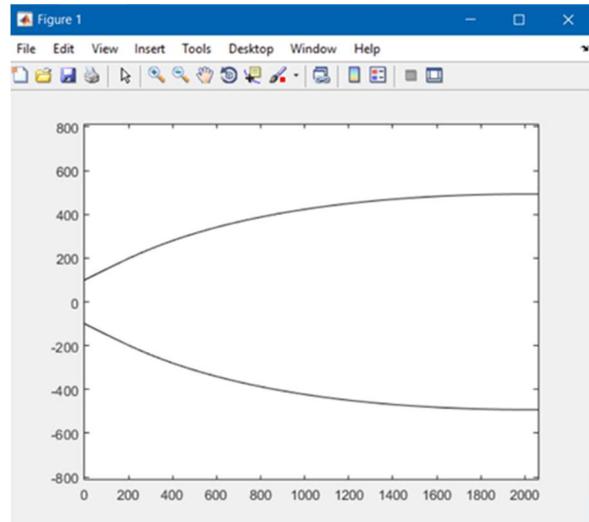
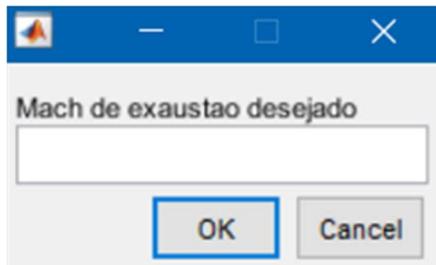
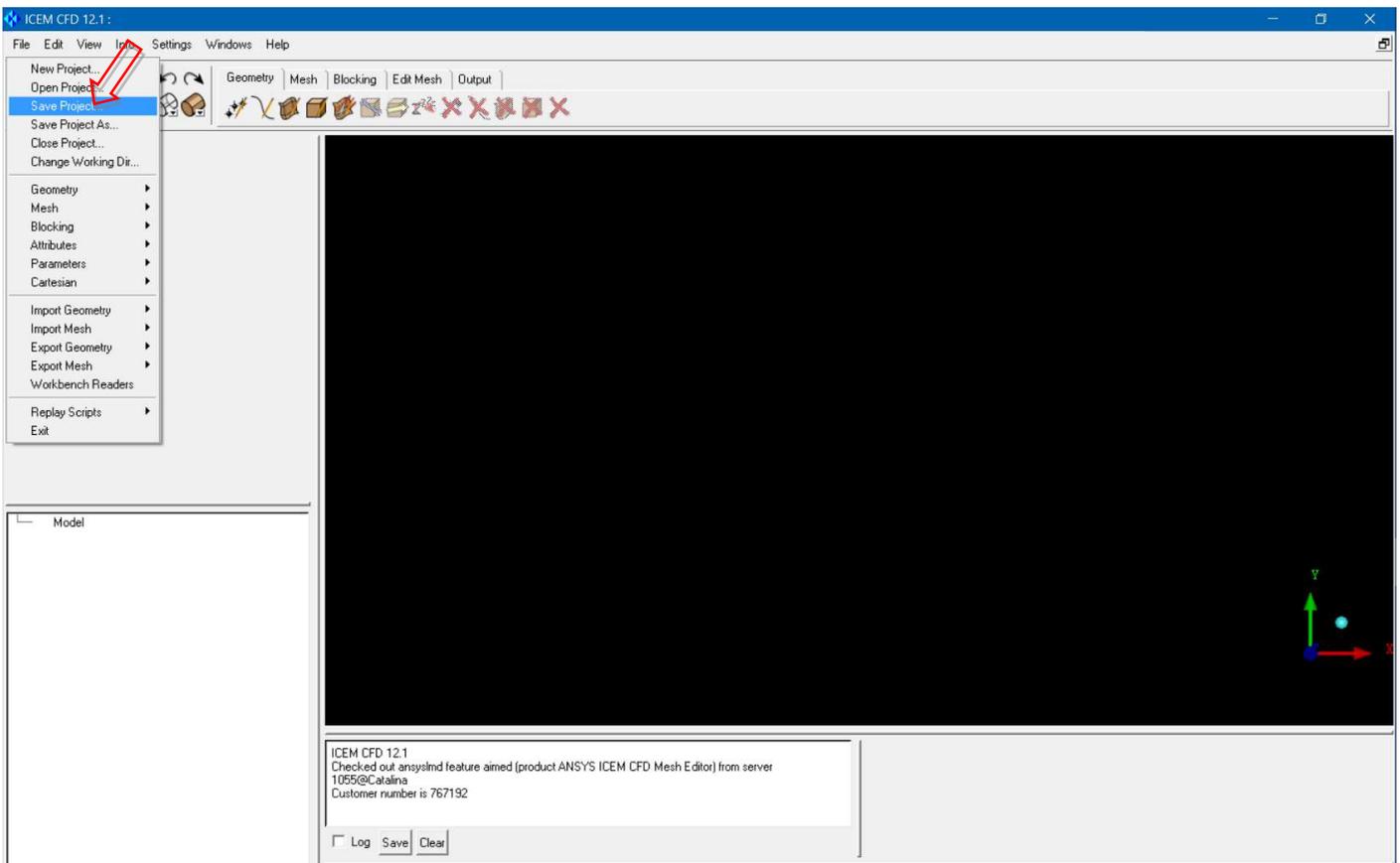


Tutorial para Simulação de Bocal Tipo Sino

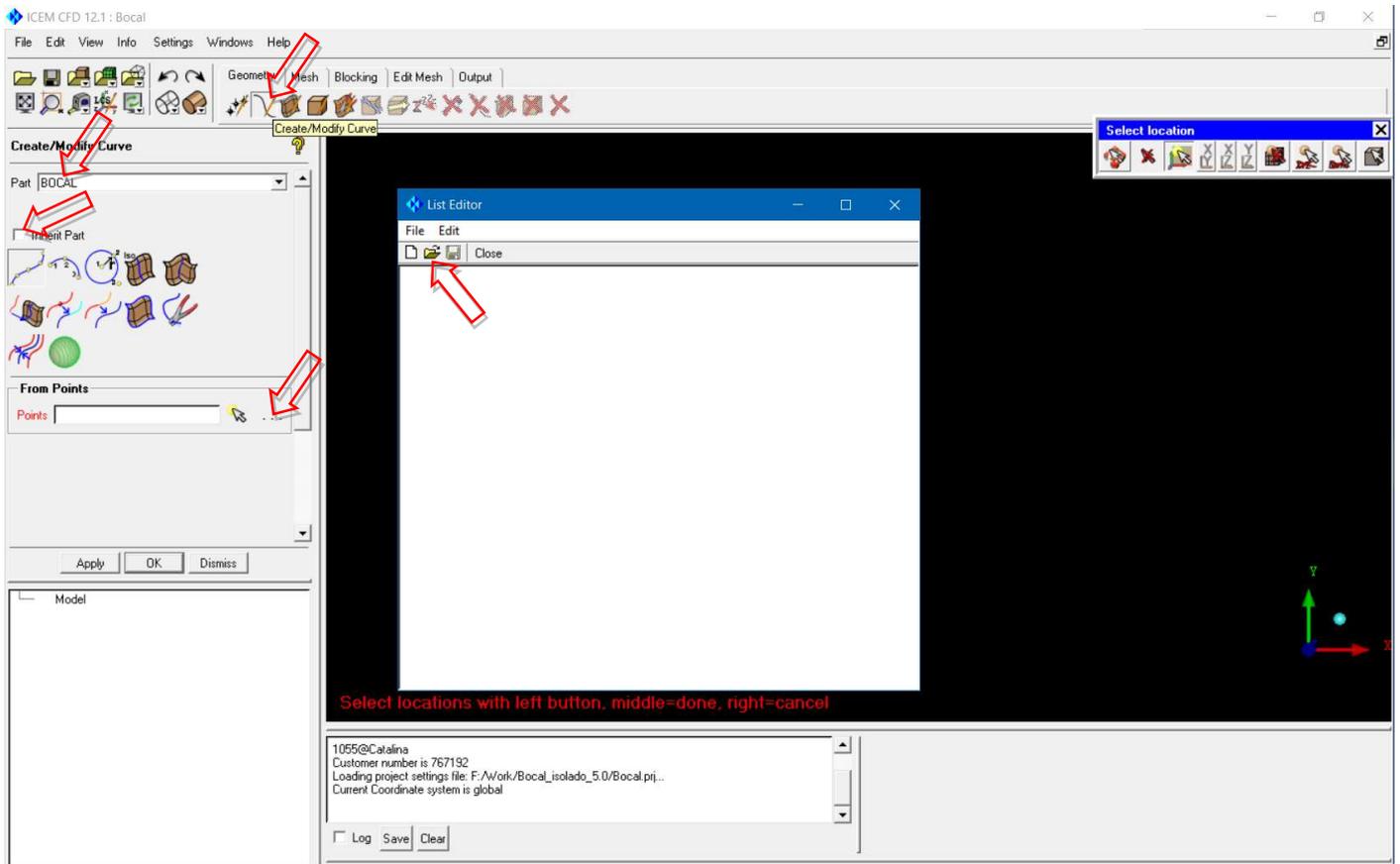
Abra o software Matlab. Execute o script bocal.m. Será gerado o arquivo perfil.txt com as coordenadas da parte divergente do bocal segundo o método das características. O único dado de entrada é o Mach desejado na saída do bocal. A figura mostra como fica a geometria (nesse caso para Mach 5).



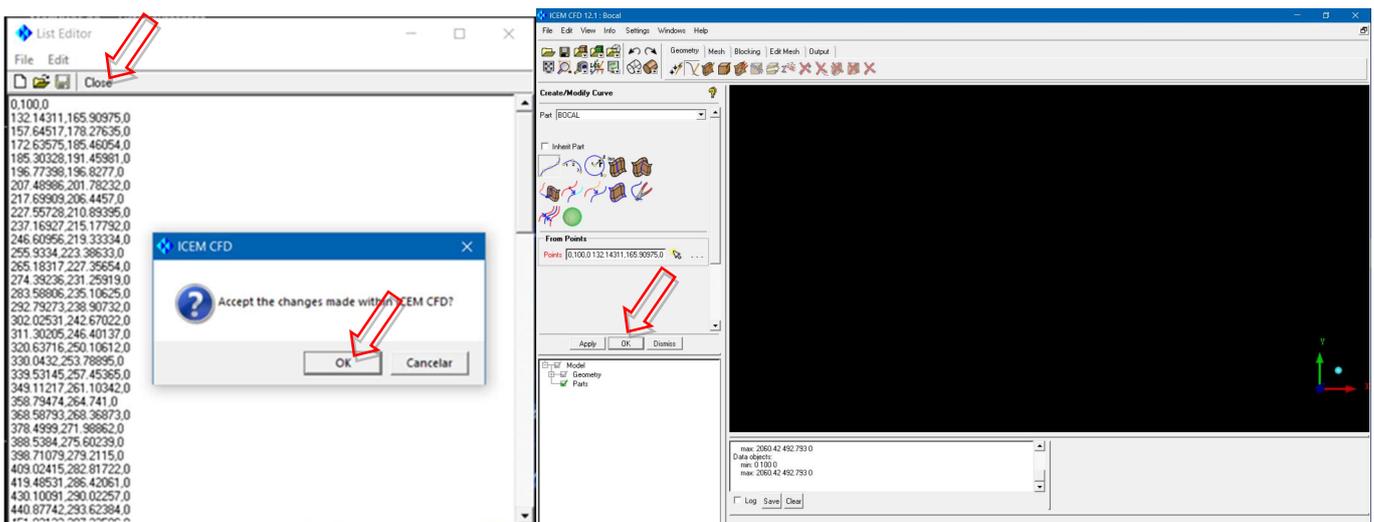
Abra o software ICEM. Salve o projeto com o nome Bocal.



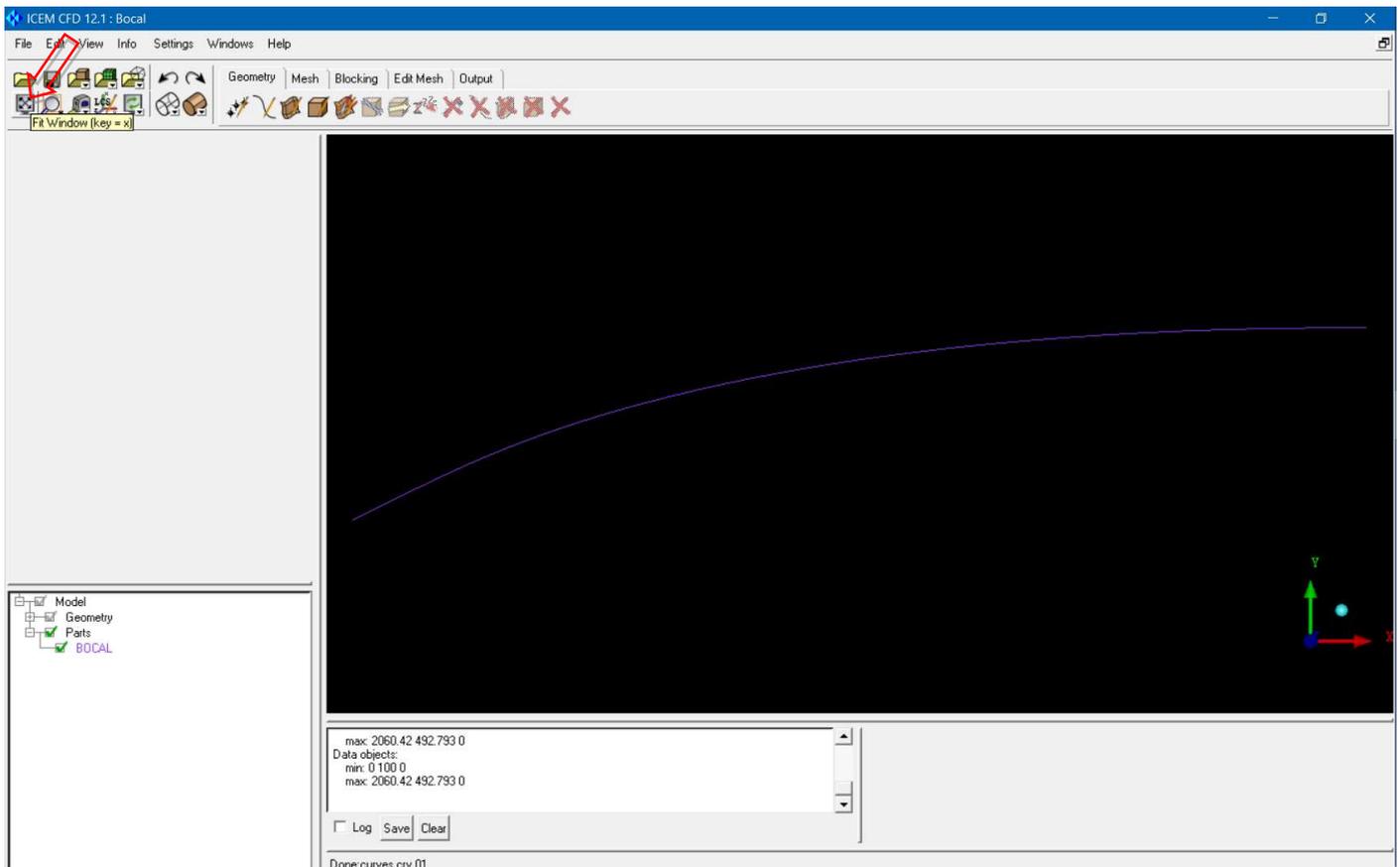
Clique em “Create/Modify Curve” > ”From Points” > De-selecione a caixa “Inherit Part” > Coloque o nome “BOCAL” na caixa “Part” > Clique nos três pontinhos para abrir o diálogo “List Editor” > Clique em “Open” > Selecione o arquivo “perfil.txt”.



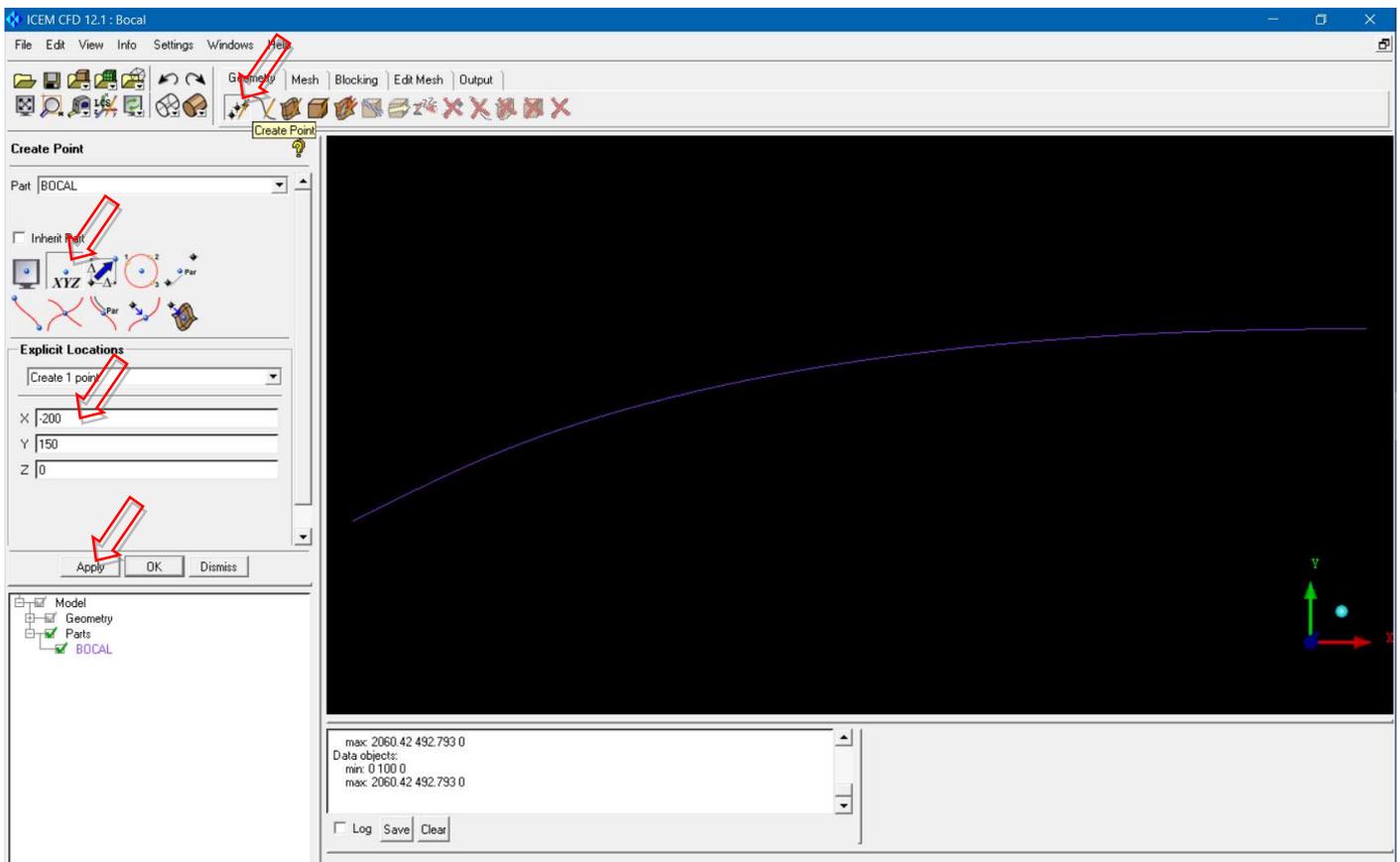
Por um defeito do software a caixa “List Editor” se esconde na atrás da janela principal do ICEM. Encontre a janela do “List Editor” e clique em “Close” > “OK”. Clique em “OK” na janela principal do ICEM.



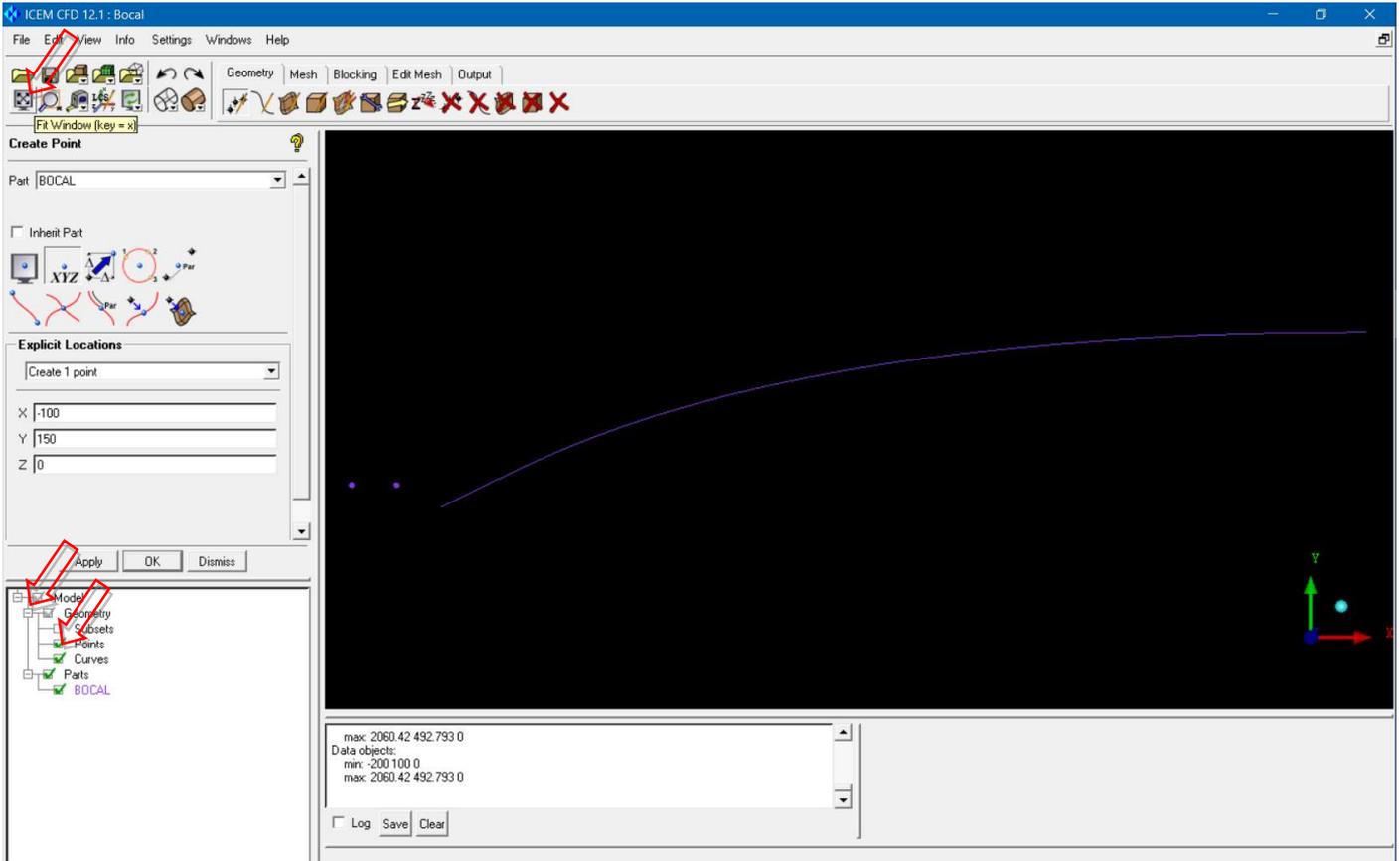
Clique em "Fit Window". A curva que descreve o bocal ficará visível.



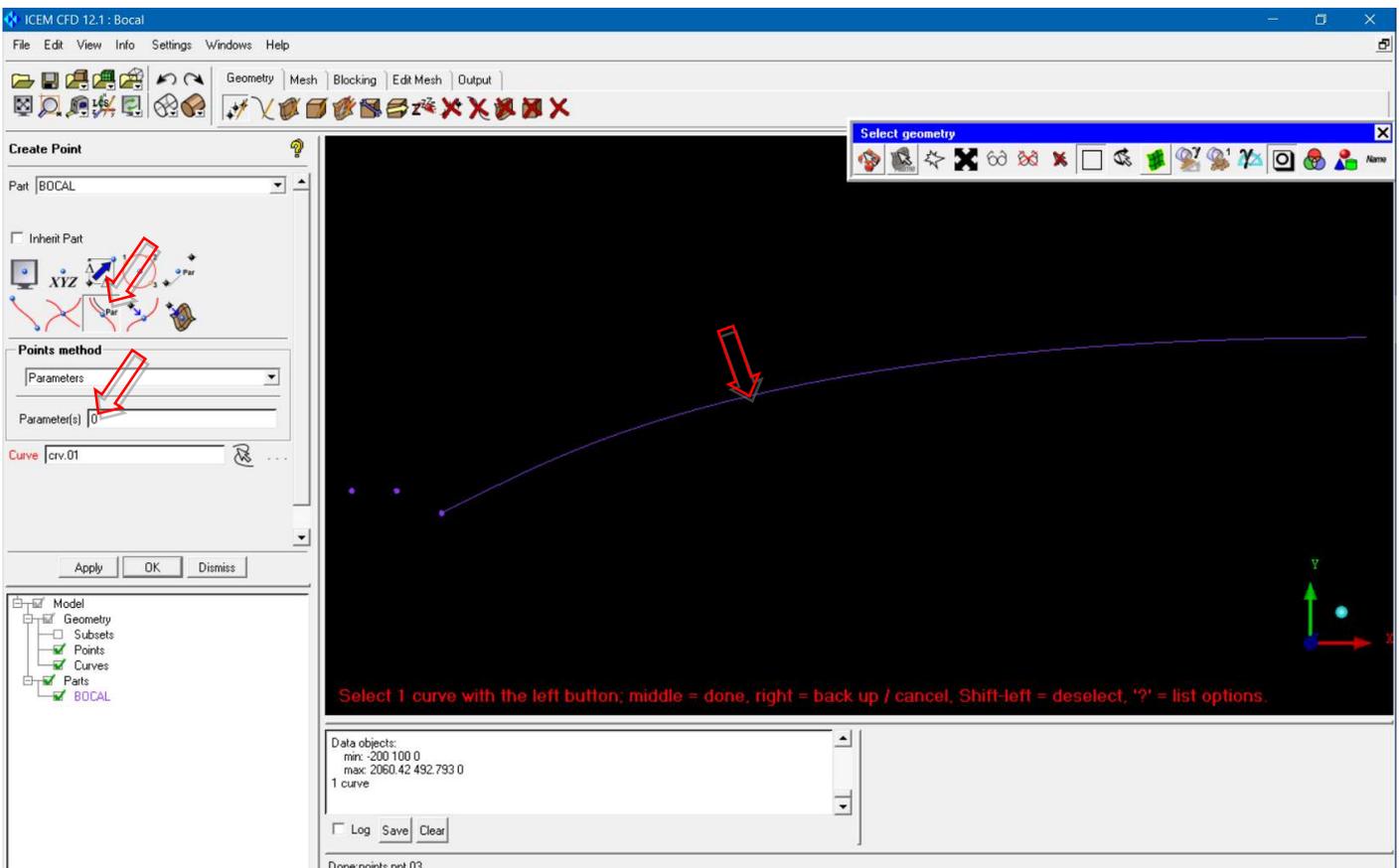
- Clique em "Create Point" > "Explicit Coordinates" > Use as coordenadas -200 para X e 150 para Y > Clique em "Apply". Repita para as coordenadas -100 para X e 150 para Y.



