.495E-06	-1.38830E-03

```

Minimum 0.
At Node 14
Int PT 4

Maximum 2.3209E-03
At Node 20
Int PT 5

Total 28.8732E-03
-854.034E-06
-28.3934E-03

```

- ✓ 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 da situação 2 - **job-1.odt**).