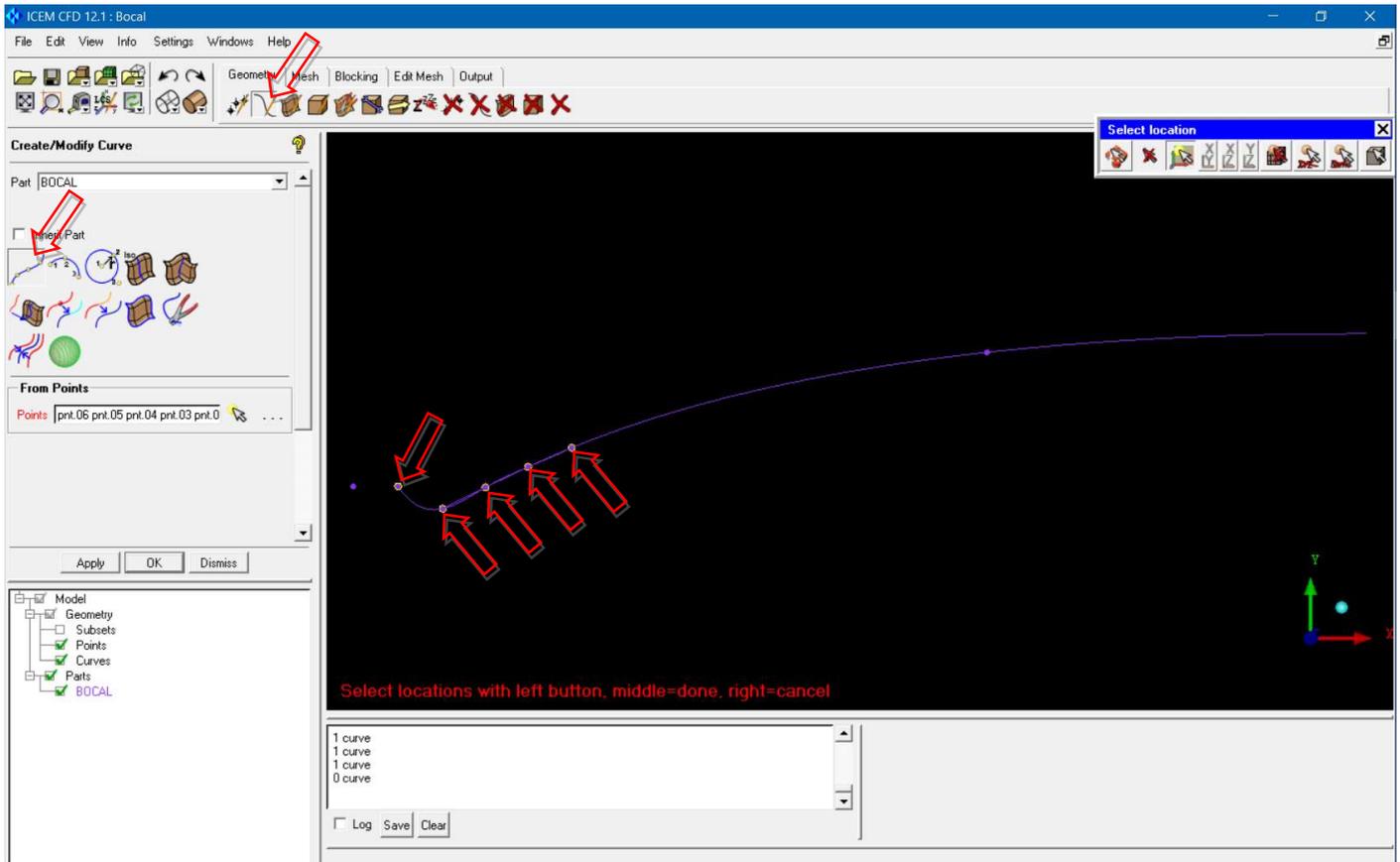
Os pontos criados não estarão visíveis. Para acionar a visibilidade expanda a árvore “Geometry” e clique na caixa “Points”. Use o “Fit Window” para que os pontos entrem na imagem.



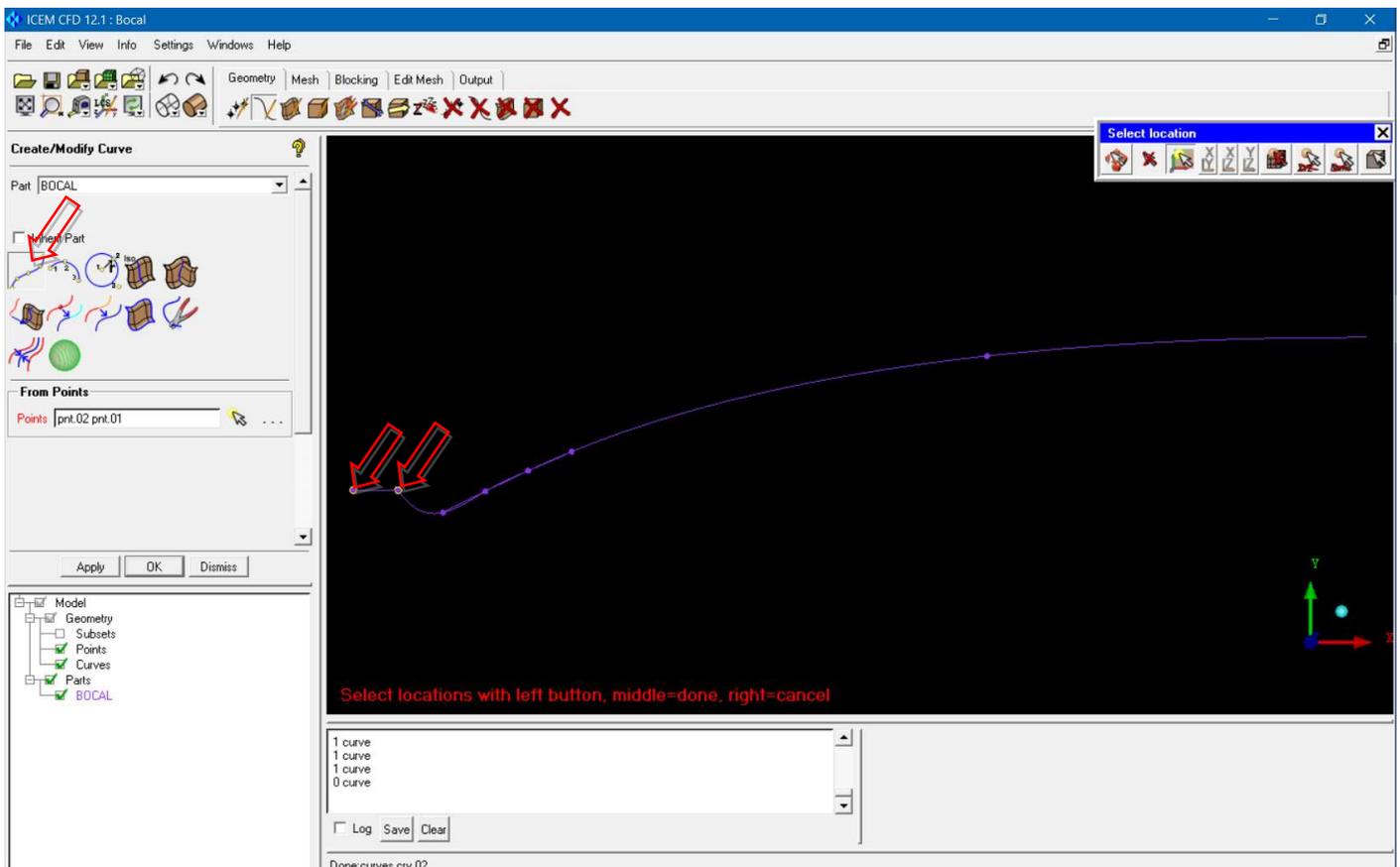
Use o comando “Parameter along a Curve” para criar pontos na curva do bocal. Escolha o valor 0 e clique na curva para criar um ponto bem no início. Repita para 0.05, 0.1, 0.15 e 0.6.



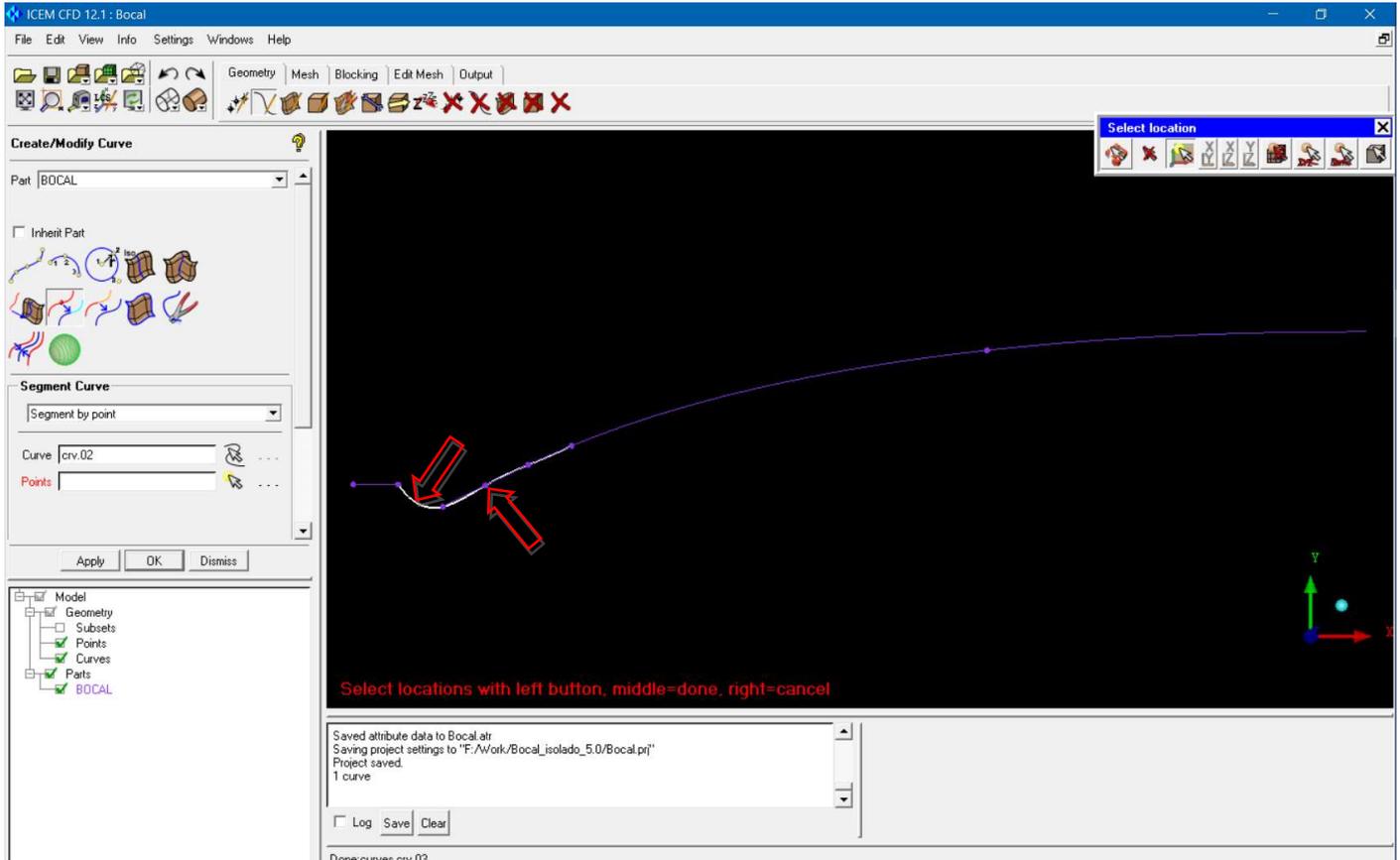
Clique em “Create/Modify Curve” > “From Points” e selecione os pontos indicados, da direita para a esquerda. Confirme com o botão do meio do mouse para criar a curva. Isso cria a geometria da garganta.



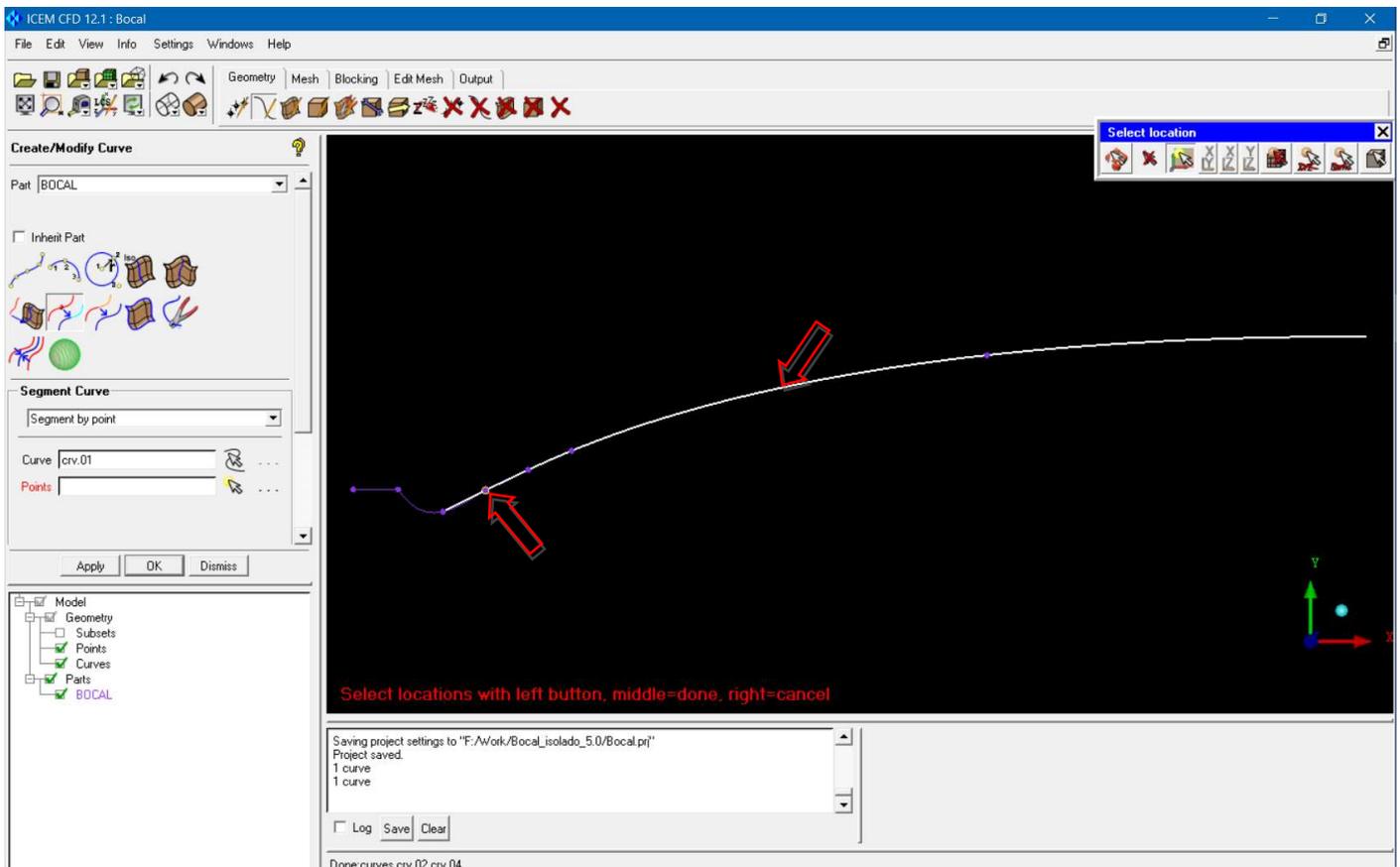
Crie mais uma reta com os dois pontos indicados para criar definir a região da câmara de combustão. Nunca esqueça de confirmar a seleção com o botão do meio do mouse.



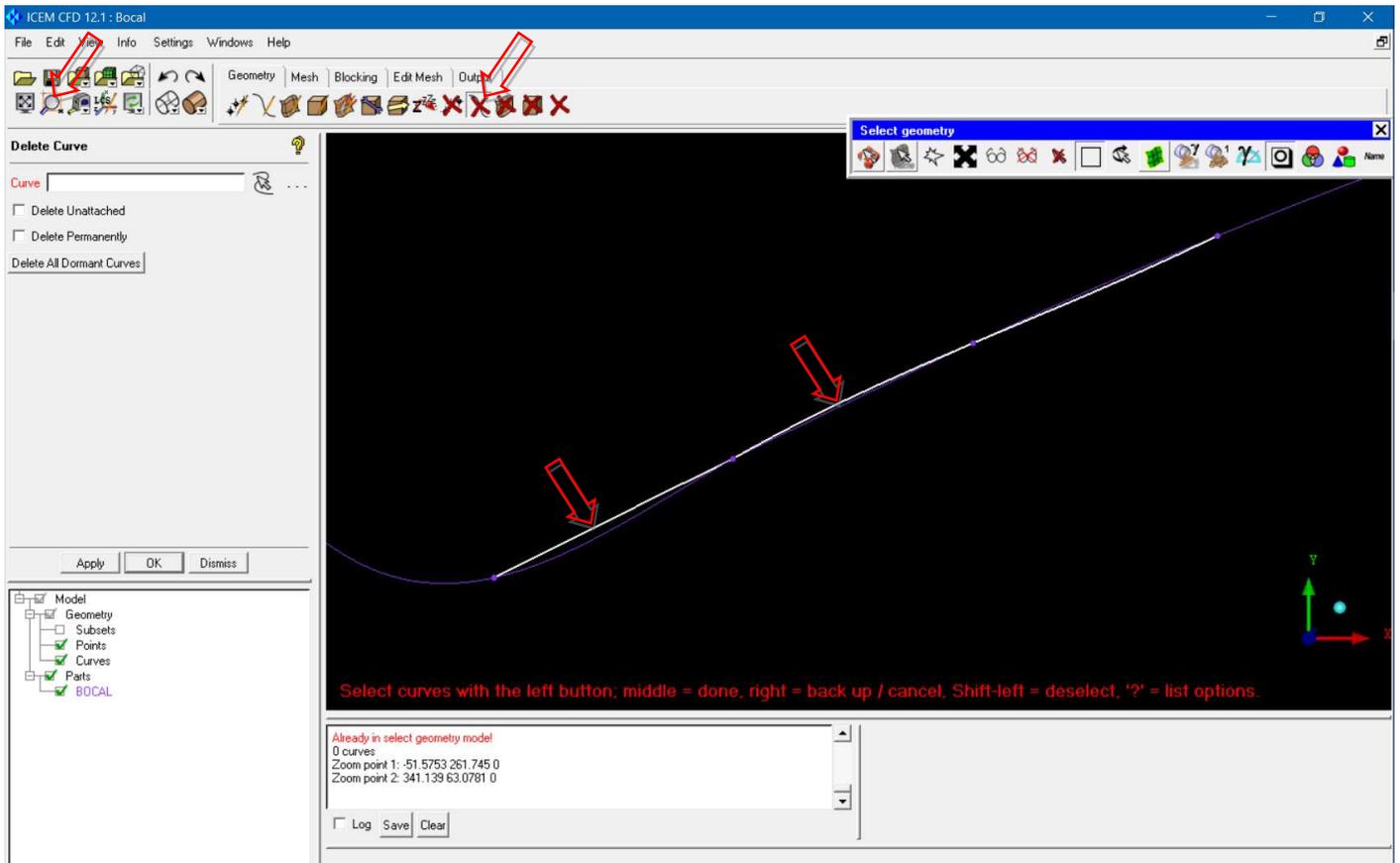
É preciso cortar as curvas para que reste apenas uma curva contínua. Para isso selecione “Segment Curve”, clique na curva da garganta e clique no ponto indicado. Confirme com o botão do meio.



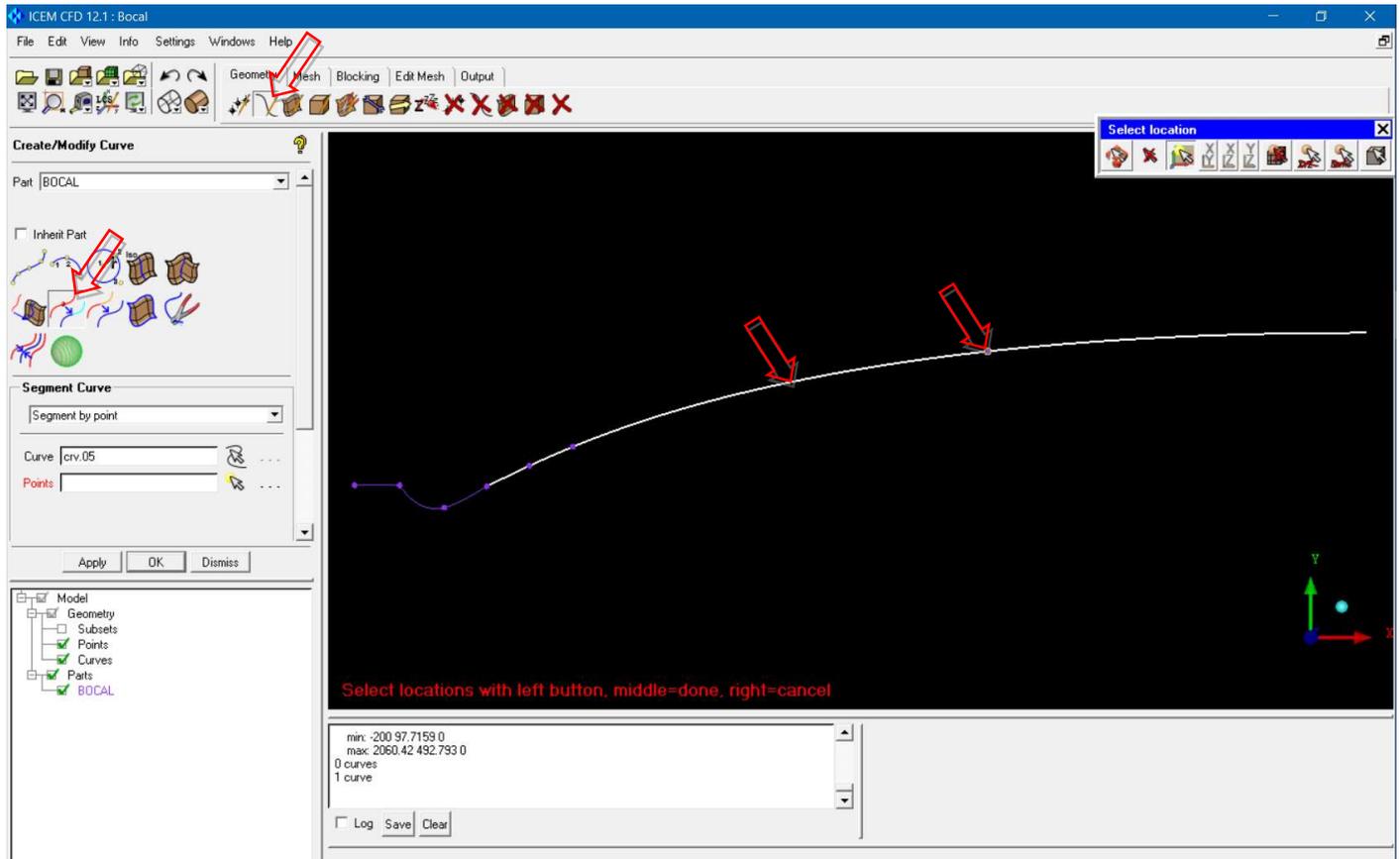
Faça o mesmo para a curva do bocal. O ponto deve ser o mesmo do passo anterior.



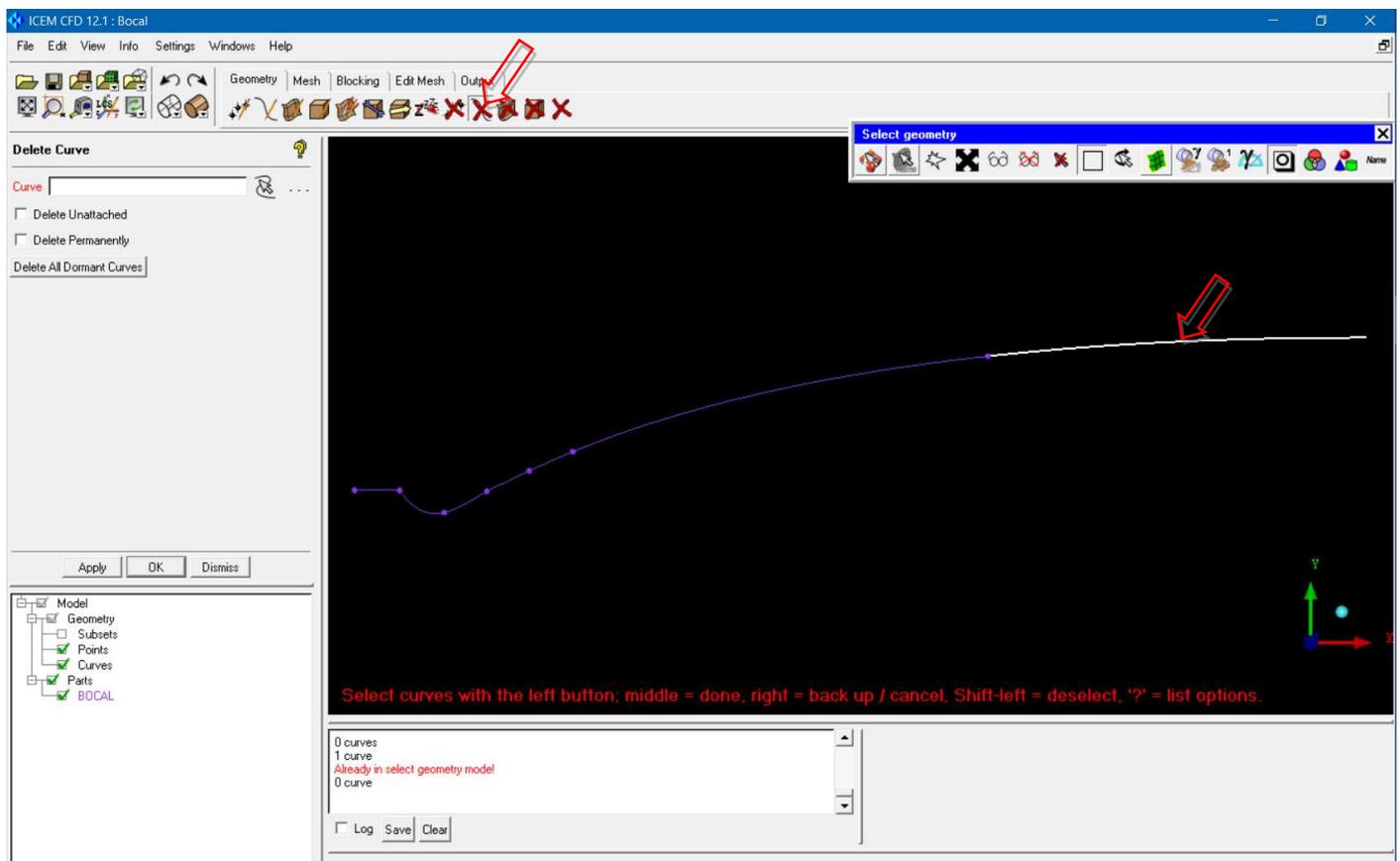
É necessário apagar os pedaços de curva que não serão mais utilizados. Para facilitar a seleção podemos usar a ferramenta “Box Zoom”. Clique em “Delete Curve” e selecione os dois trechos de curva indicados. Confirme com o botão do meio.



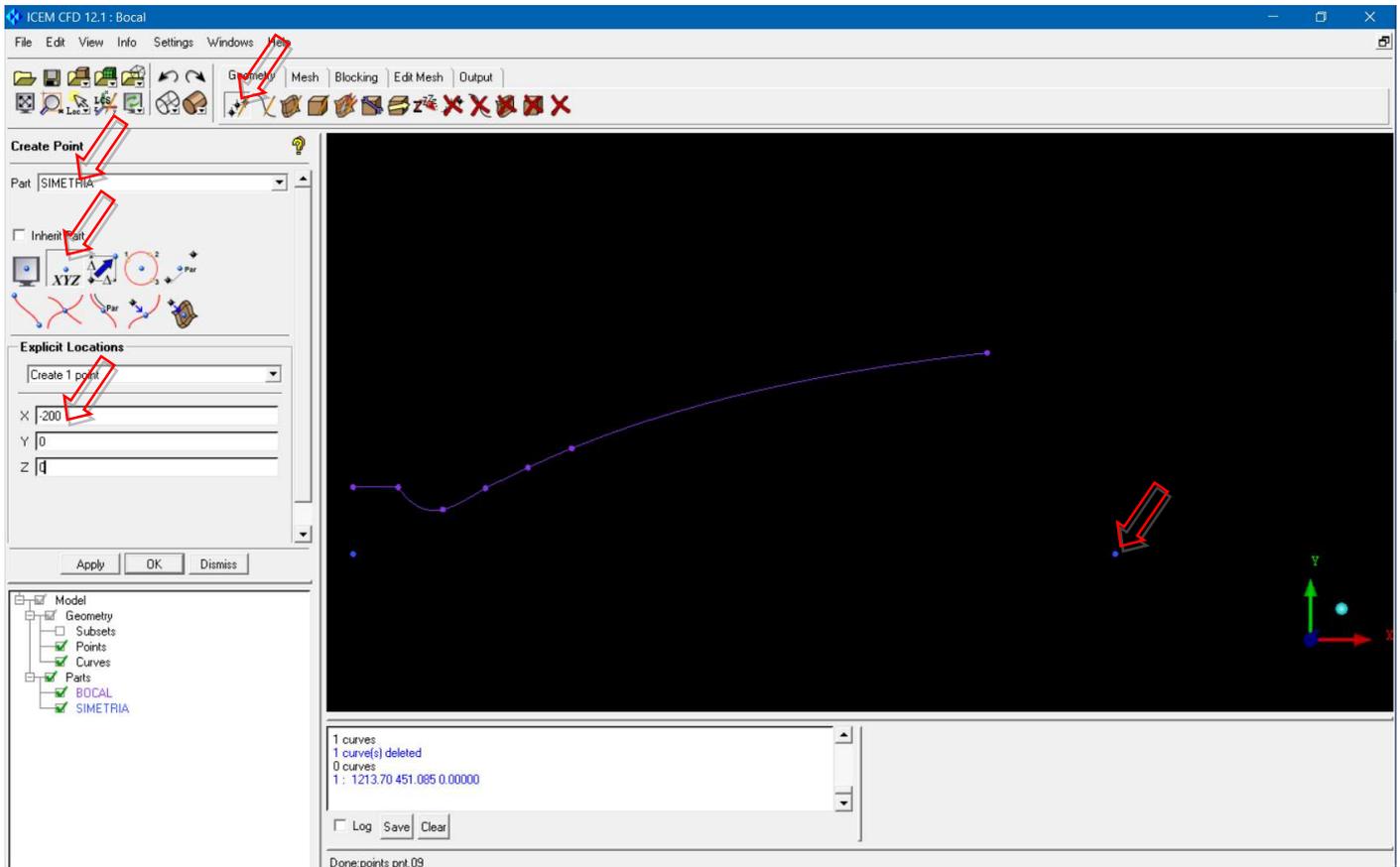
O comprimento do bocal será reduzido porque o método das características produz bocais muito longos. Primeiro cortamos a curva do bocal usando o ponto criado em 60% do comprimento.



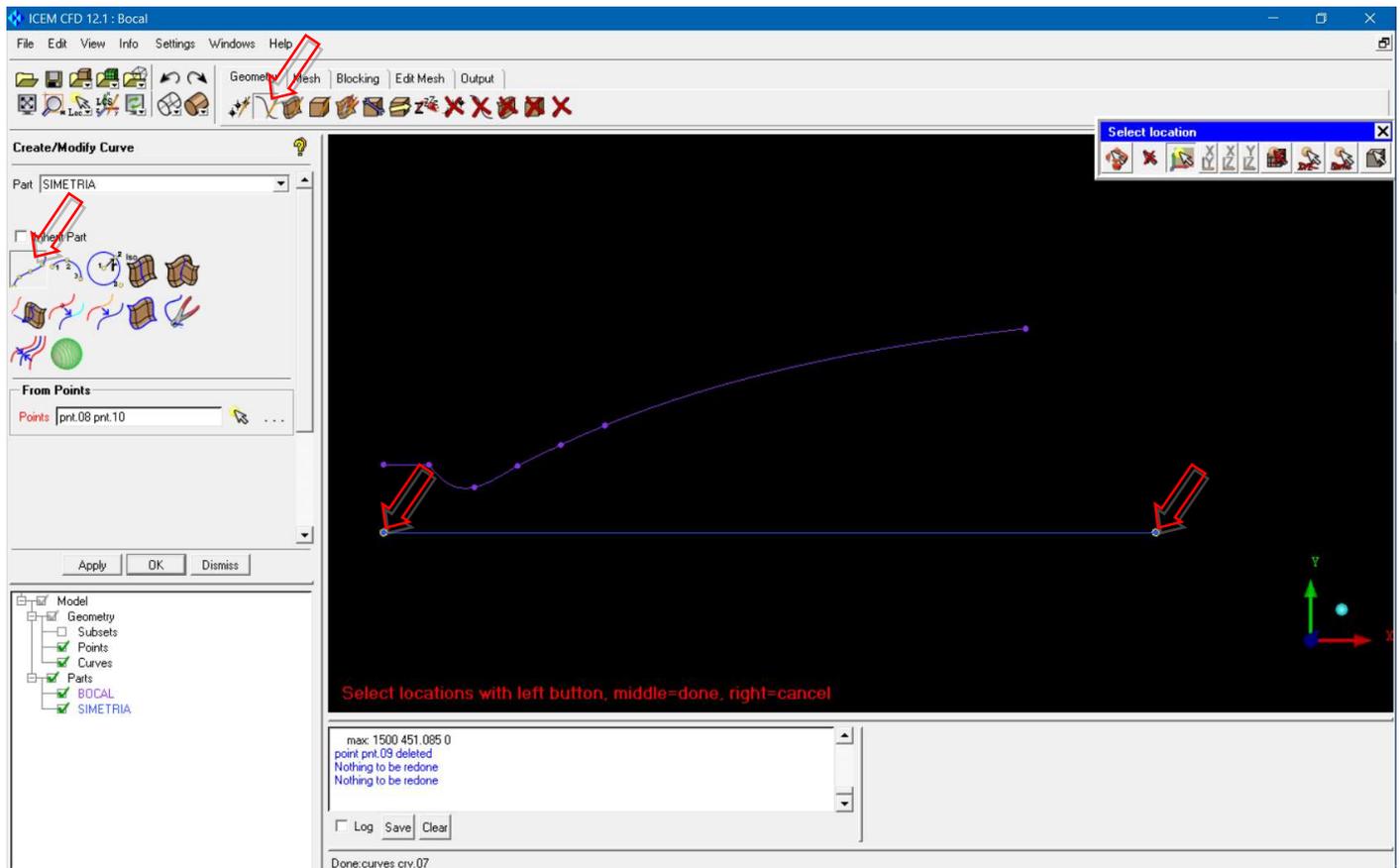
Depois apagamos o segmento em excesso.



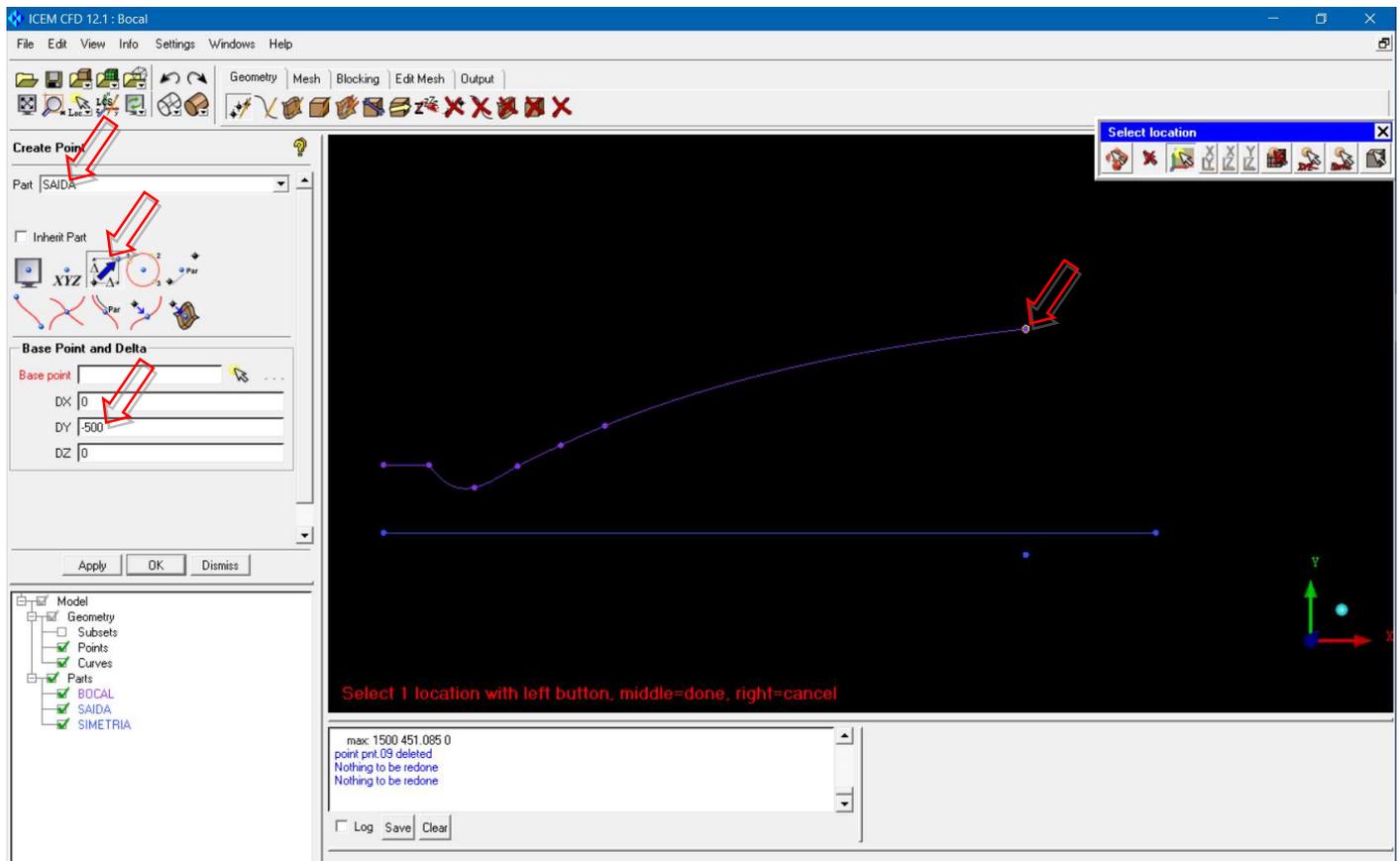
Para completar a geometria é criado um ponto no início da linha de simetria em -200 para X e 0 para Y. É muito importante usar o nome "SIMETRIA" para a "Part" para que seja possível aplicar as condições de contorno da simulação. Também deve ser criado um ponto com 0 para Y e com um valor suficientemente grande para X de maneira que ele esteja mais distante que o final do bocal (nesse caso usei 1500 para X).



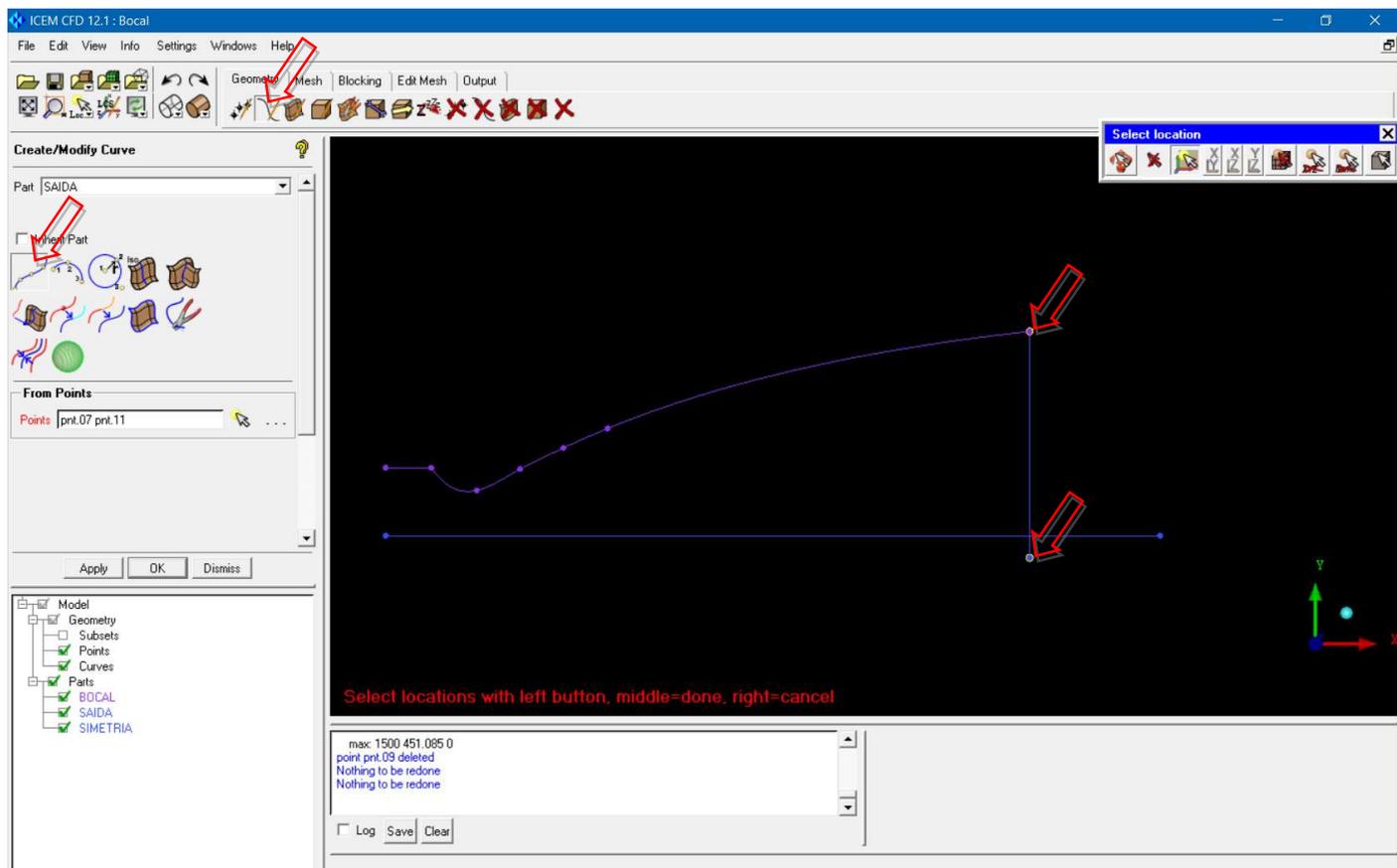
Agora traçamos a reta que representa a linha de simetria.



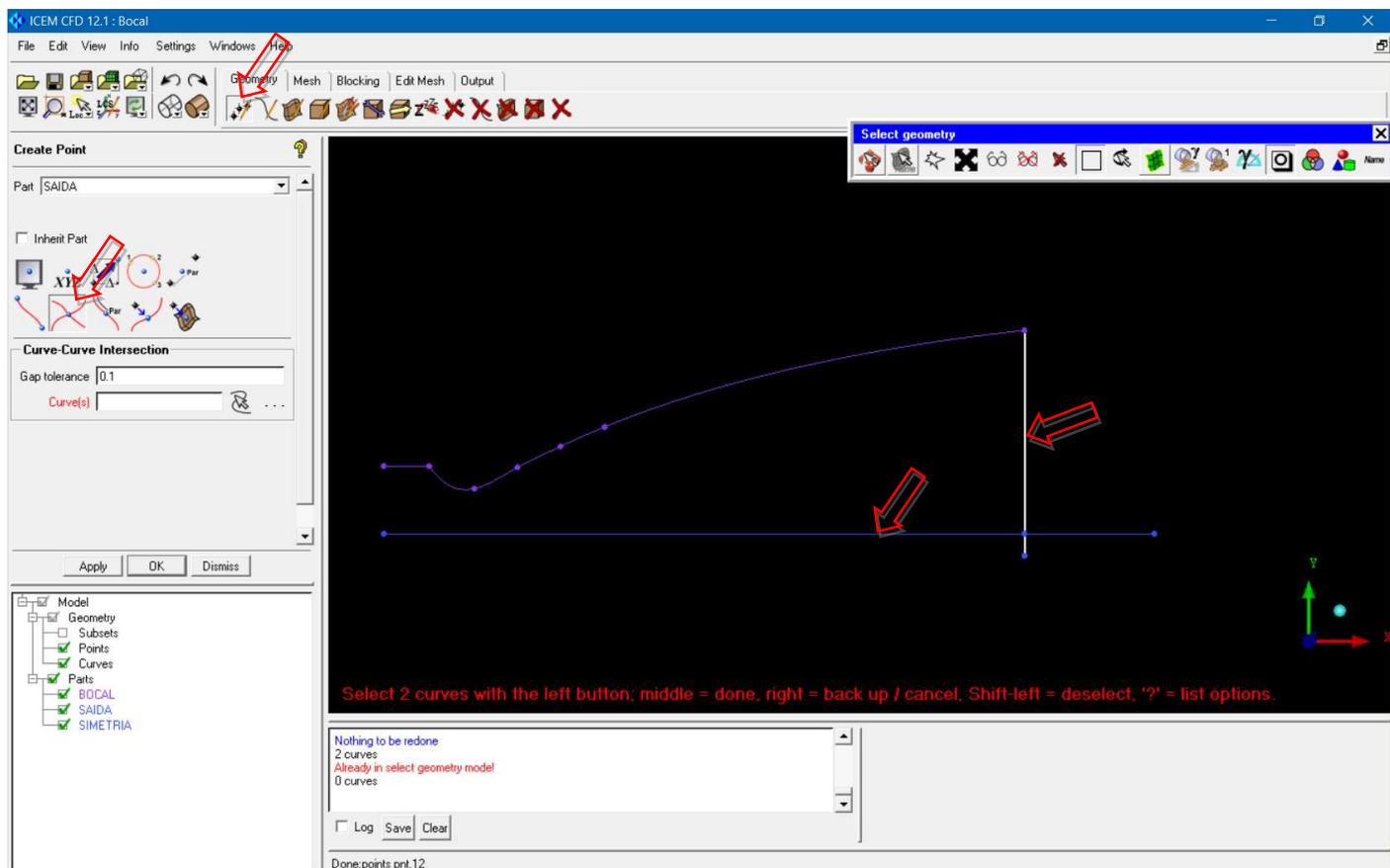
Para traçar a linha que vai representar a fronteira de saída do bocal, é criado um ponto abaixo do ponto no final do bocal. É importante que ele fique abaixo da linha de simetria e que se use o nome "SAIDA".



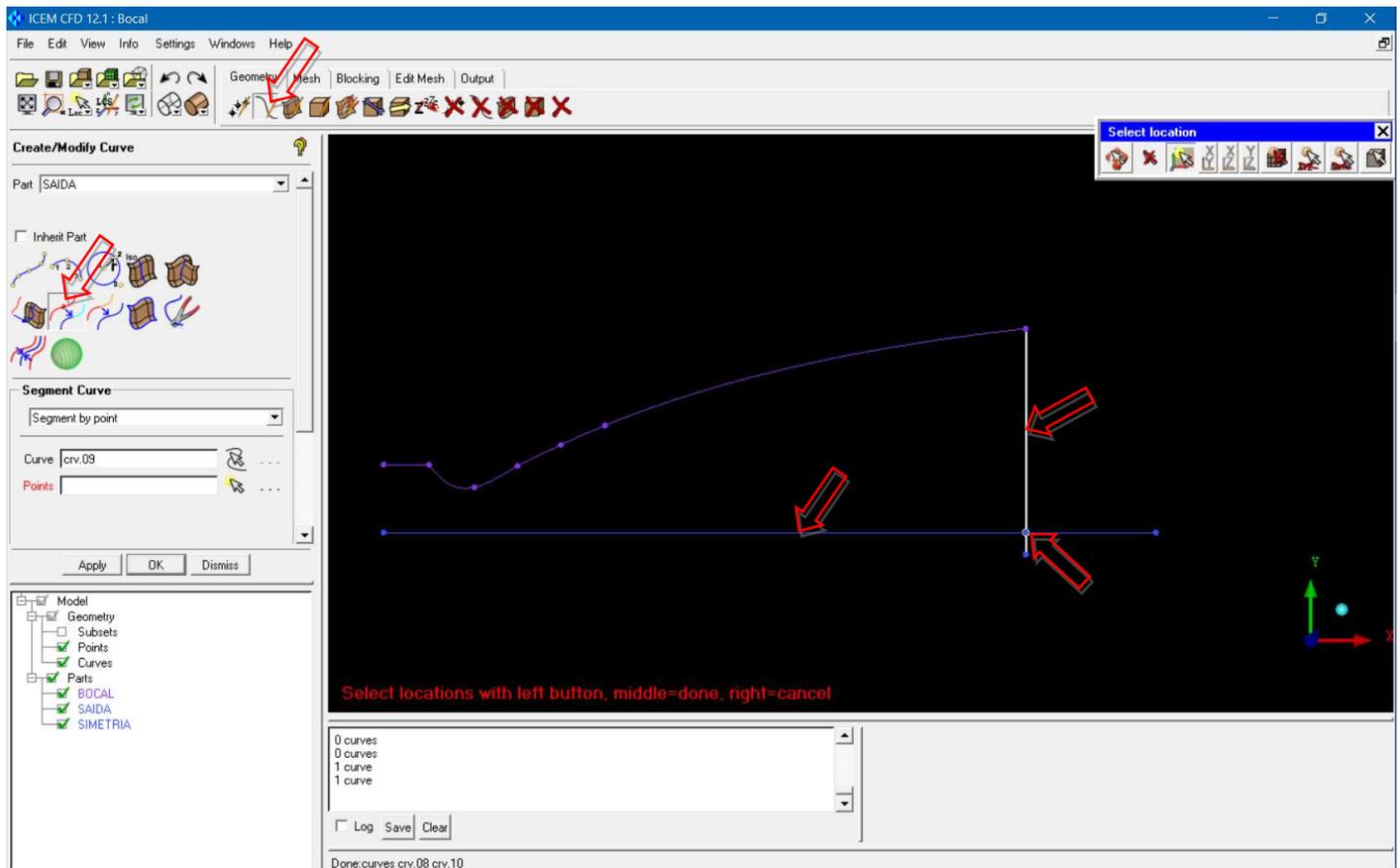
A linha da fronteira de saída é criada.



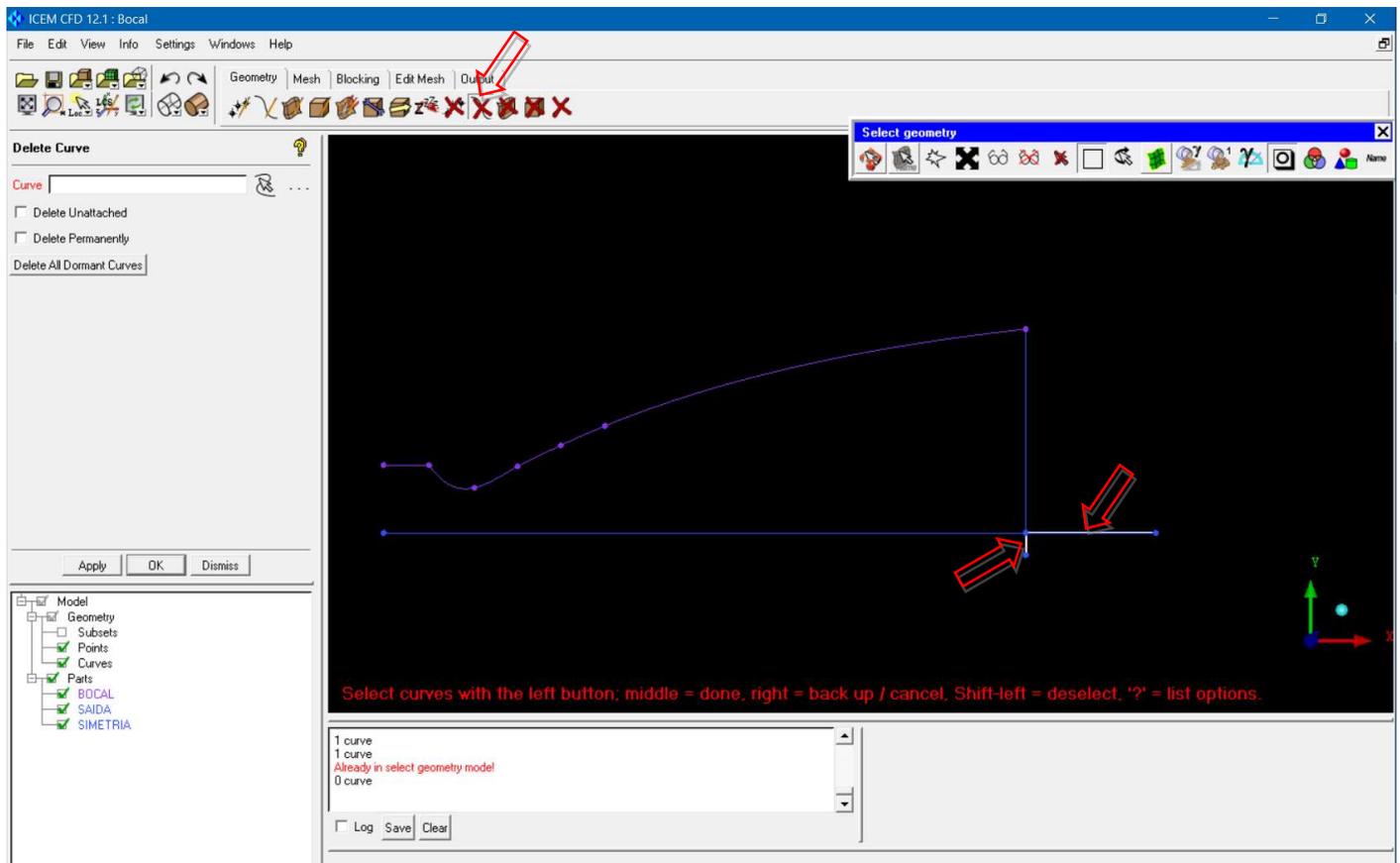
É preciso cortar as duas linhas para tirar os excessos. Primeiro criamos um ponto na intersecção das retas.



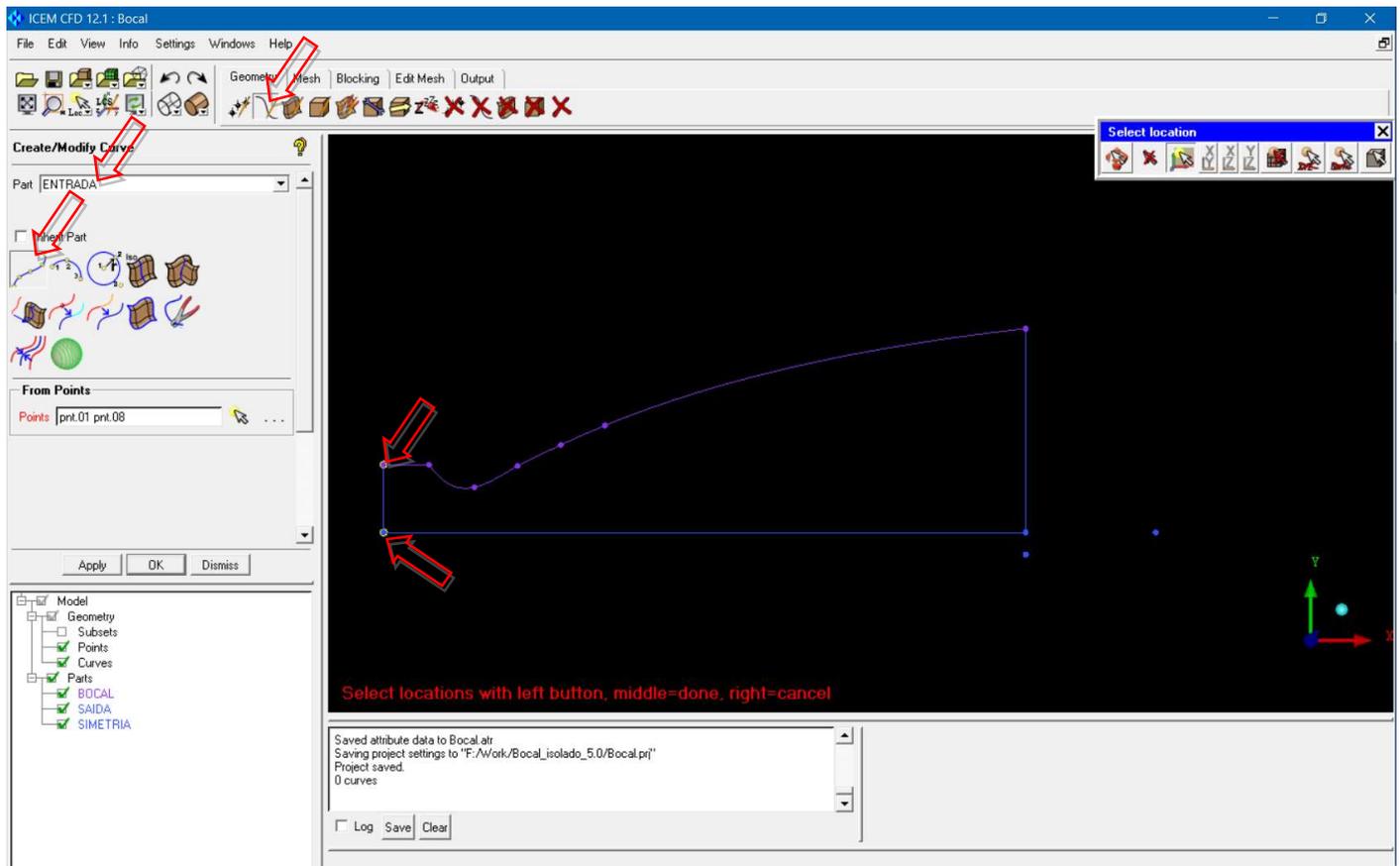
Depois seccionamos as duas retas usando o ponto criado.



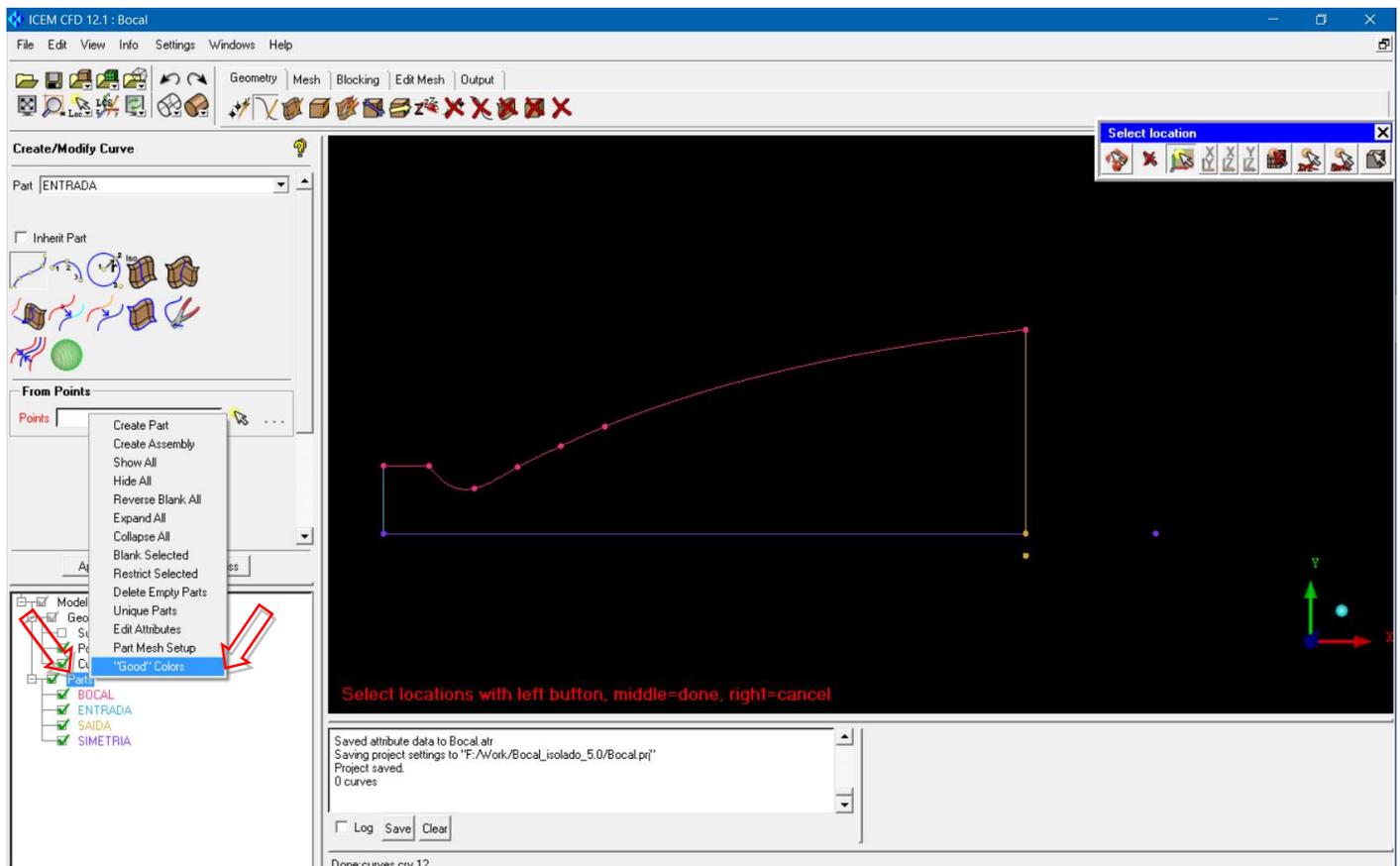
E apagamos os excessos.



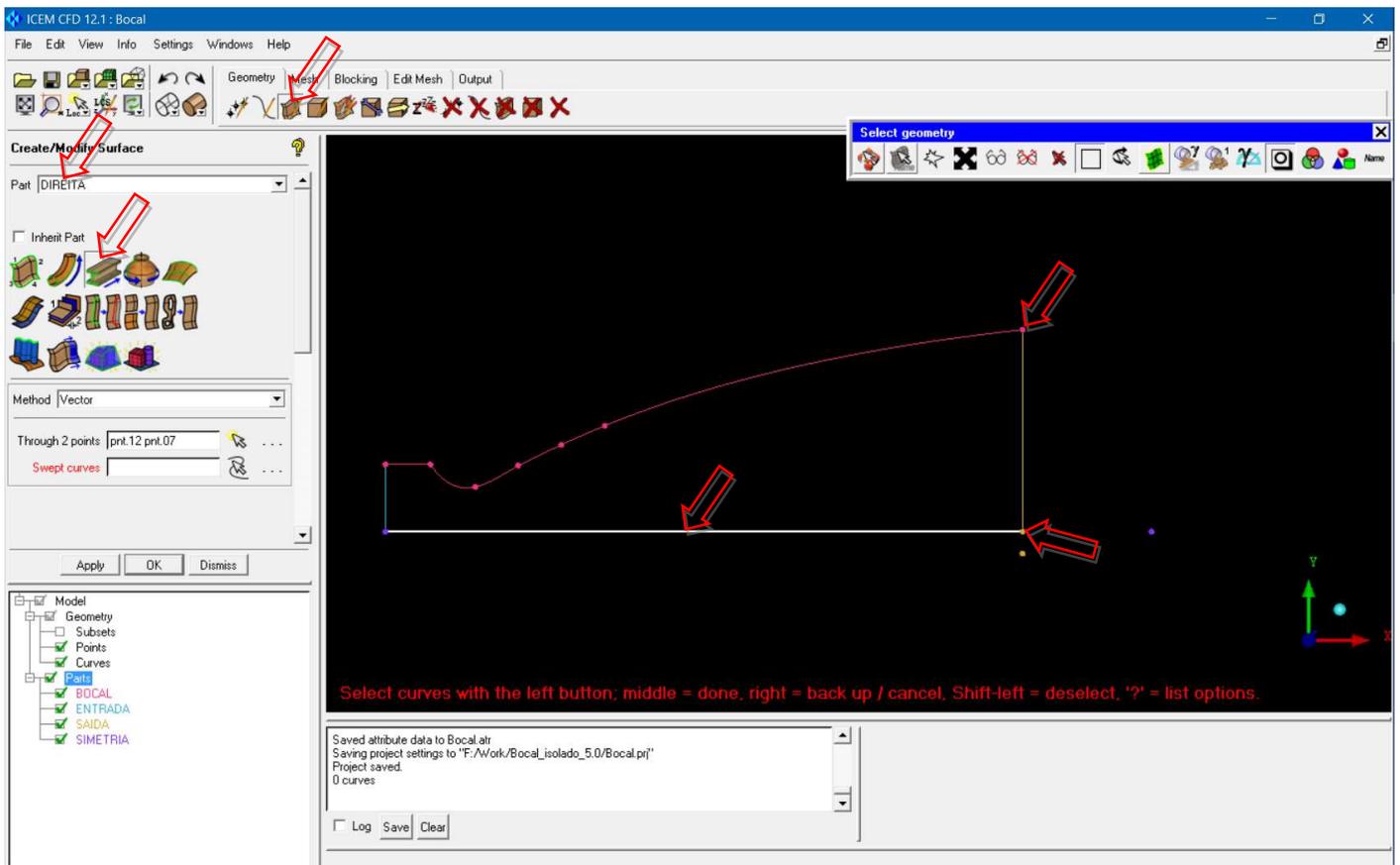
A reta que representa a fronteira de “ENTRADA” é criada.



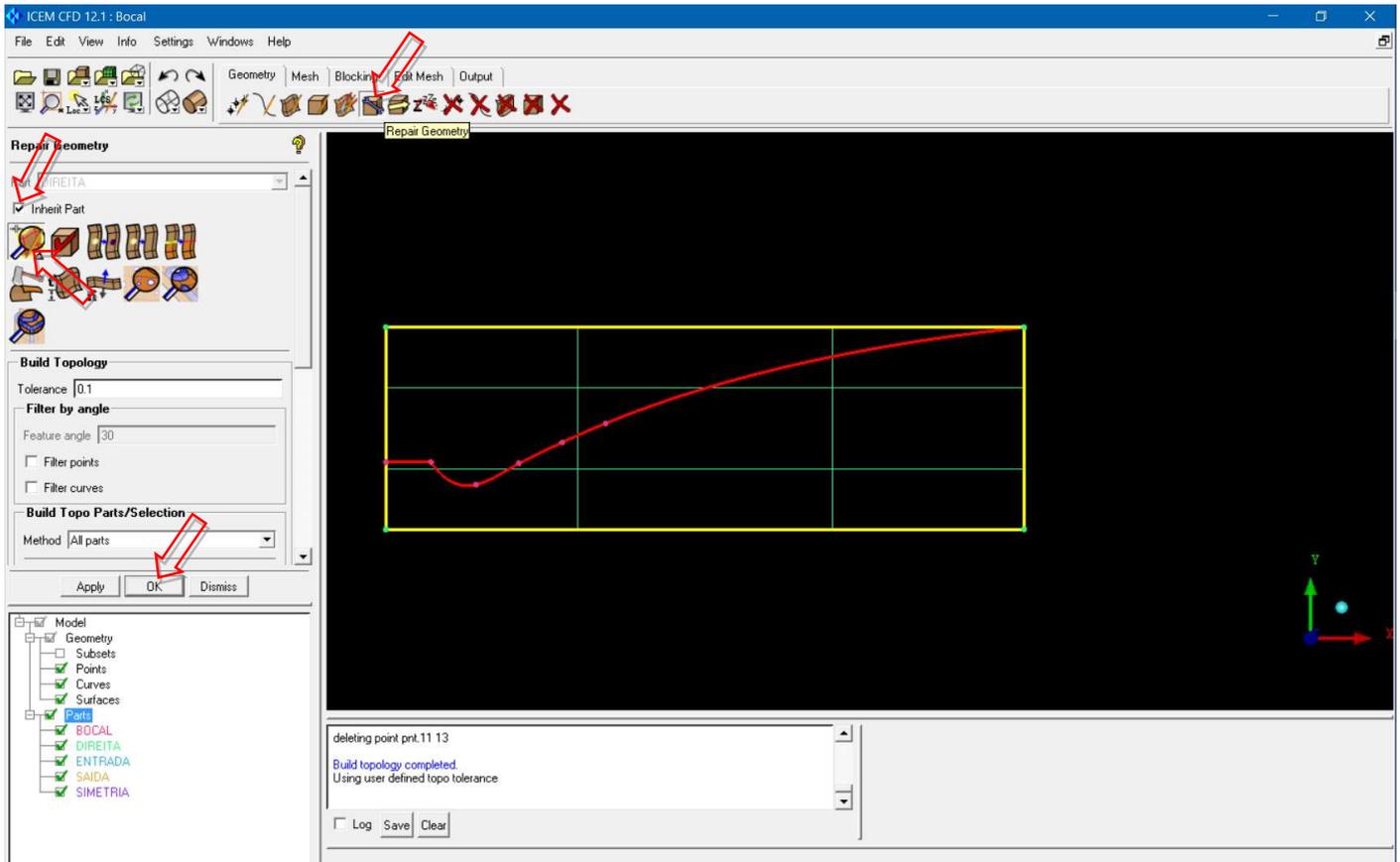
Um recurso que ajuda a identificar problemas com a definição das fronteiras é usar cores diferentes para cada uma delas. Para isso utiliza-se o recurso “Good Colors” que aparece quando clicamos em “Parts” com o botão direito do mouse.



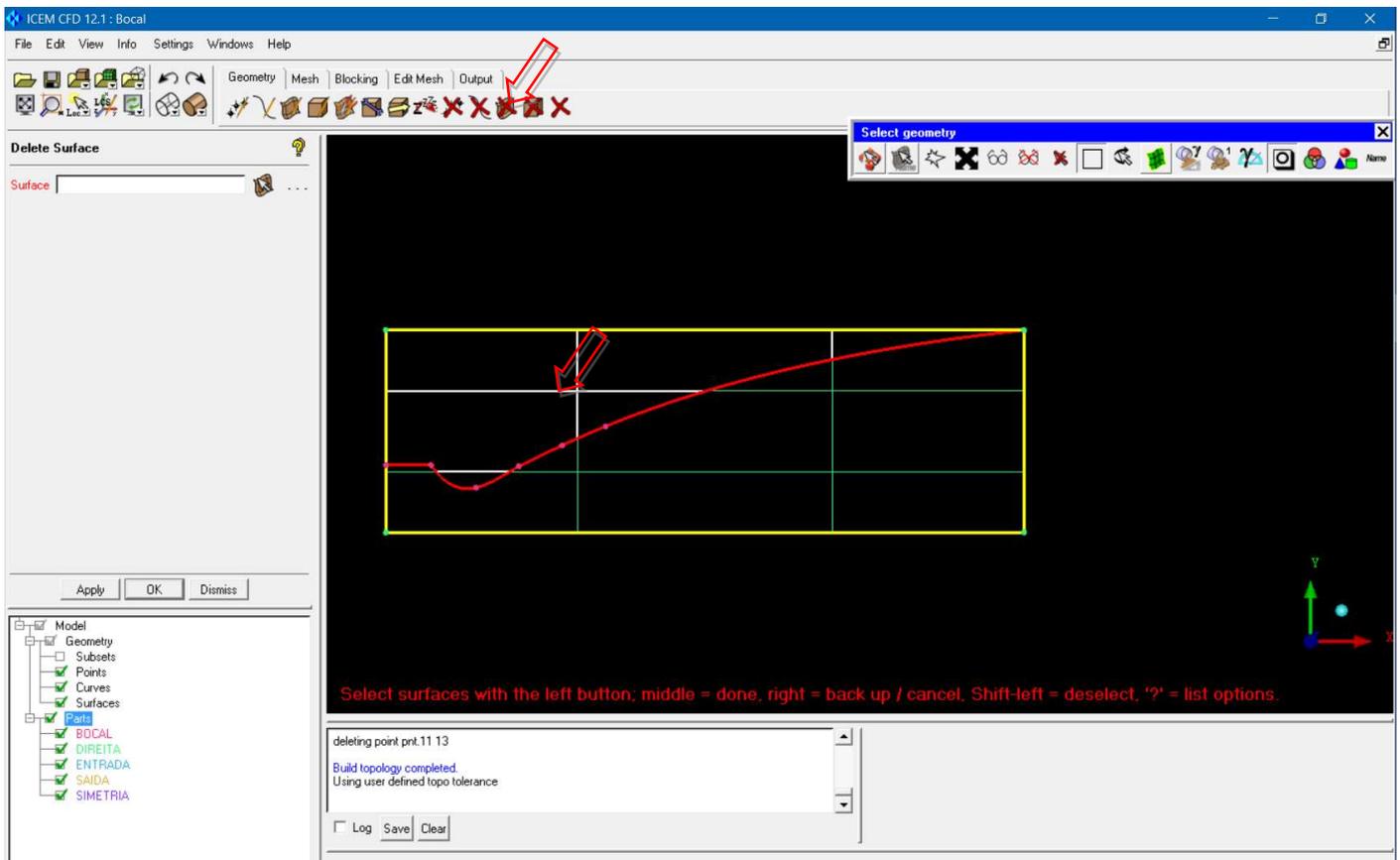
Uma superfície precisa ser criada para criar uma malha computacional 2D. Clique em “Create/Modify Surface” > “Sweep Surface” > Dê o nome de “DIREITA” para a “Part” > Selecione os dois pontos da saída de baixo para cima > Selecione a reta de simetria > Confirme com o botão do meio.



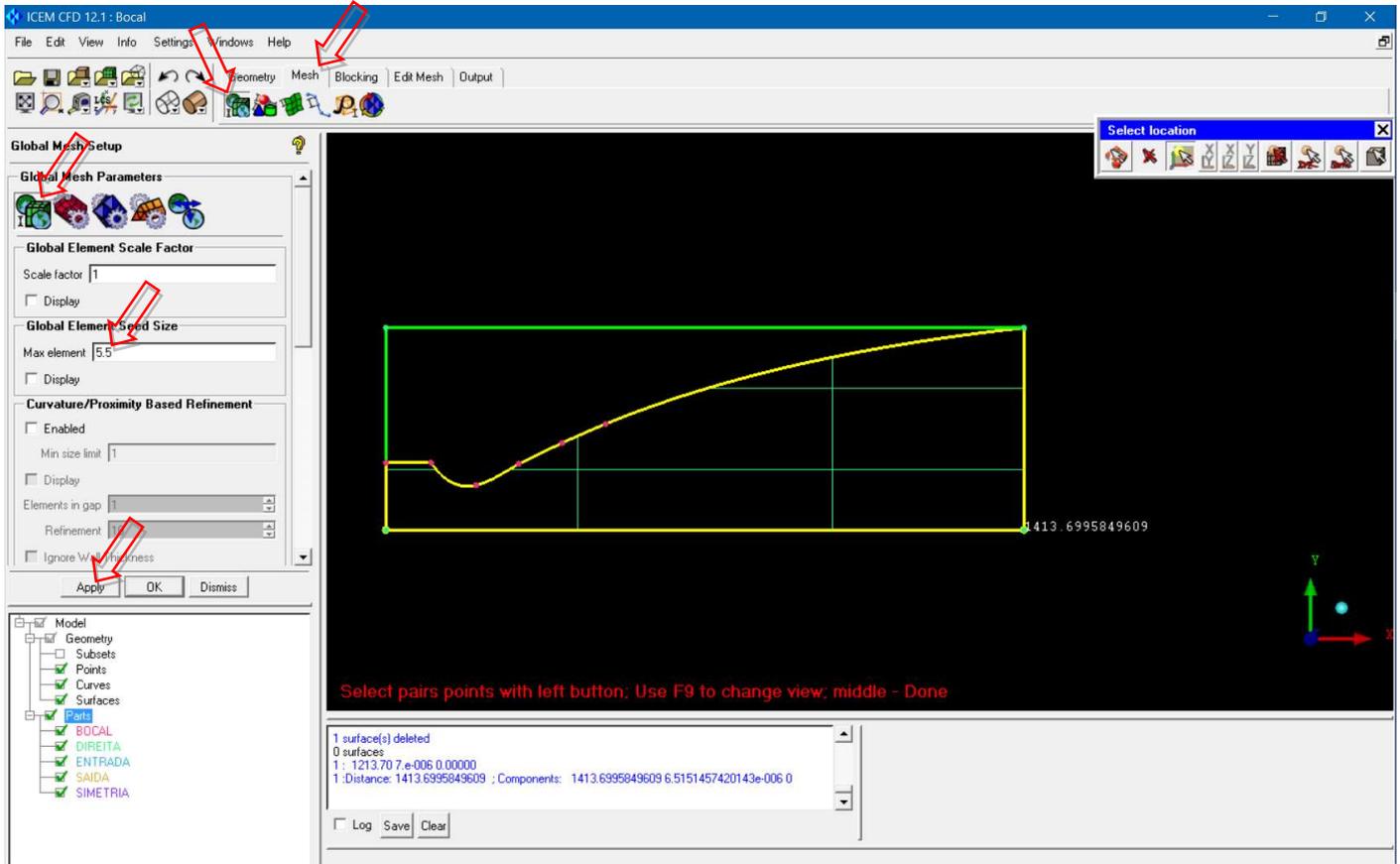
Clique em “Repair Geometry” > “Build Diagnostic Topology” > Selecione a caixa “Inherit Part” > Mude a “Tolerance” para 0.1 > Clique “OK”.



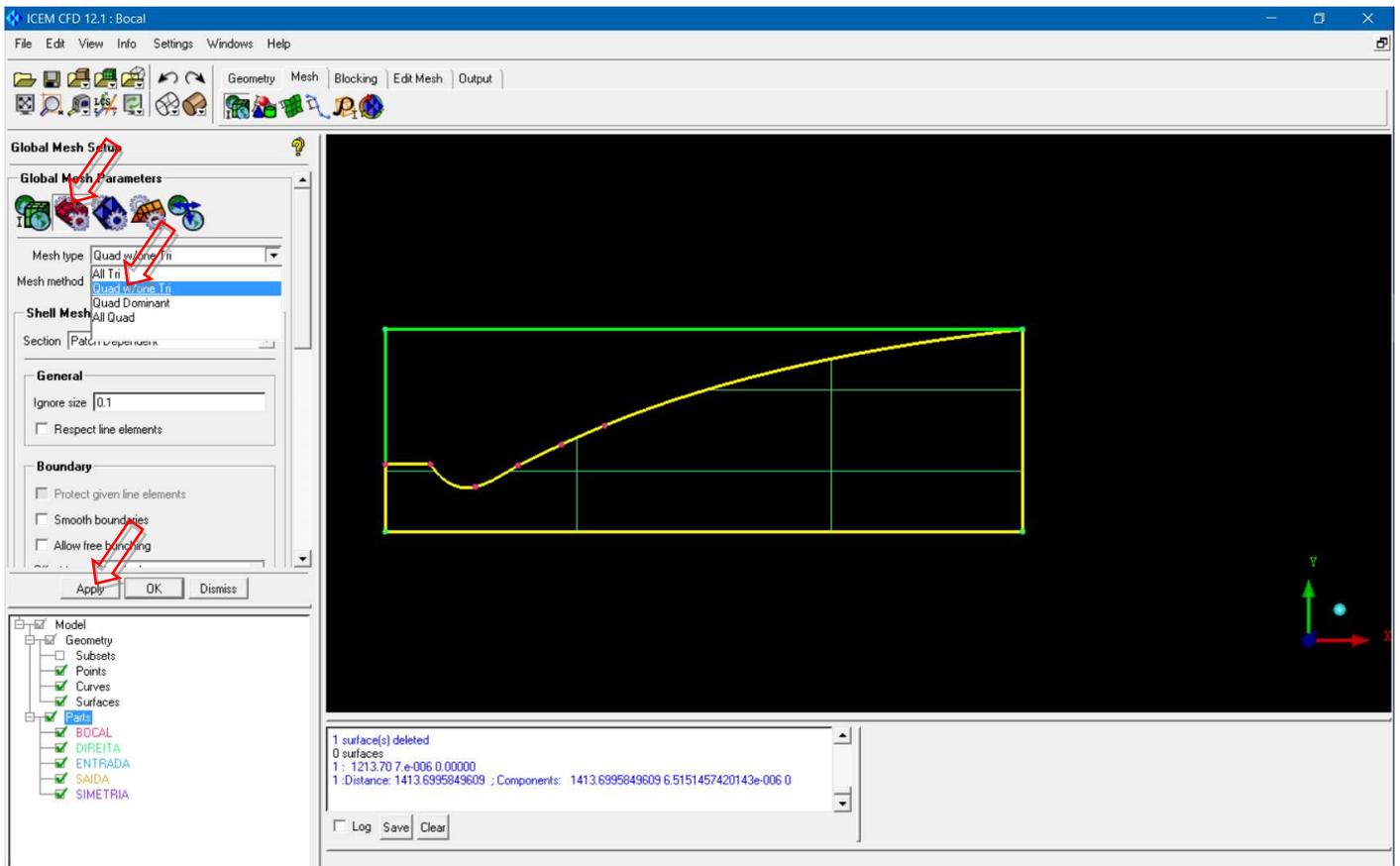
Apague a parte da superfície que fica fora do bocal.



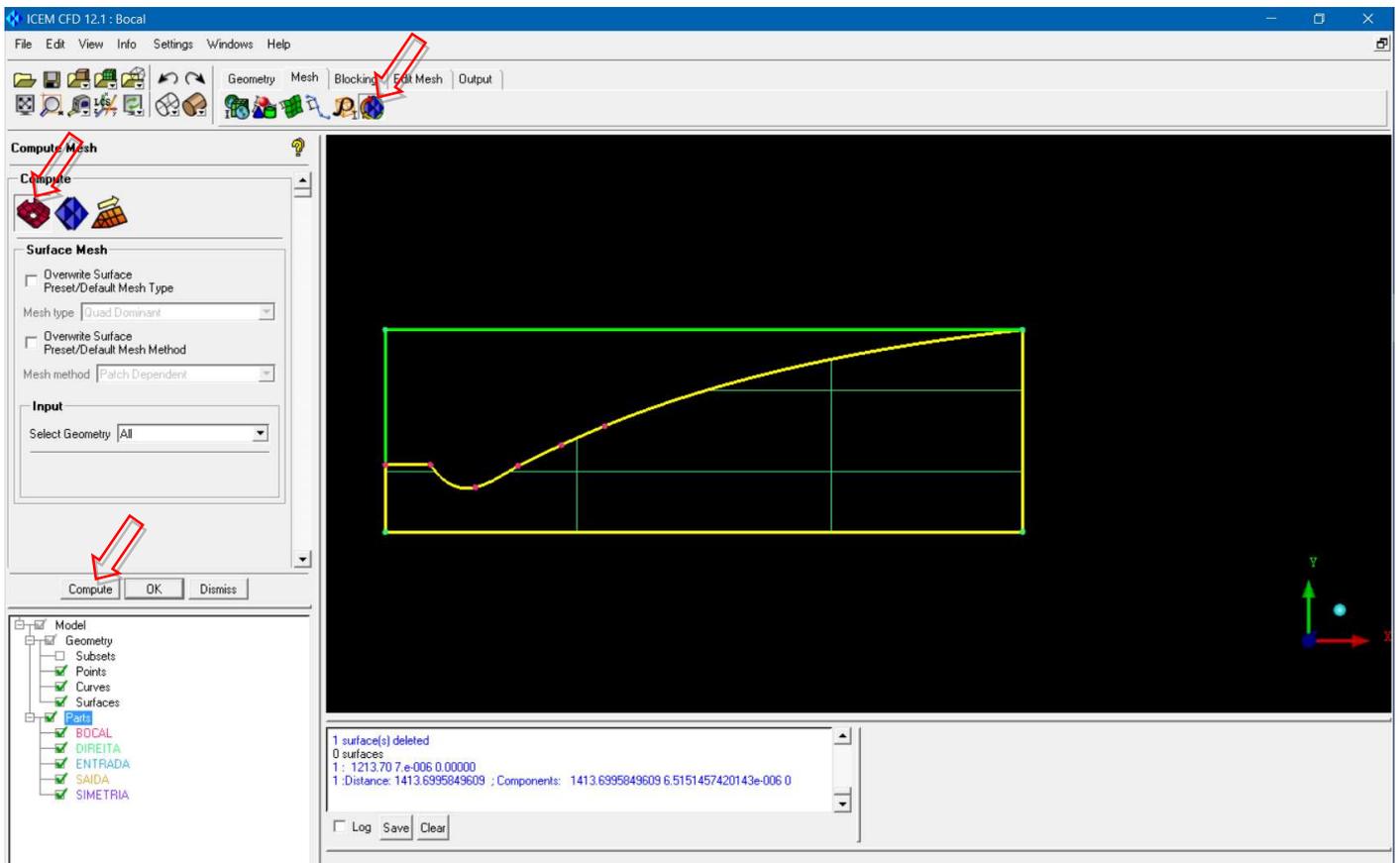
Para iniciar a geração da malha clique em “Mesh” > “Global Mesh Setup” > Meça o comprimento da linha de simetria usando a ferramenta “Measure Distance” e selecionando os dois pontos da linha > Divida esse comprimento por 250 (nesse caso ficou em $1413/250=5.65$) > Coloque esse valor (ou um valor aproximado) na caixa “Max element” em “Global Element Seed Size” > “Apply”. Essa opção vai criar uma malha com refinamento razoável e que pode ser simulada com certa rapidez em um PC normal.



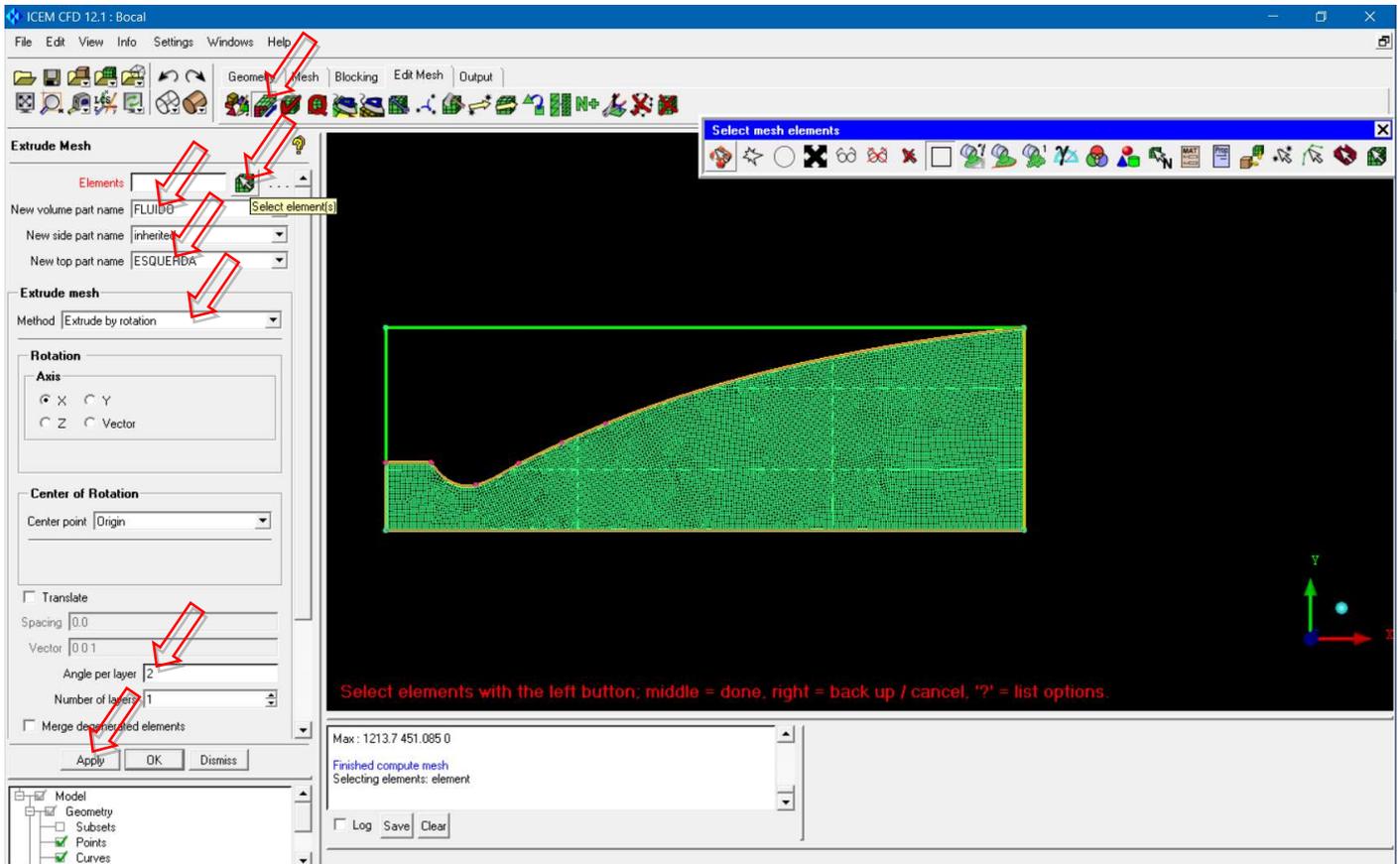
Clique em "Shell Meshing Parameters" > "Mesh type" > "Quad w/ one Tri" > "Apply".



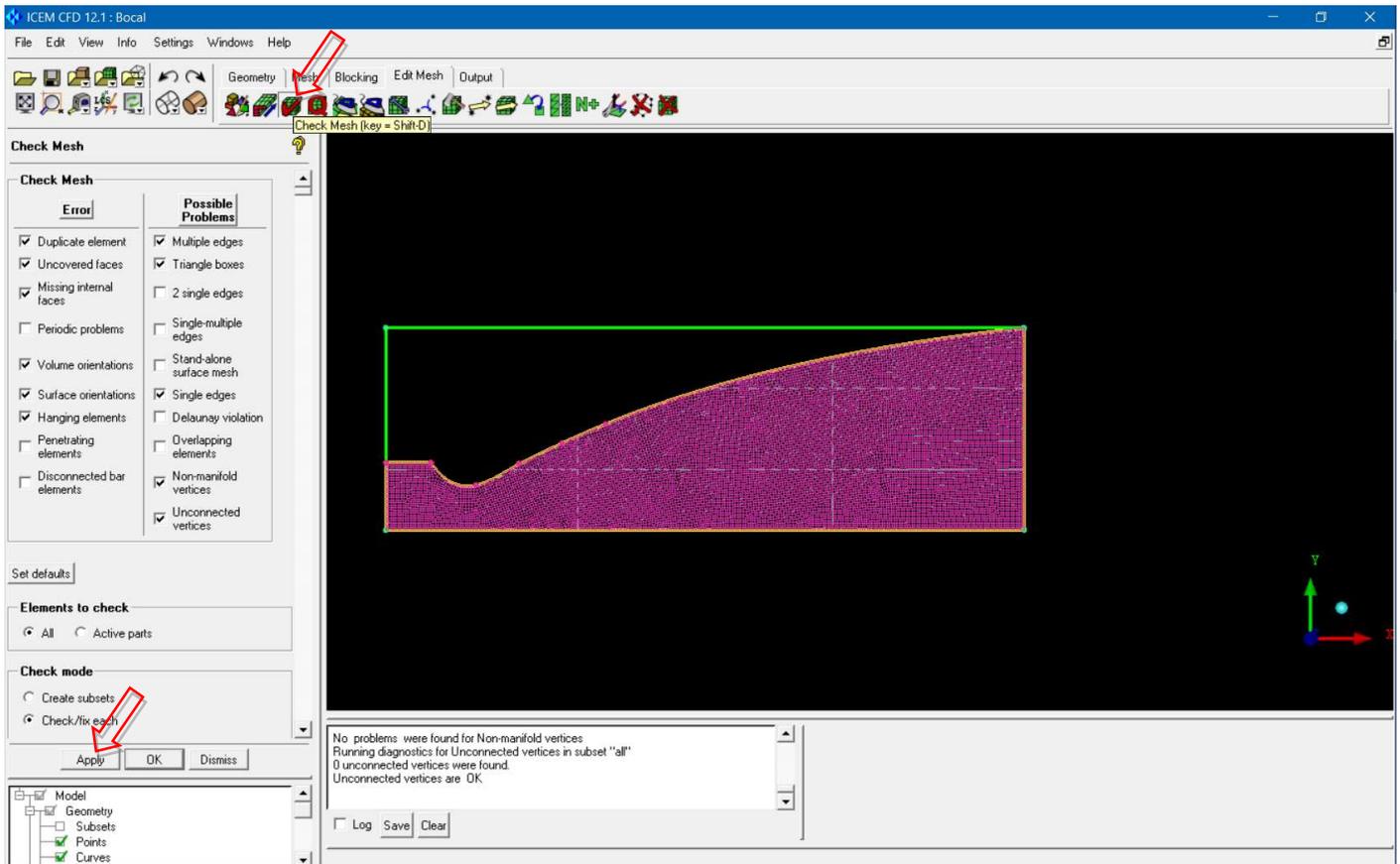
Clique em "Compute Mesh" > "Surface Mesh Only" > "Compute".



A partir dessa malha 2D é criada uma malha 3D axissimétrica com um pequeno ângulo de extrusão que pode ser bem pequeno (foi escolhido 2 graus). Clique em “Edit Mesh” > “Extrude Mesh” > Coloque os nomes “FLUIDO” e “ESQUERDA” nos espaços indicados > Selecione “Extrude by rotation” em “Extrude Mesh” > e o valor 2 em “Angle per layer” > Clique em “Select elements” e a letra “a” no teclado. Isso faz com que todos os elementos da malha sejam selecionados > Clique “Apply”. É criada uma única camada de extrusão que é suficiente para representar a geometria 3D axissimétrica.

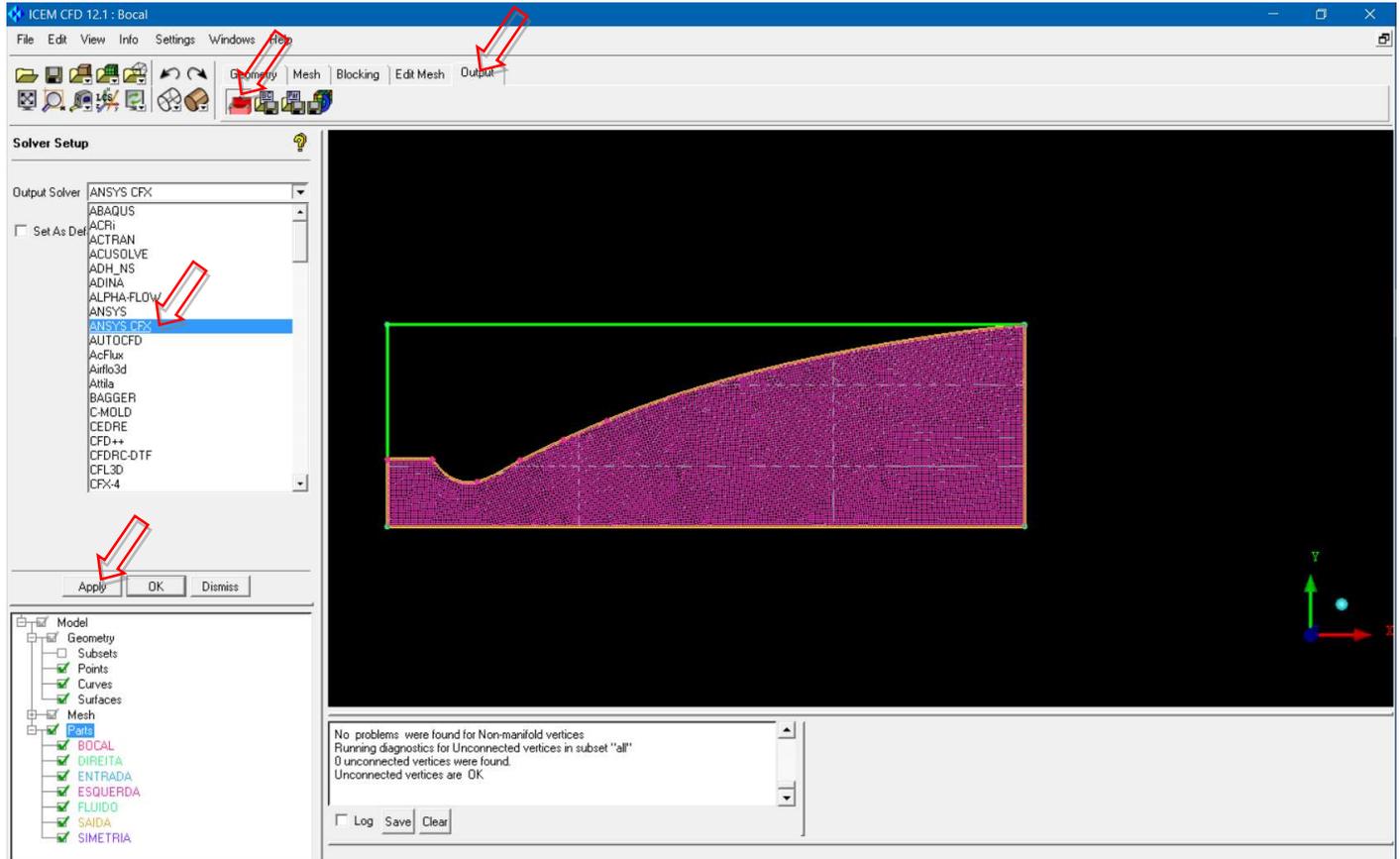


É sempre interessante fazer uma checagem da malha para saber se ocorreram erros. Clique em “Check Mesh” > “Apply”. Se não aparecer nenhuma mensagem de erro a malha tem boa chance de funcionar no software de CFD.

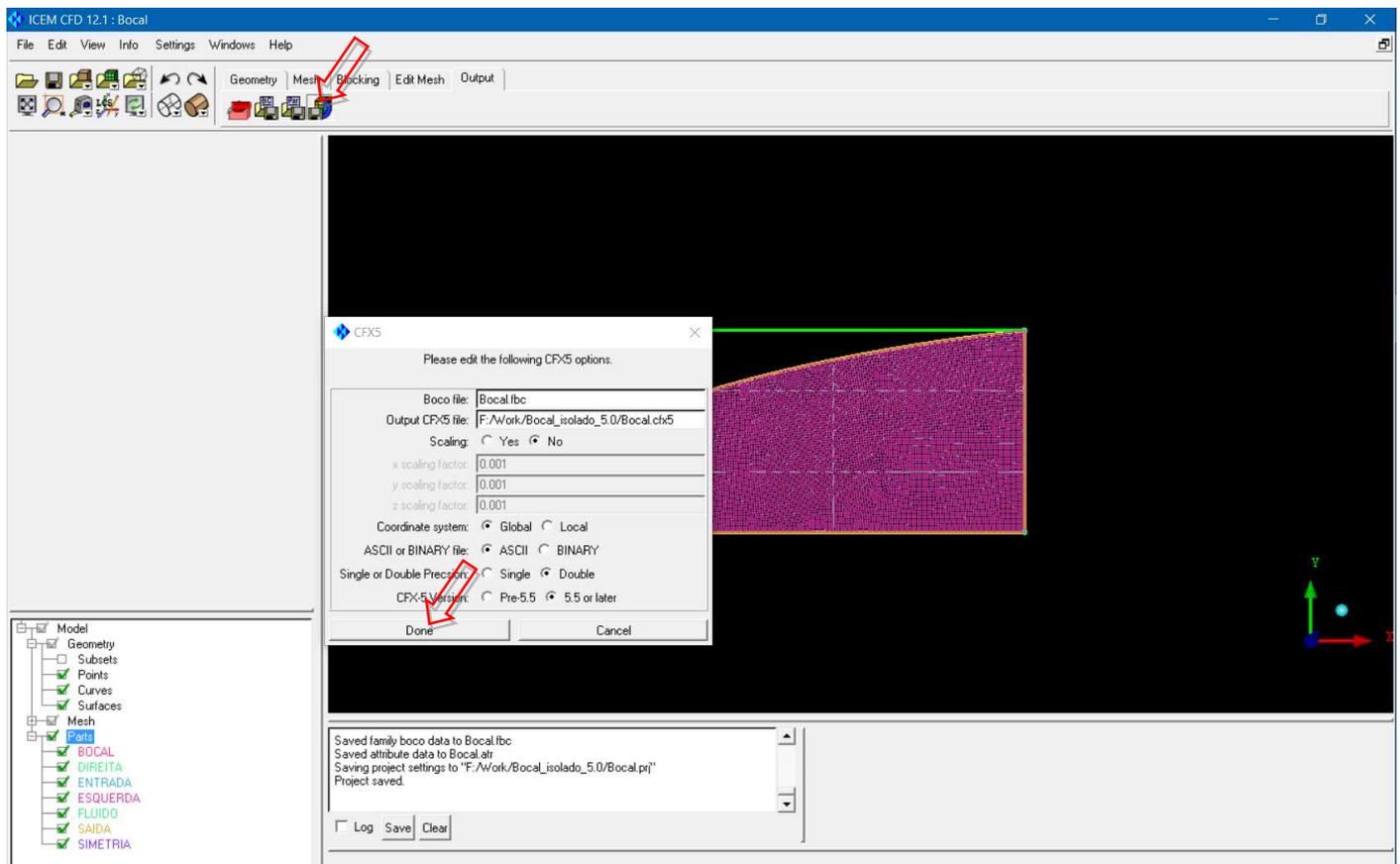


A malha agora pode ser exportada em formato aceito no software de CFD (vai ser usado o Ansys CFX).

Clique em “Output” > “Select solver” > “ANSYS CFX” > “Apply”



Clique em “Write input” > Escolha “Yes” para salvar o projeto > Clique em “Done”. Uma vez concluído, feche o software ICEM.

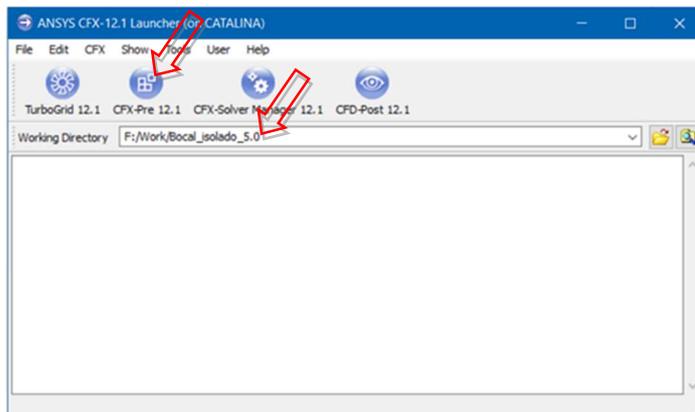


Introdução ao Ansys CFX

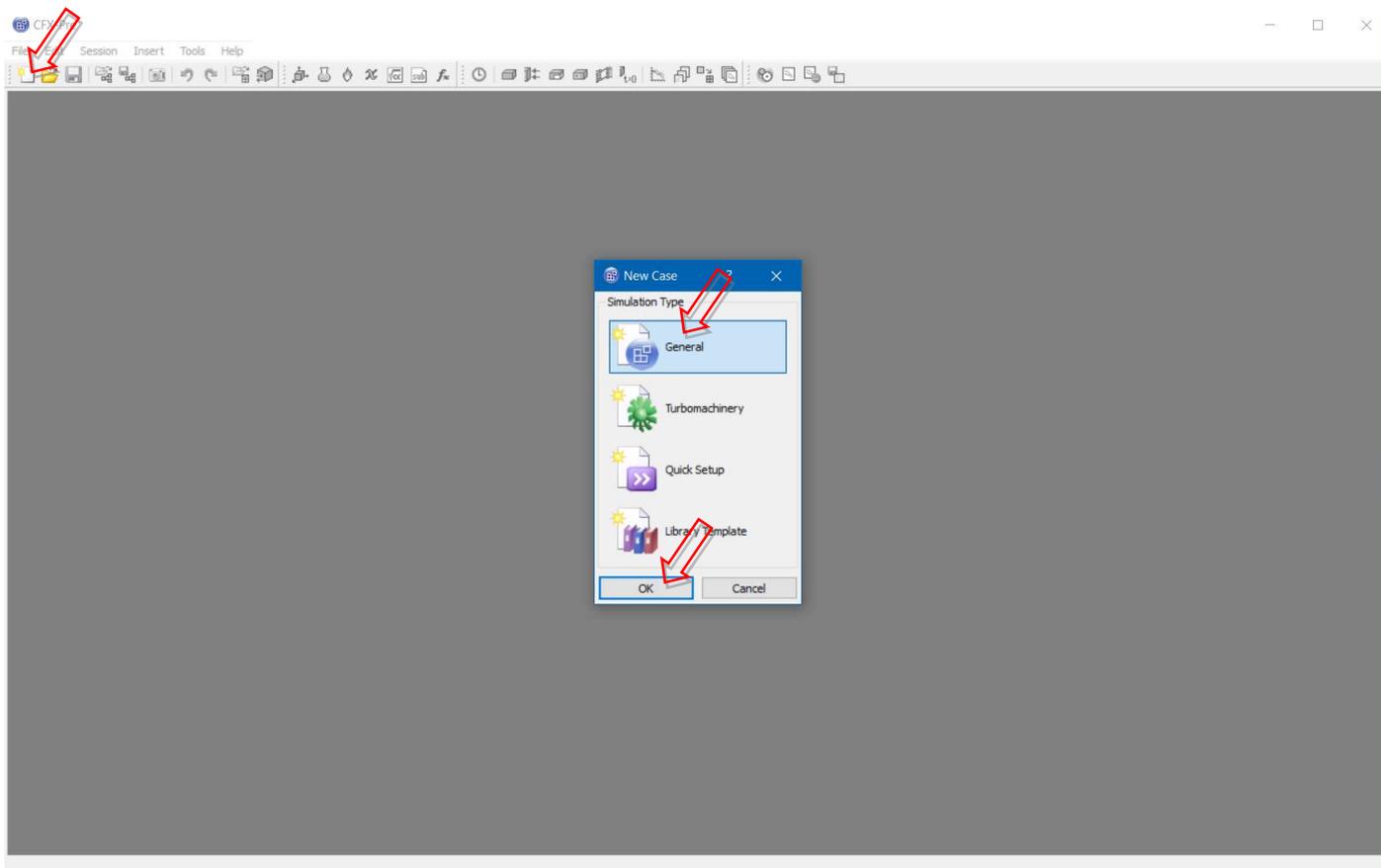
O software Ansys CFX resolve, numericamente, as equações da dinâmica dos fluidos para praticamente qualquer geometria e condição de escoamento. Existem limitações na condição de escoamento como, por exemplo, para gases muito rarefeitos que é característica da estratosfera. Na sua opção padrão, ele resolve as equações na forma RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) que é amplamente usada pela indústria. Essa forma tem a vantagem de ter um custo computacional que viabiliza a simulação de escoamentos com alto número de Reynolds para geometrias complexas. Ela tem a desvantagem de exigir o uso do que são chamados de modelos de turbulência. Esses modelos são necessários para incluir o efeito da turbulência, já que a formulação RANS filtra (elimina) as variações aleatórias de alta frequência, que são características da condição de escoamento turbulento.

A simulação que é mostrada nesse tutorial não tem a intenção, ou pretensão, de discutir todas as opções e características do software. Para boa parte dessas opções é usado o padrão (default) do software sem qualquer outro comentário a respeito disso.

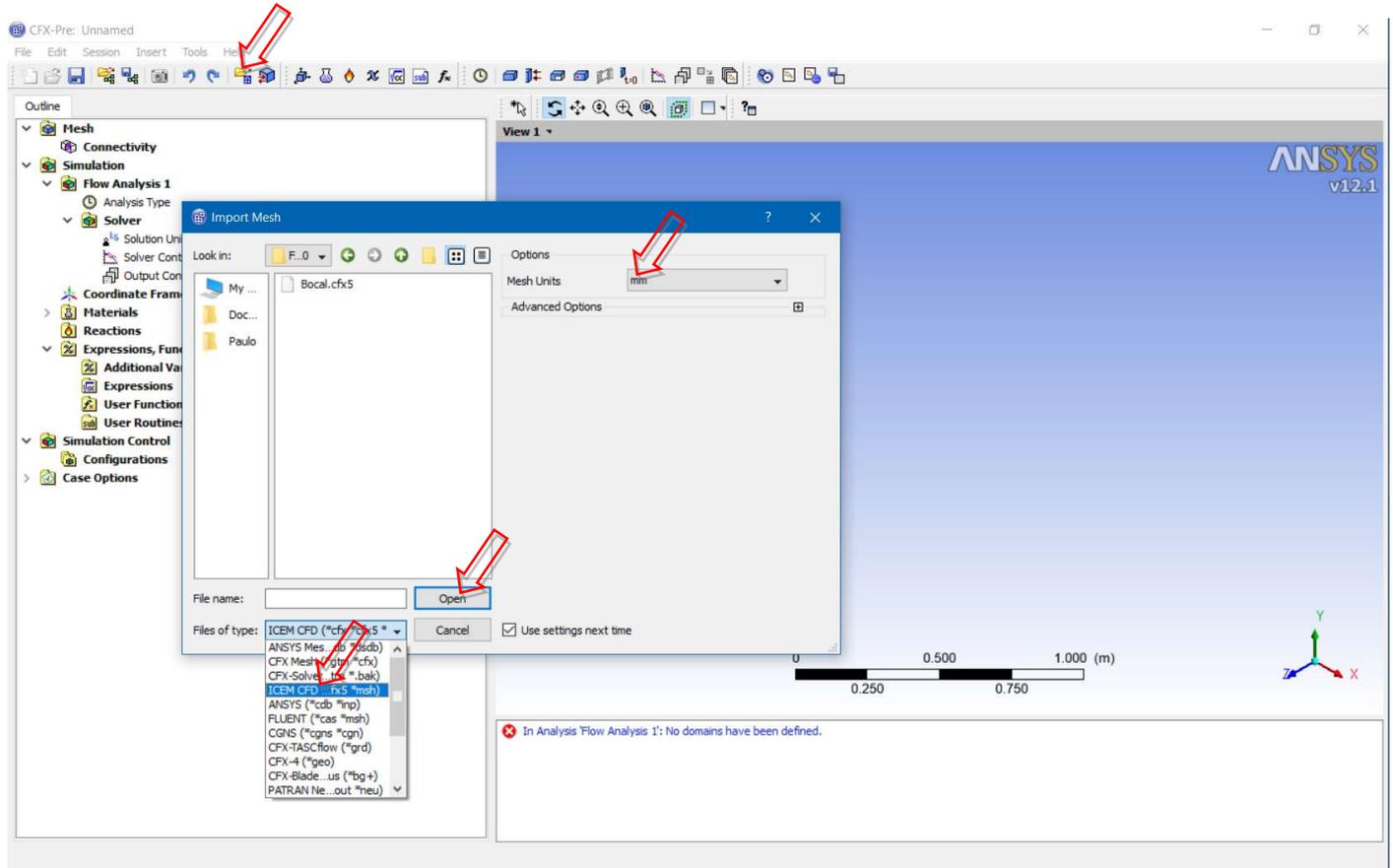
Inicie o software CFX. Coloque um caminho adequado em “Working Directory” (não precisa ser o que aparece na figura). Clique em CFX-Pre.



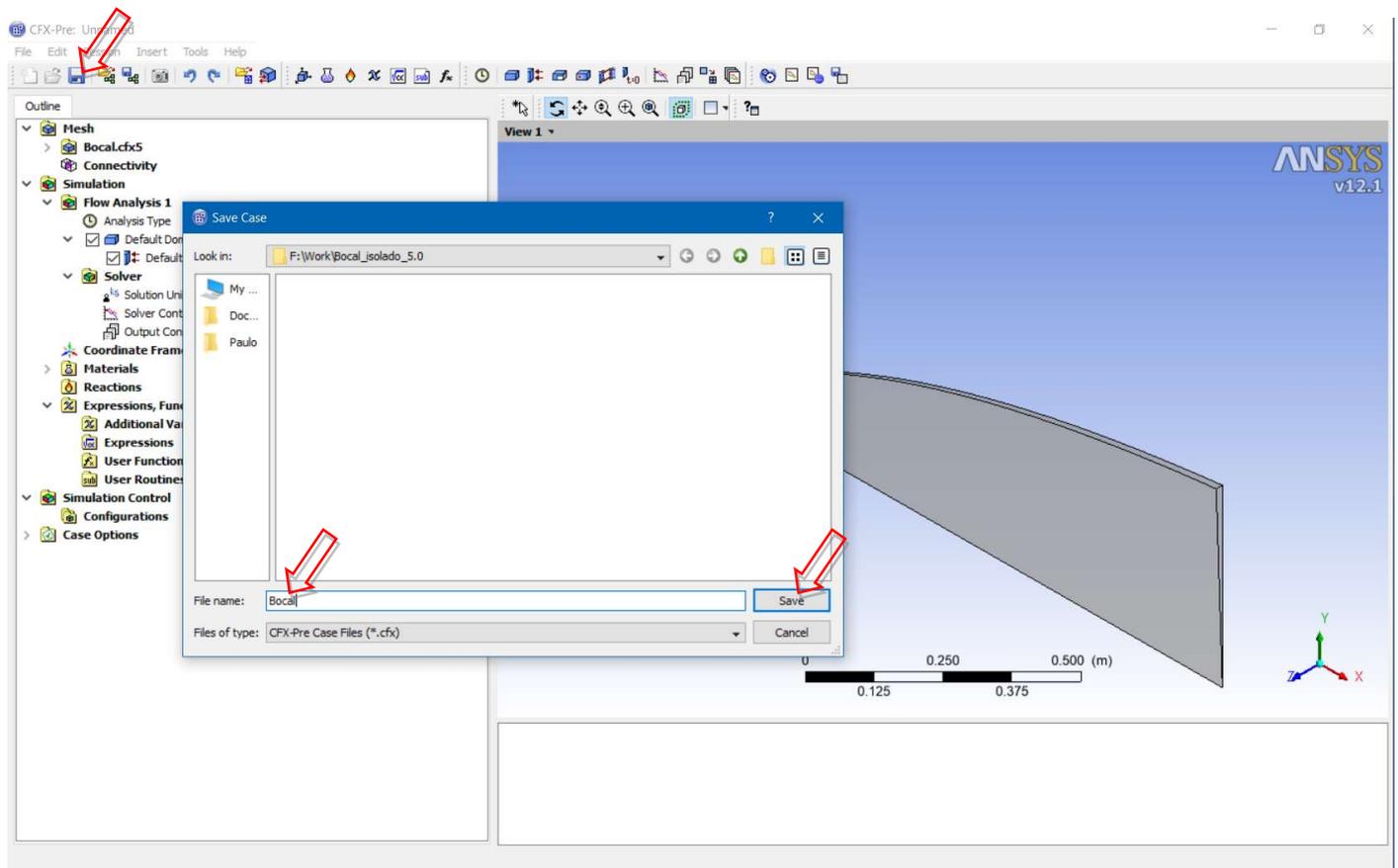
Clique em “New Case” > “General” > “OK”.



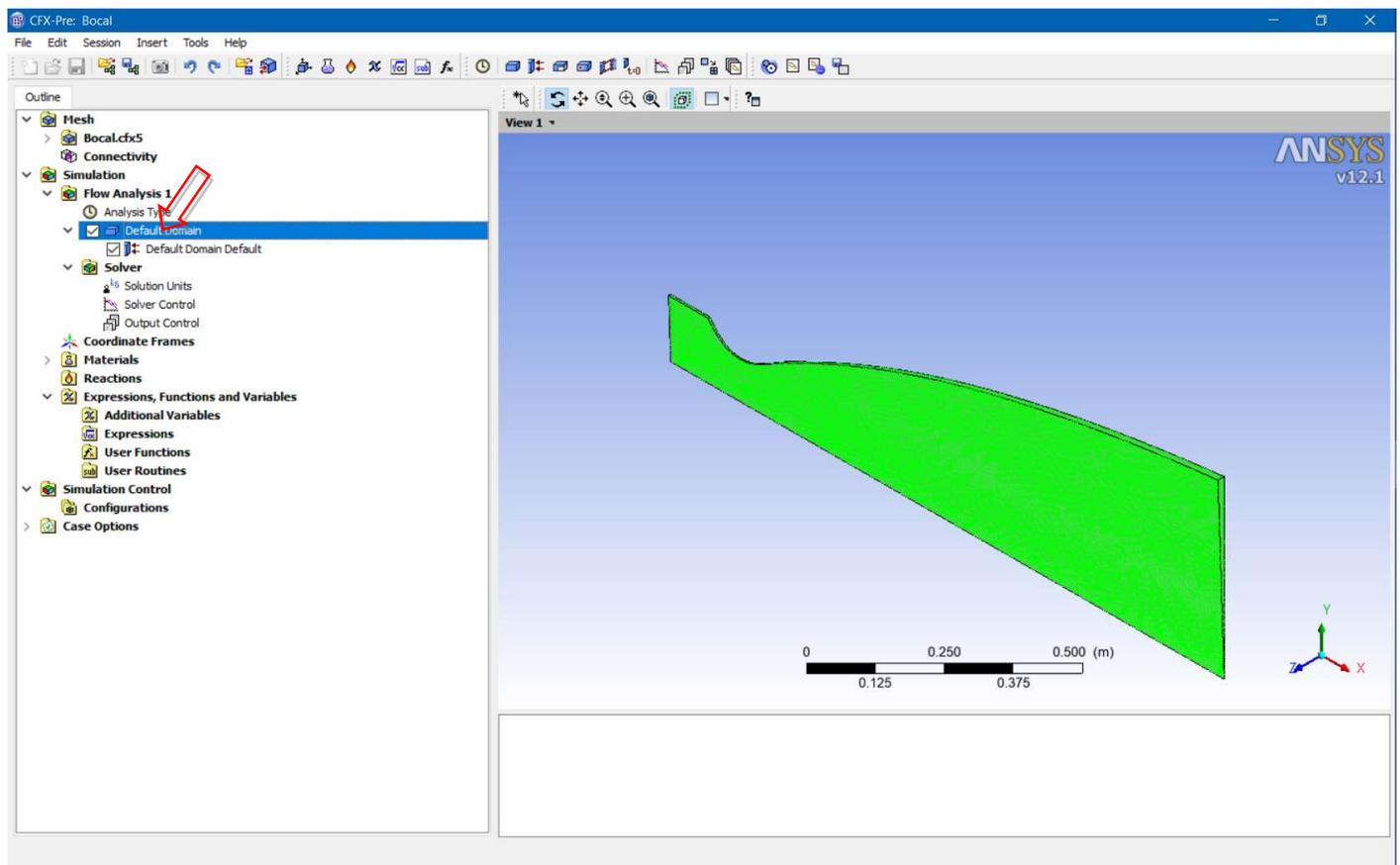
Clique em “Import Mesh” > “Files of type” “ICEM CFD” > “Mesh Units” “mm” > selecione o arquivo “Bocal.cfx5” > “Open”.



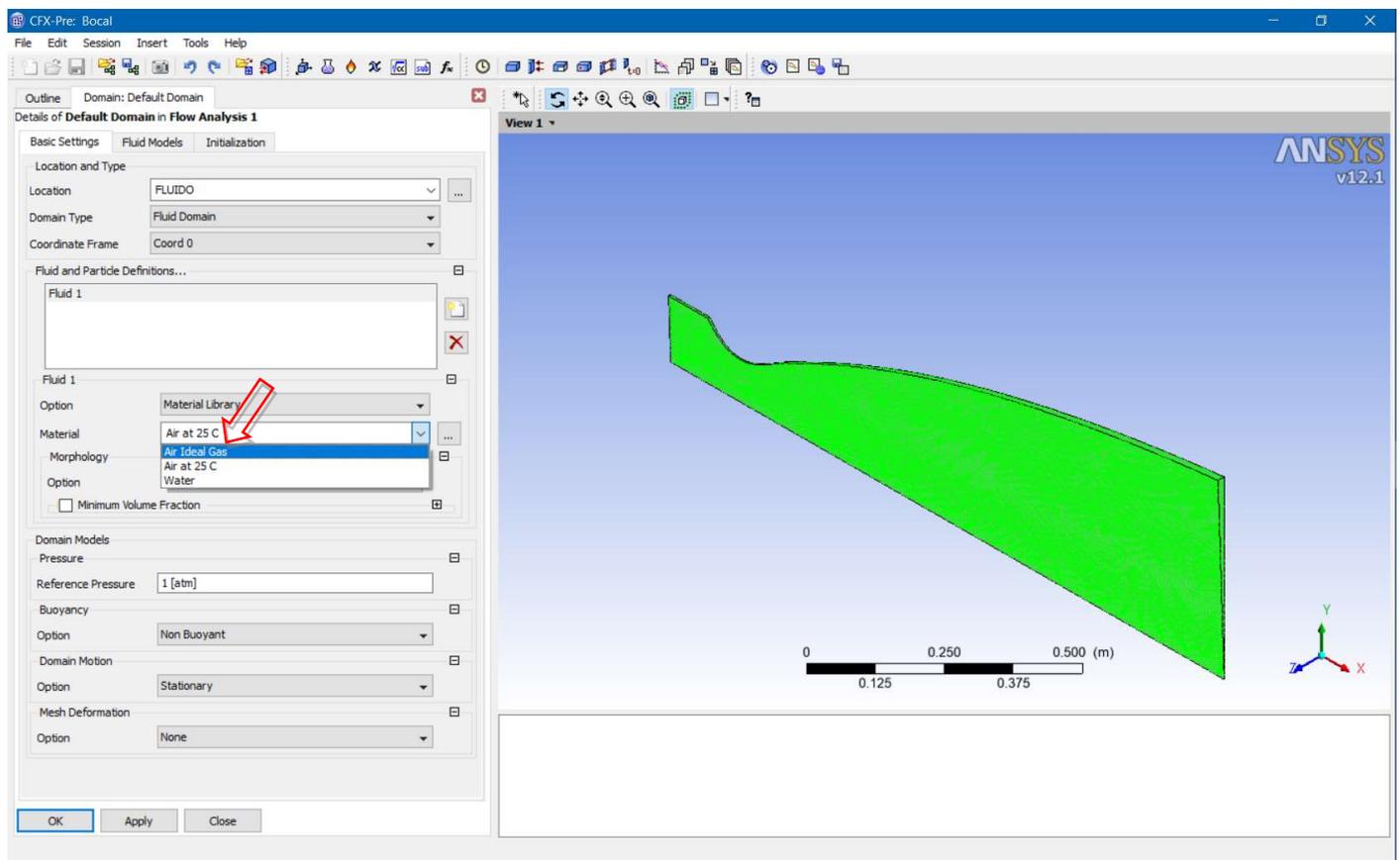
Salve o projeto com o nome “Bocal”.



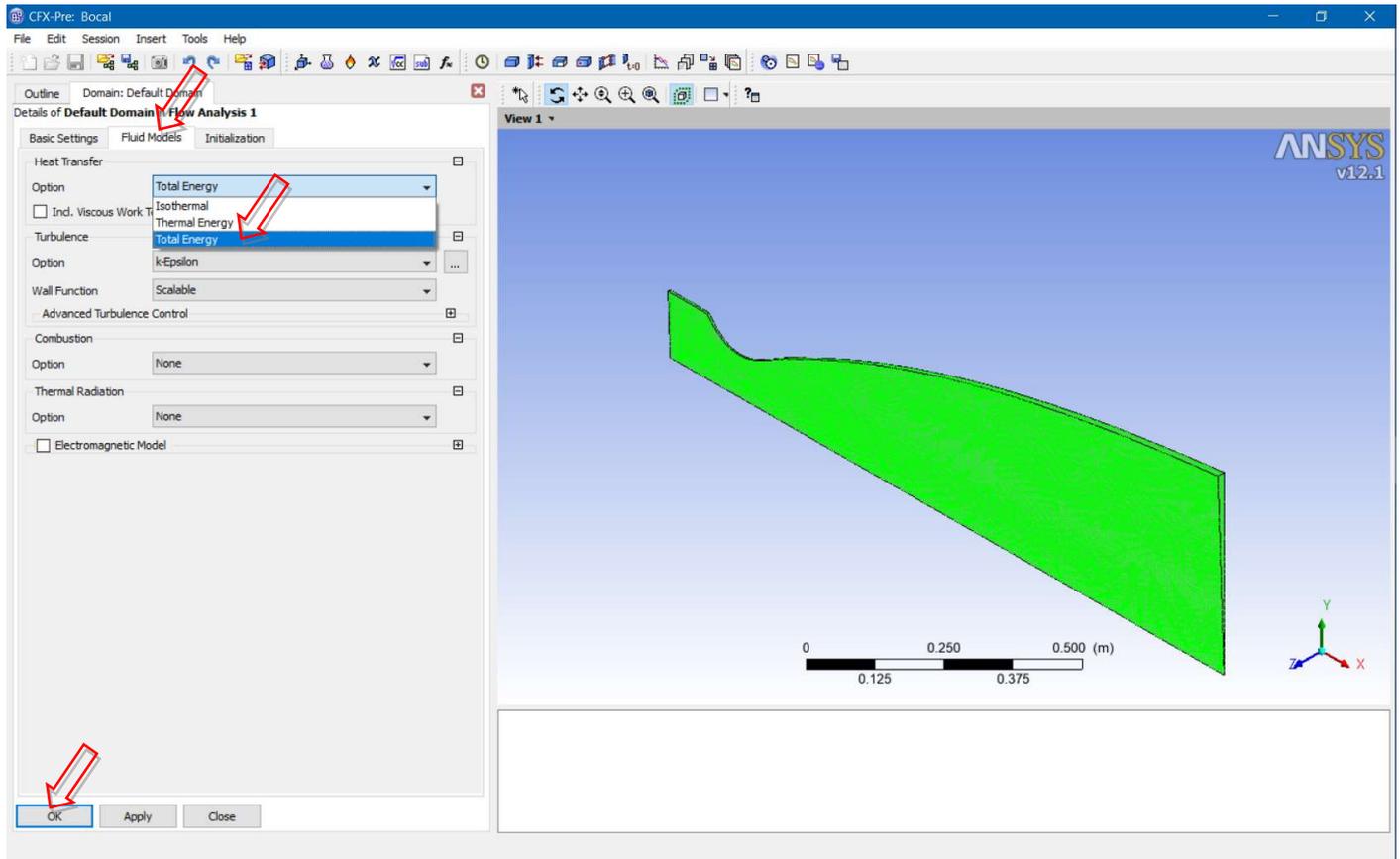
Clique duas vezes em “Default Domain”.



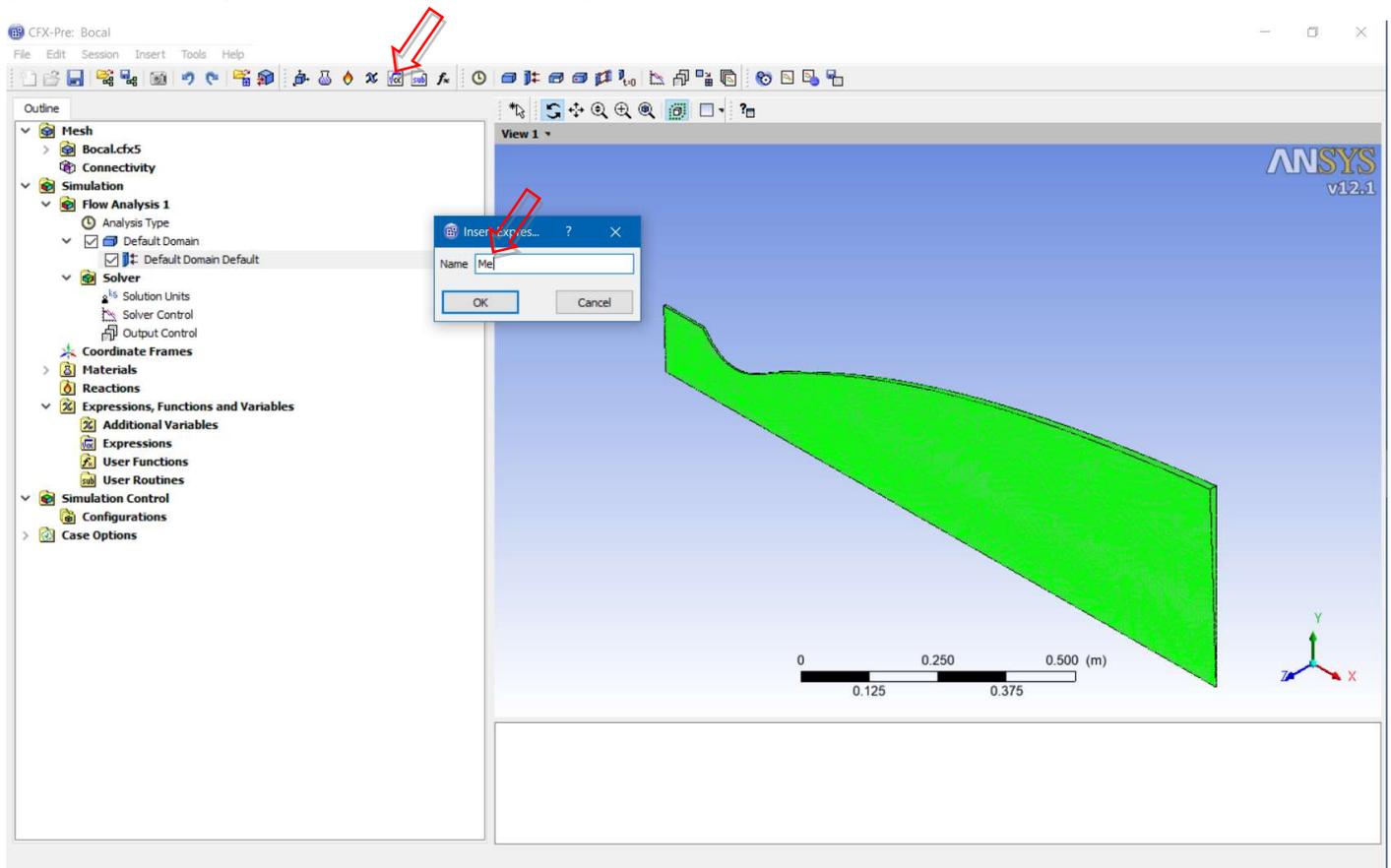
Mude o “Material” para “Air Ideal Gas”. Isso permite a simulação do escoamento compressível. A opção padrão “Air at 25 C” é incompressível.



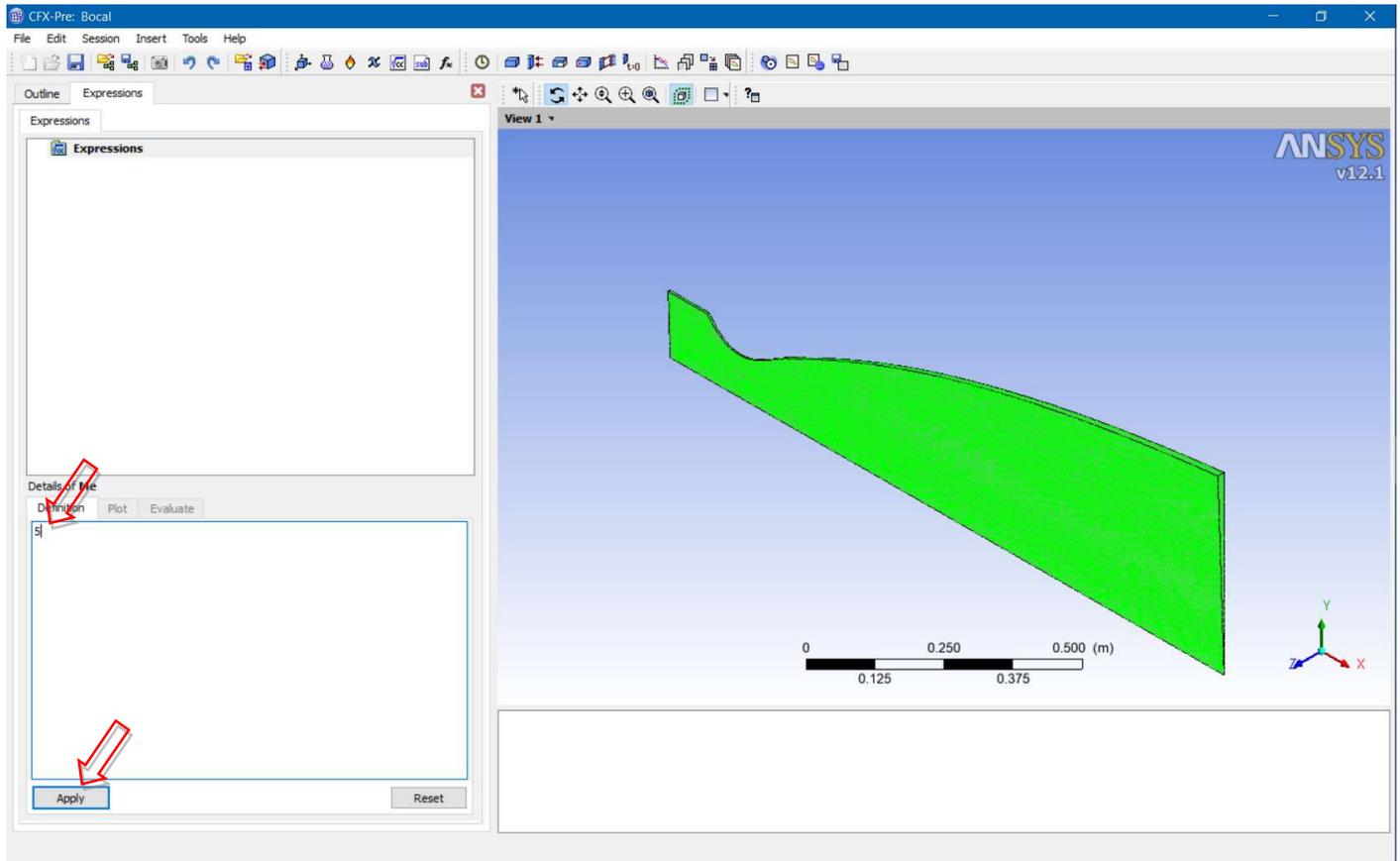
Clique em “Fluid Models” e selecione “Total Energy” para a equação da energia (“Heat Transfer”). Clique “OK”.



Para essa simulação é interessante definir parâmetros como meio de evitar problemas de instabilidade no processo de solução. Para isso, clique em “Expressions” > “Name” “Me” > “OK”.



Para o exemplo desse tutorial o Mach de exaustão (Me) é 5. Esse valor deve ser ajustado de acordo com as condições desejadas.

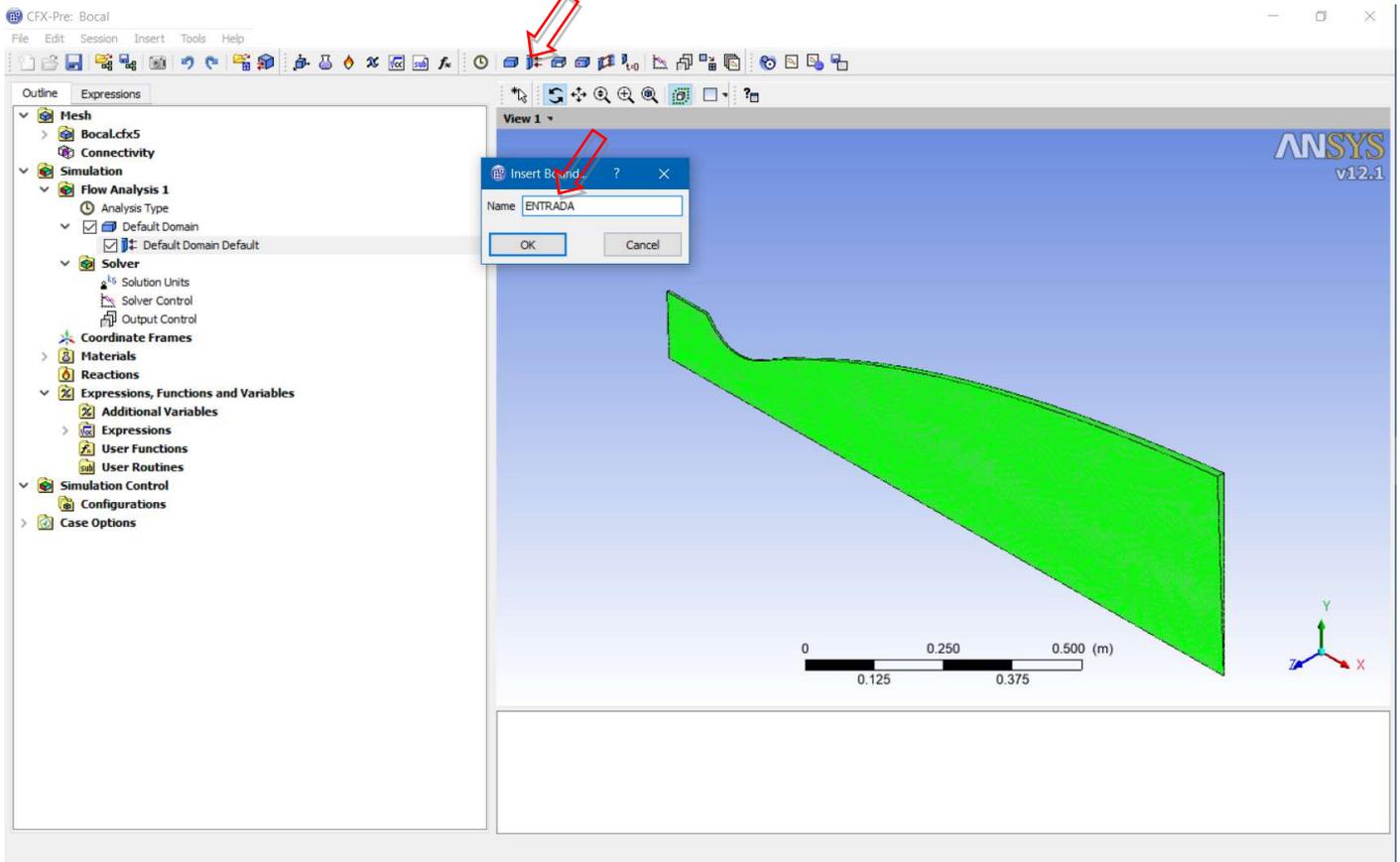


São vários parâmetros e algumas equações que devem ser definidos. O processo para cada um é o que foi descrito para “Me”. A lista que deve ser implementada é:

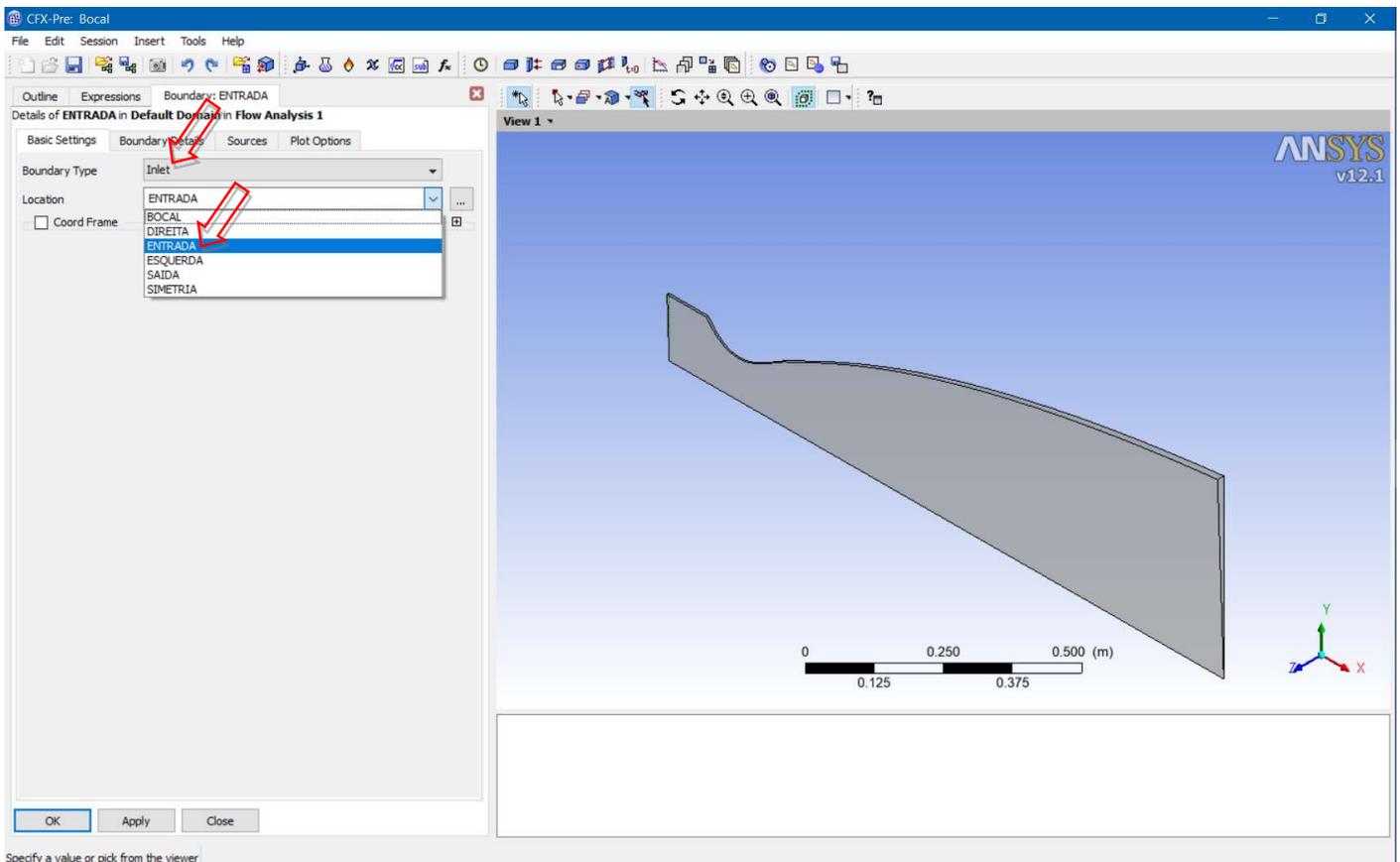
Descrição	Nome	Definição (o que deve ser colocado em “Definition”)
Mach de saída	Me	DADO DO SEU BOCAL (5 nesse caso)
Posição X da saída	xe	DADO DO SEU BOCAL (medir no ICEM, 1214[mm] nesse caso)
Mach de entrada	Mi	0.25
Posição X da entrada	xi	-200[mm]
Pressão total na câmara	p0	20[atm]
Pressão total na câmara	T0	4000[K]
Varição do Mach em X	Ma	$(Me-Mi)*(x-xi)/(xe-xi)+Mi$
Varição da pressão em X	pa	$p0/(1+(1.4-1)/2*Ma^2)^{(1.4/(1.4-1))}$
Varição da temperatura em X	Ta	$T0/(1+(1.4-1)/2*Ma^2)$
Varição da vel. do som em X	a	$\text{sqrt}(1.4*287[J/(kg*K)]*Ta)$
Varição da velocidade em X	Va	$Ma*a$

Note que o Mach varia linearmente ao longo do bocal. Isso vai ser usado como condição inicial para evitar instabilidades. O mesmo para pressão e temperatura, mas que seguem as relações isentrópicas.

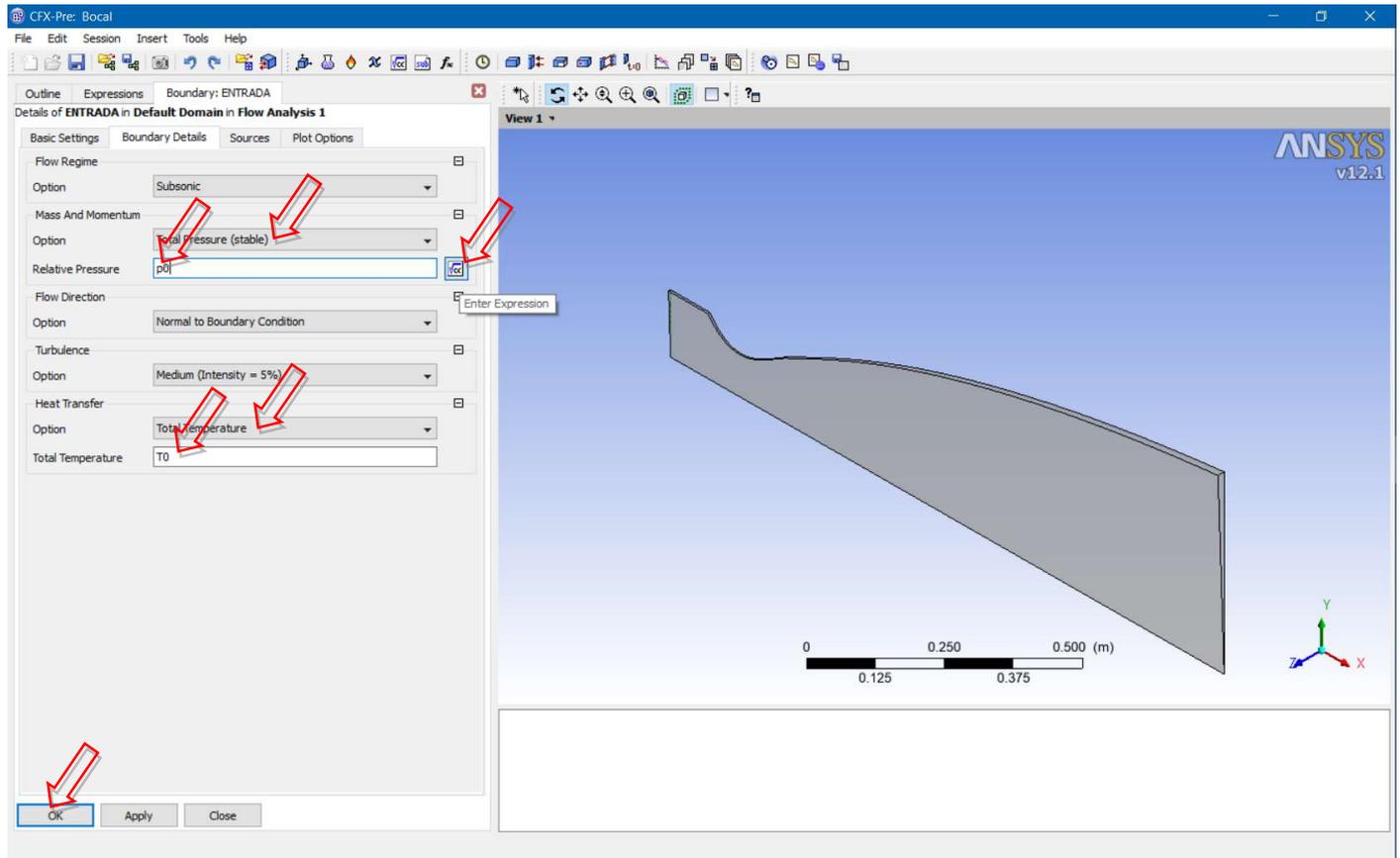
O próximo passo é definir as condições de contorno. Clique em “Boundary” e dê o nome de “ENTRADA”.
Clique “OK”.



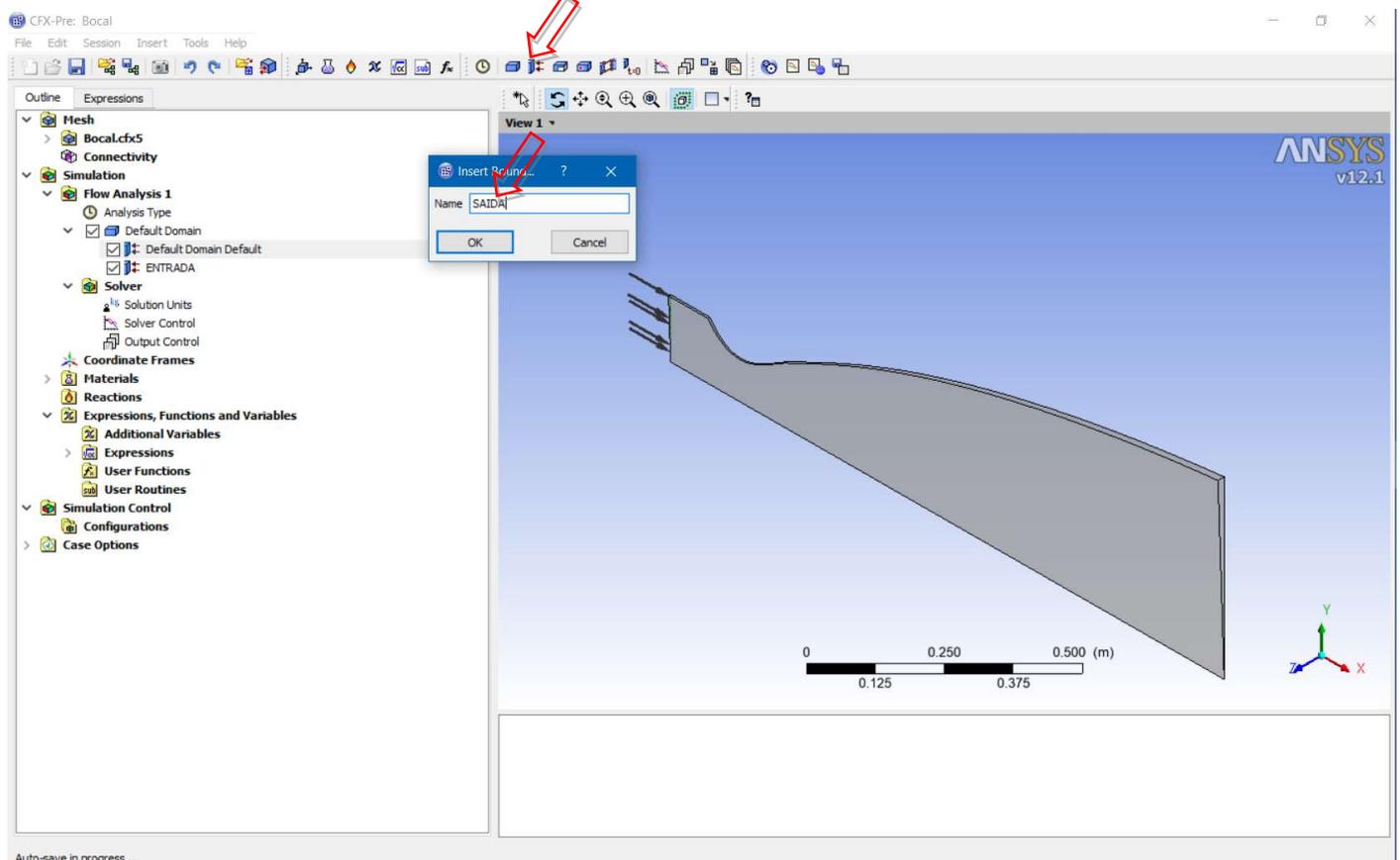
O “Boundary Type” deve ser “Inlet” e “Location” deve ser “ENTRADA”.



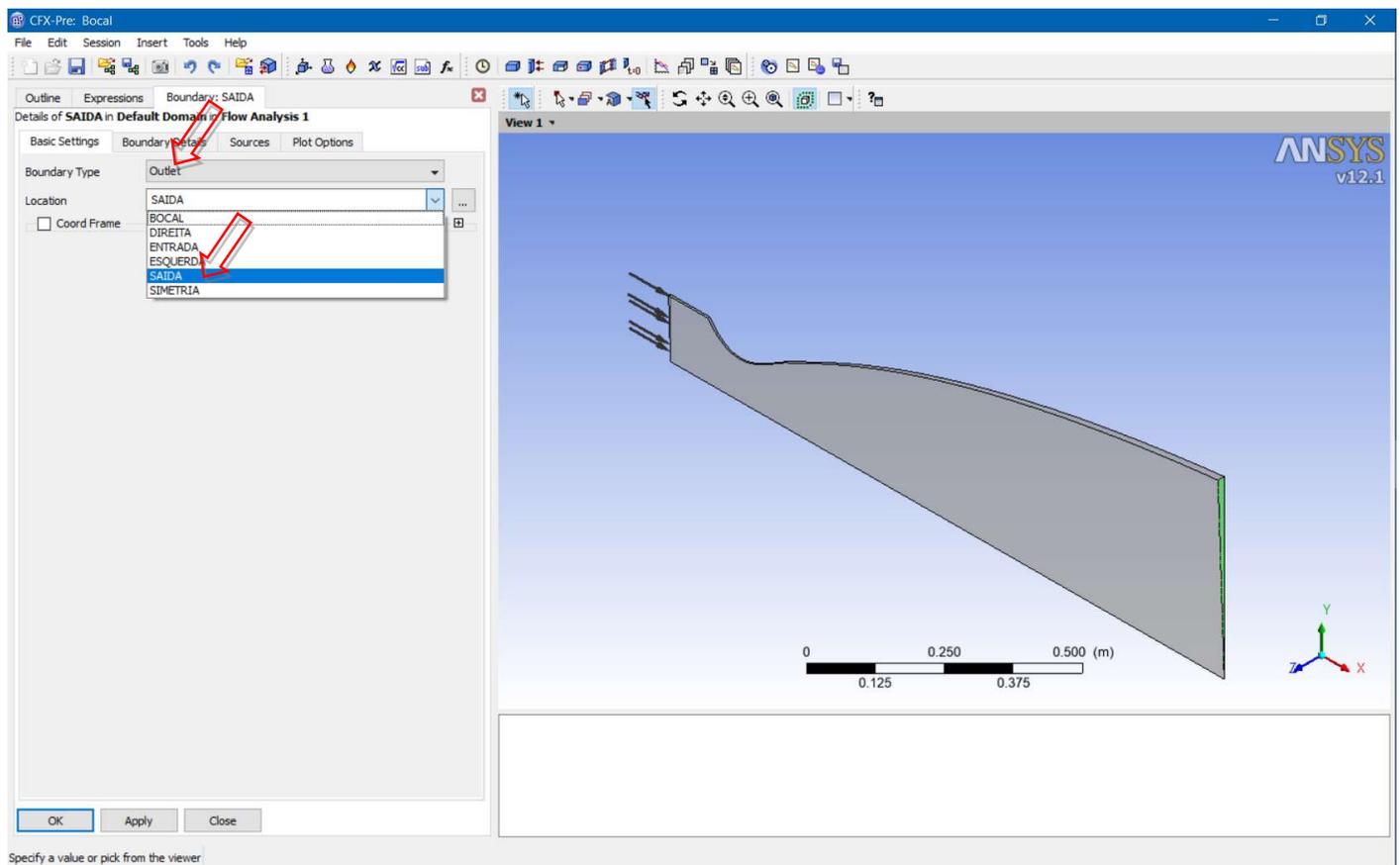
Clique em “Boundary Details” > “Total Pressure (stable)” > “Enter Expression” > “p0”. “Total Temperature” > “Enter Expression” > “T0”. Clique “OK”.



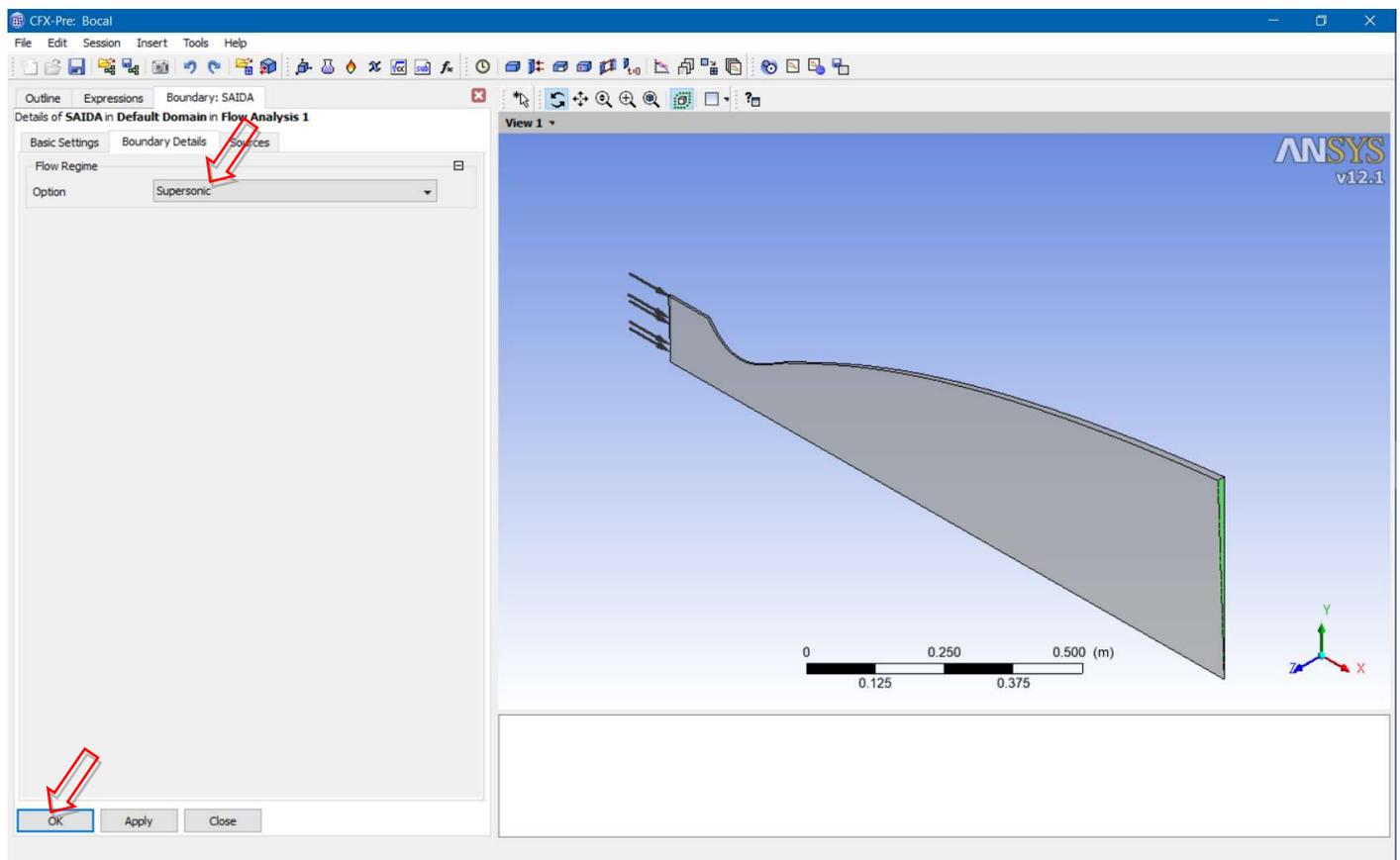
Clique em “Boundary” e dê o nome de “SAIDA”. Clique “OK”.



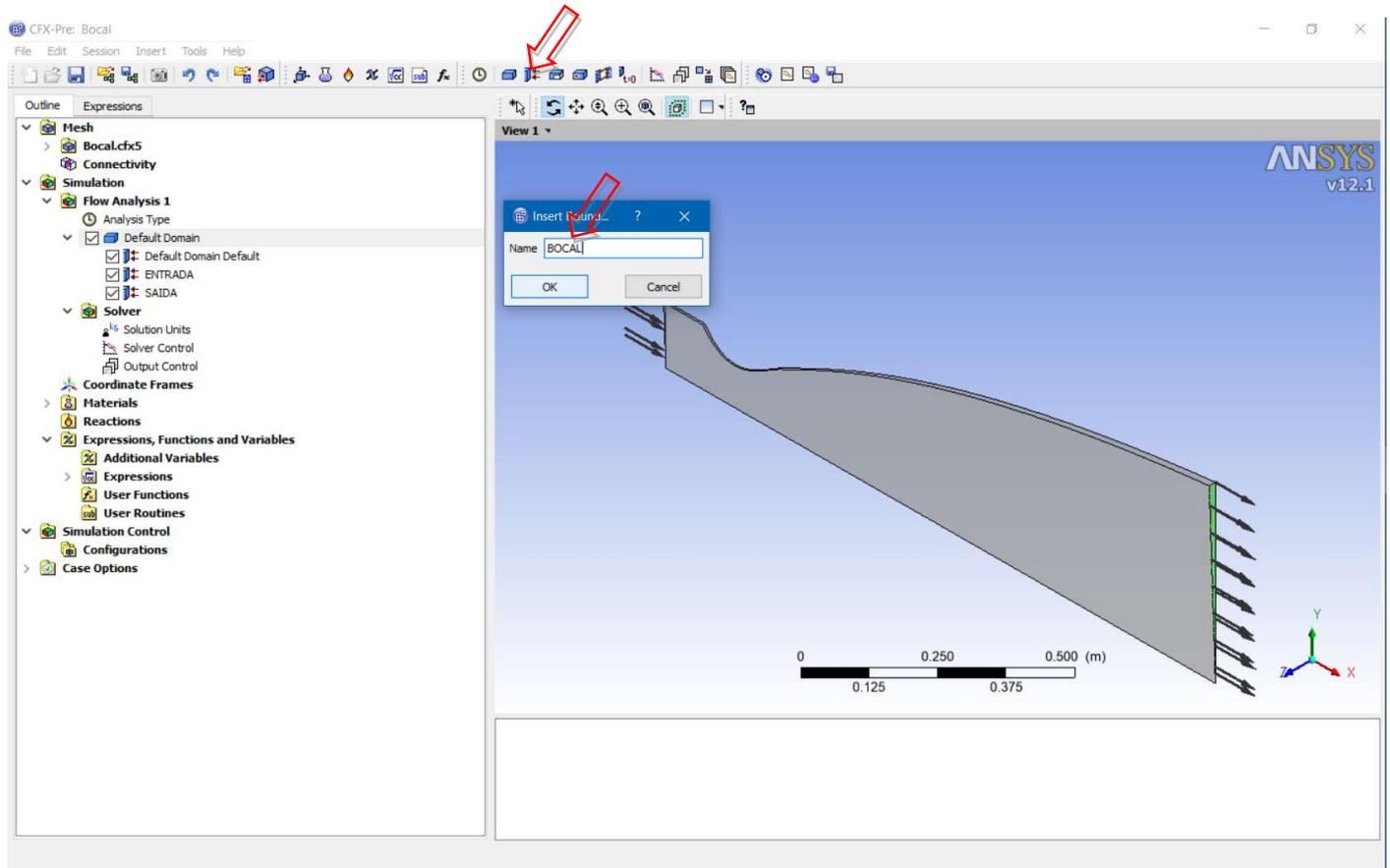
O "Boundary Type" deve ser "Outlet" e "Location" deve ser "SAIDA".



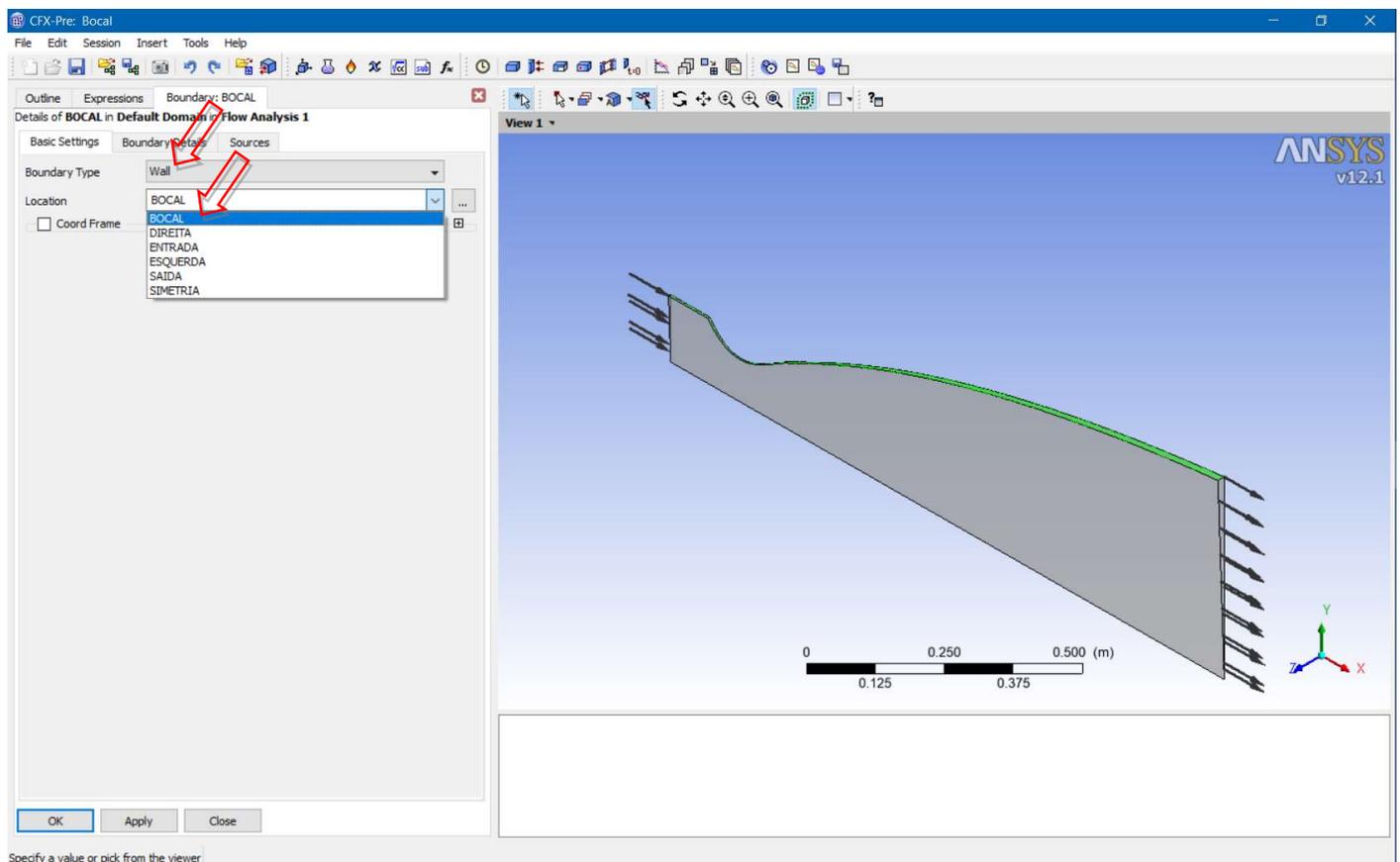
Clique em "Boundary Details" > "Flow Regime" "Supersonic". Clique "OK".



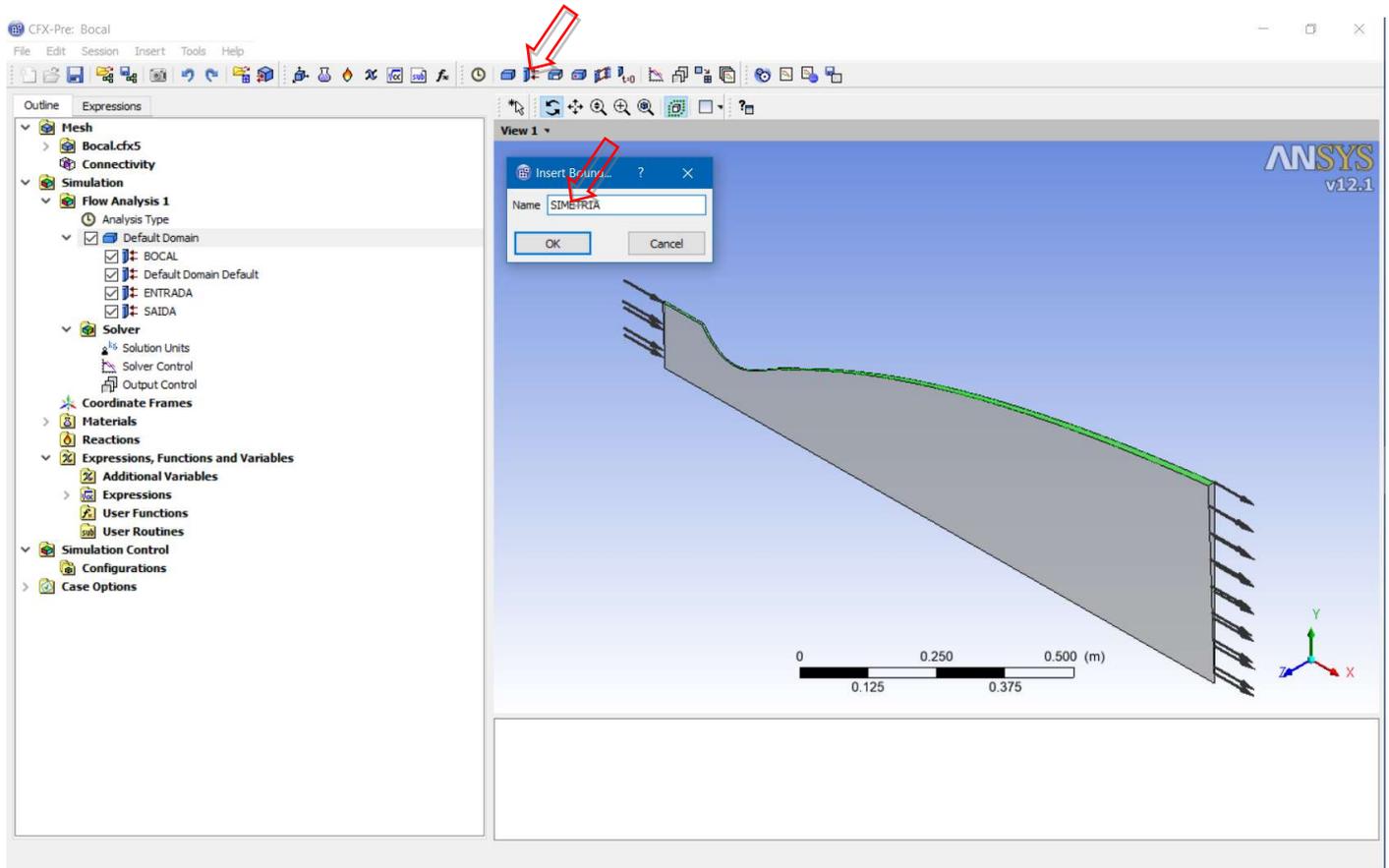
Clique em “Boundary” e dê o nome de “BOCAL”. Clique “OK”.



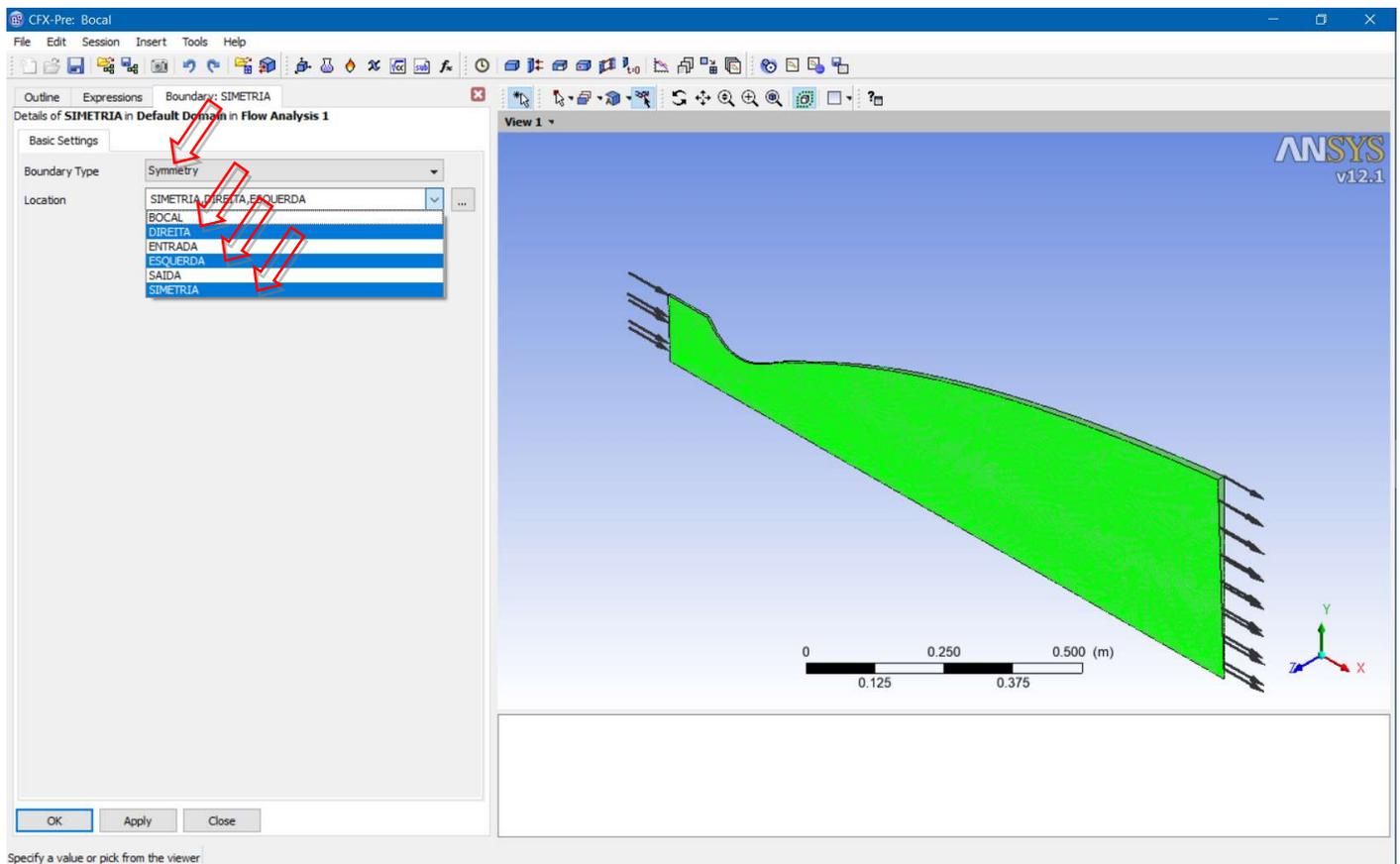
O “Boundary Type” deve ser “Wall” e “Location” deve ser “BOCAL”. Clique “OK”.



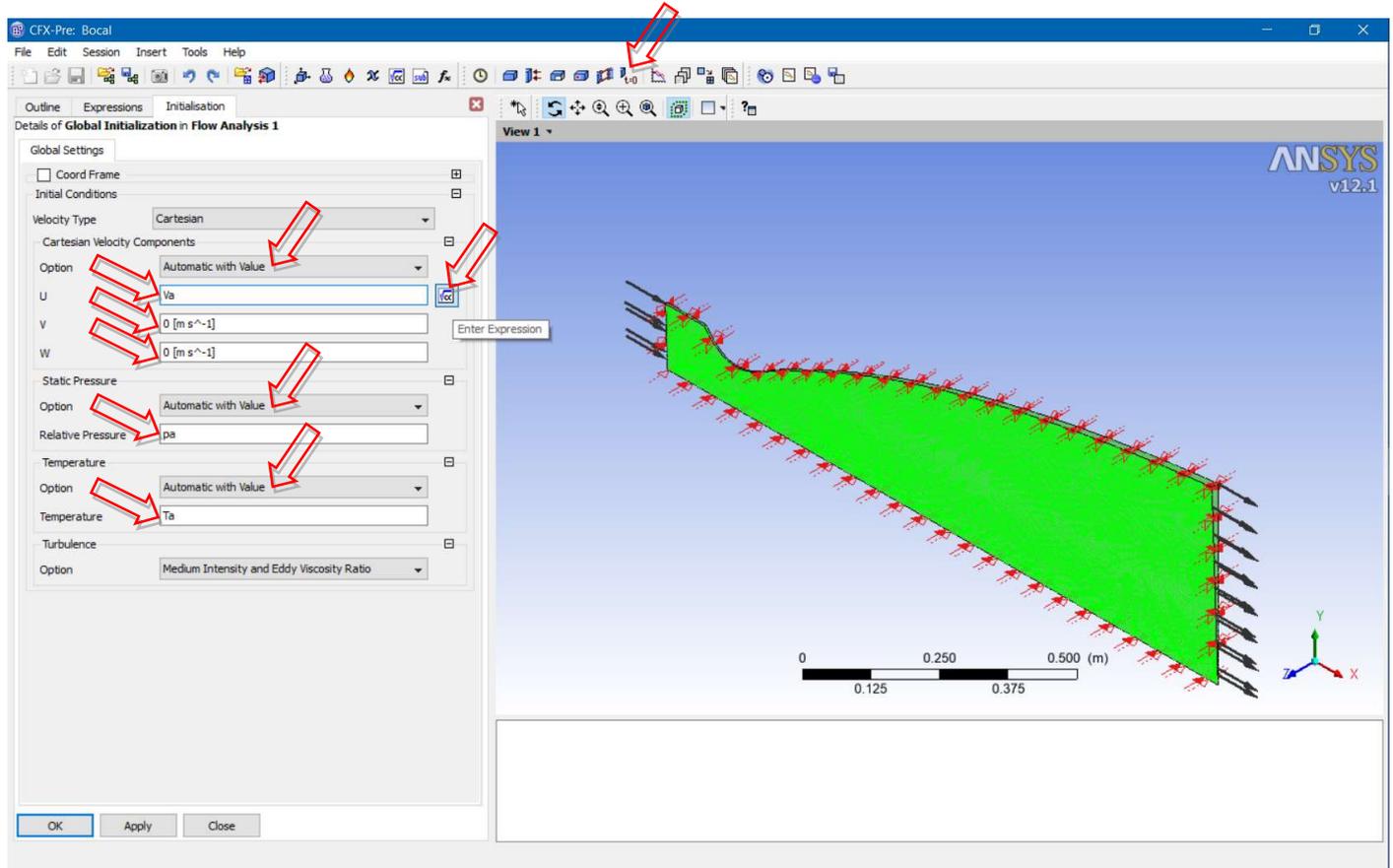
Clique em “Boundary” e dê o nome de “BOCAL”. Clique “OK”.



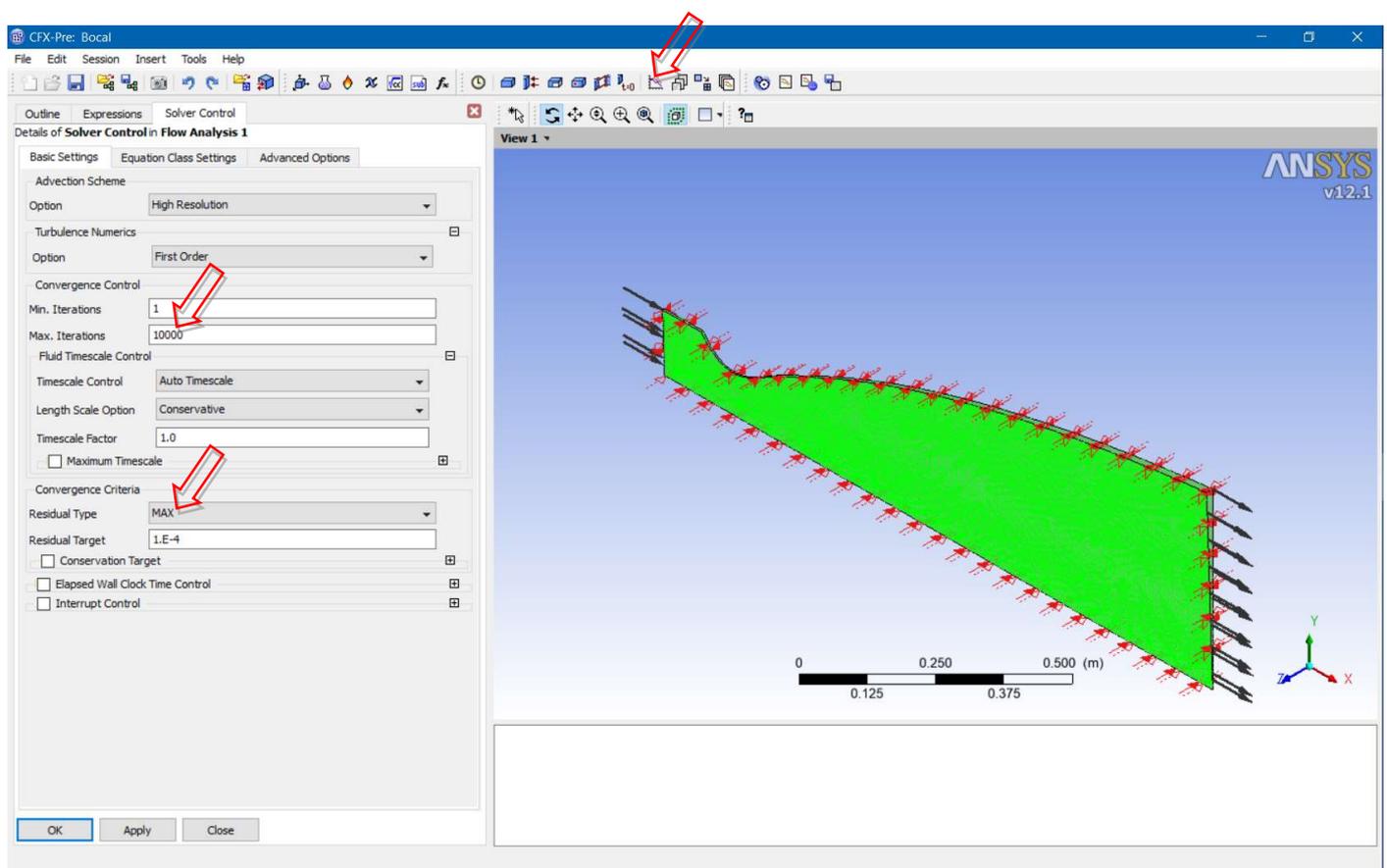
O “Boundary Type” deve ser “Symmetry” e “Location” deve ser “SIMETRIA”, “DIREITA” e “ESQUERDA” (use a tecla Ctrl para selecionar os três. Clique “OK”.



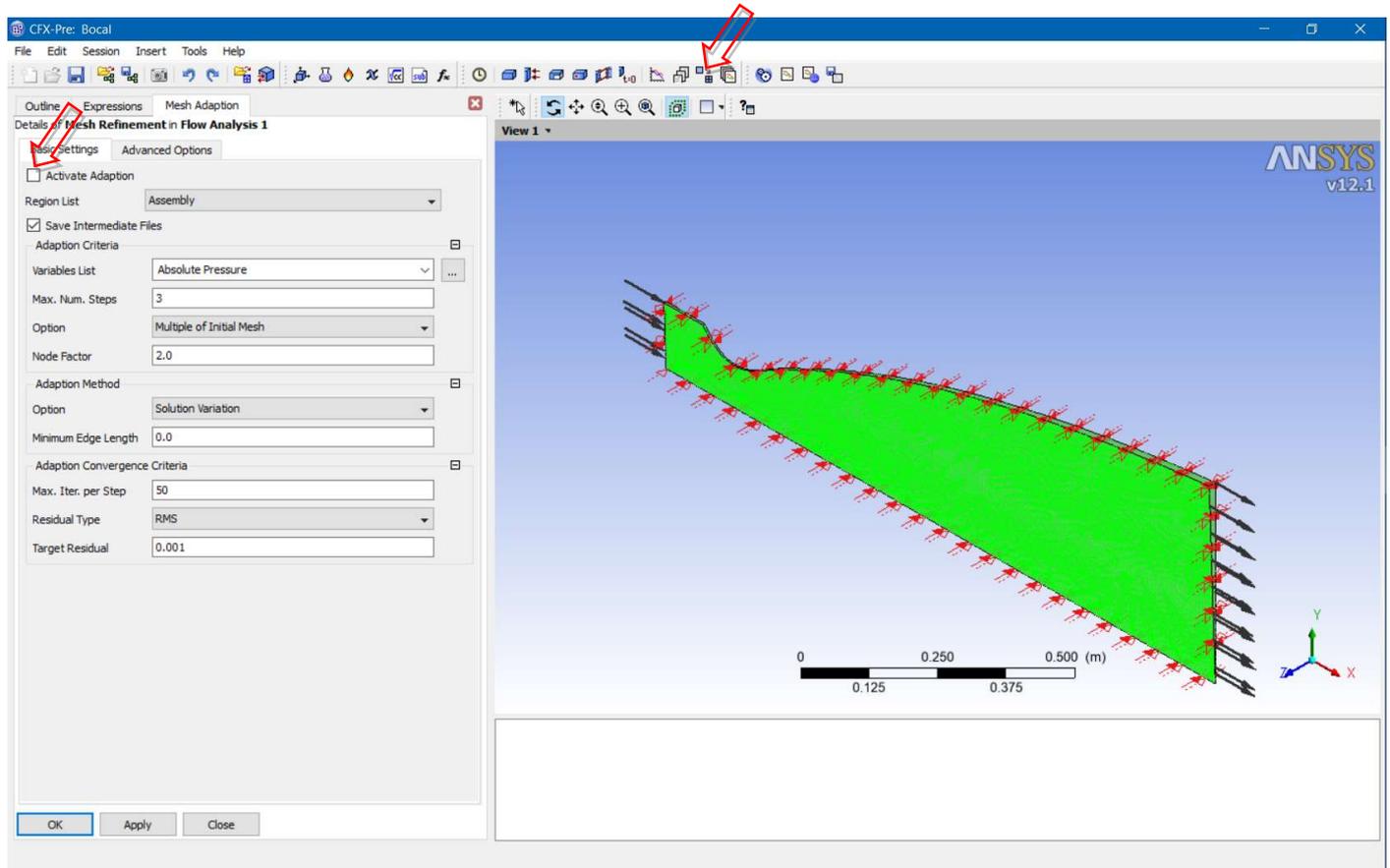
Clique em “Global Initialisation” e selecione “Automatic with Value” para velocidade, pressão e temperatura. Use os parâmetros “Va”, “pa” e “Ta” com a opção “Enter Expression”. Clique “OK”.



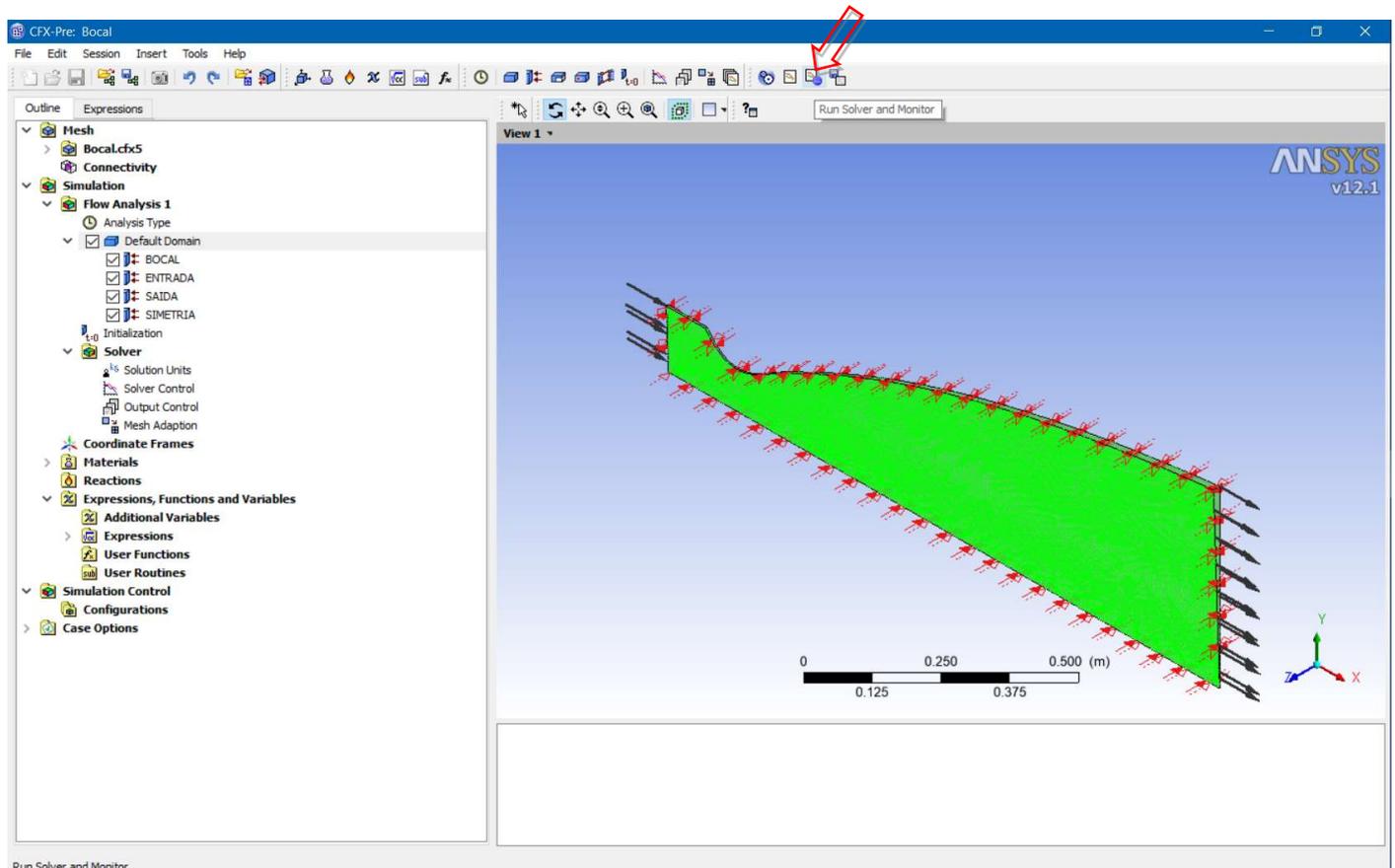
Clique em “Solver Control” e coloque 10000 para “Max. Iterations” e “MAX” para “Residual Type”. Clique “OK”.



Clique em “Mesh Adaption” e de-seleccione a caixa “Activate Adaption”. Clique “OK”.



Salve o projeto e clique em “Run Solver and Monitor”. O software irá iniciar o “Solver” para realizar a simulação e gerar os resultados.

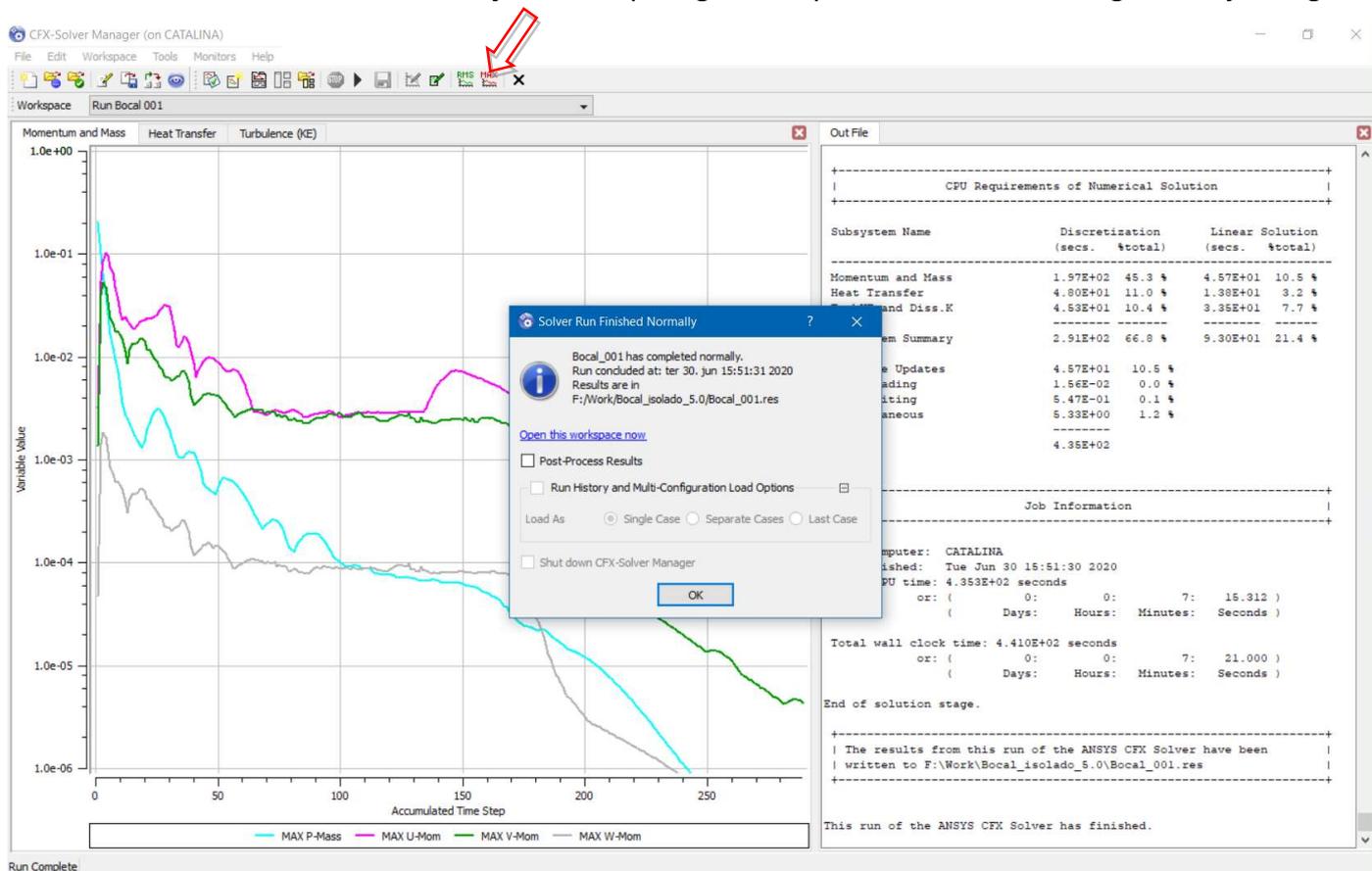


O “Solver Manager” mostra o progresso do processo iterativo de solução. Como o critério de convergência foi definido para “MAX” a visualização do processo deve ser alterada para monitorar os resíduos máximos. O processo para automaticamente quando o critério de convergência é atingido (resíduos máximos menores que 10^{-4}).

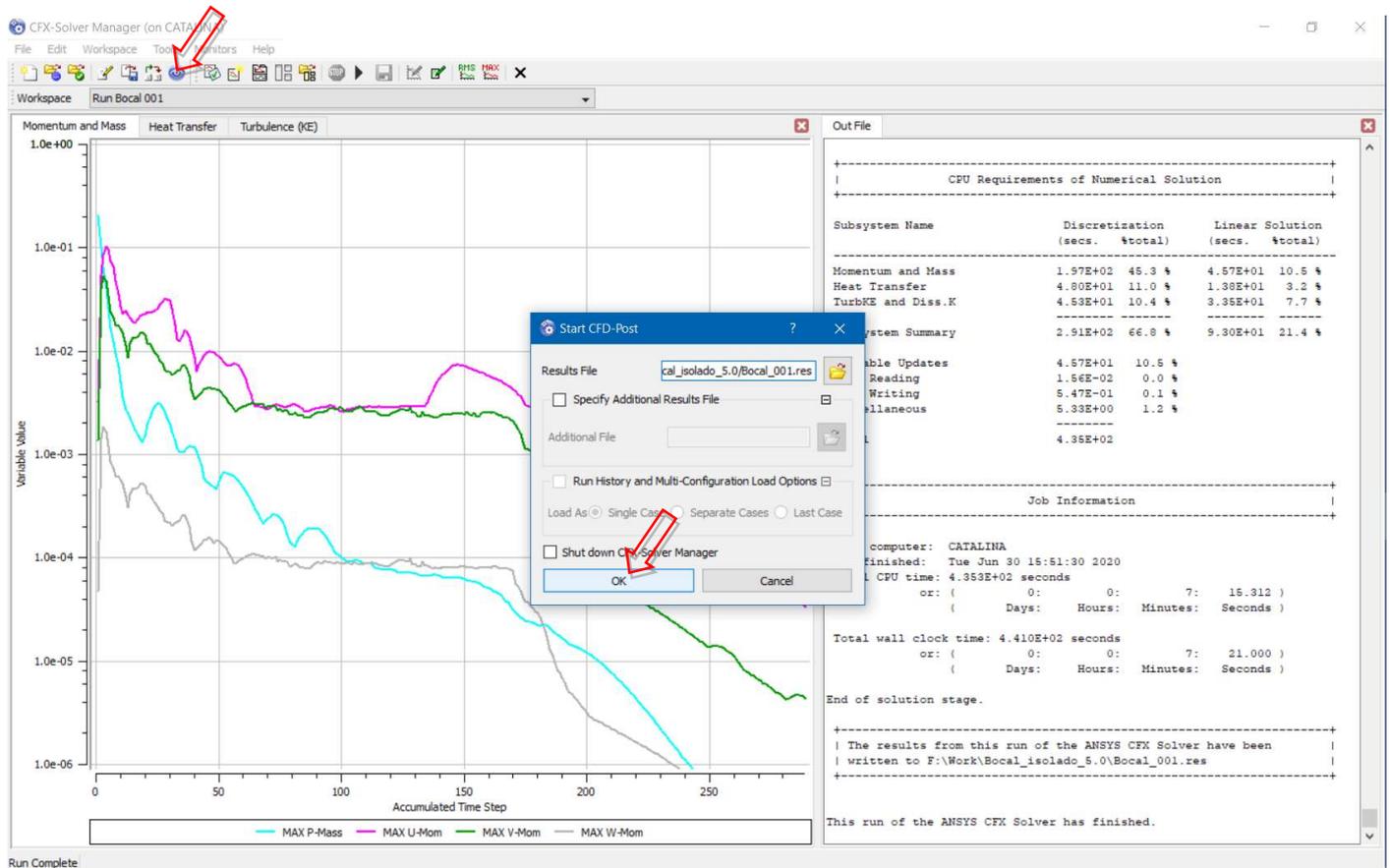
As equações da dinâmica dos fluidos são resolvidas fazendo uma integração numérica no tempo. Esses passos no tempo são chamados de iterações e, o que se busca é atingir uma condição de regime permanente (livre de transientes) e estacionário (sem variação no tempo).

Para determinar se essa condição foi atingida, observa-se a variação das propriedades no tempo. Essa variação é chamada de resíduo e, uma vez que todos os resíduos fiquem pequenos o suficiente, diz-se que o processo convergiu para a solução desejada.

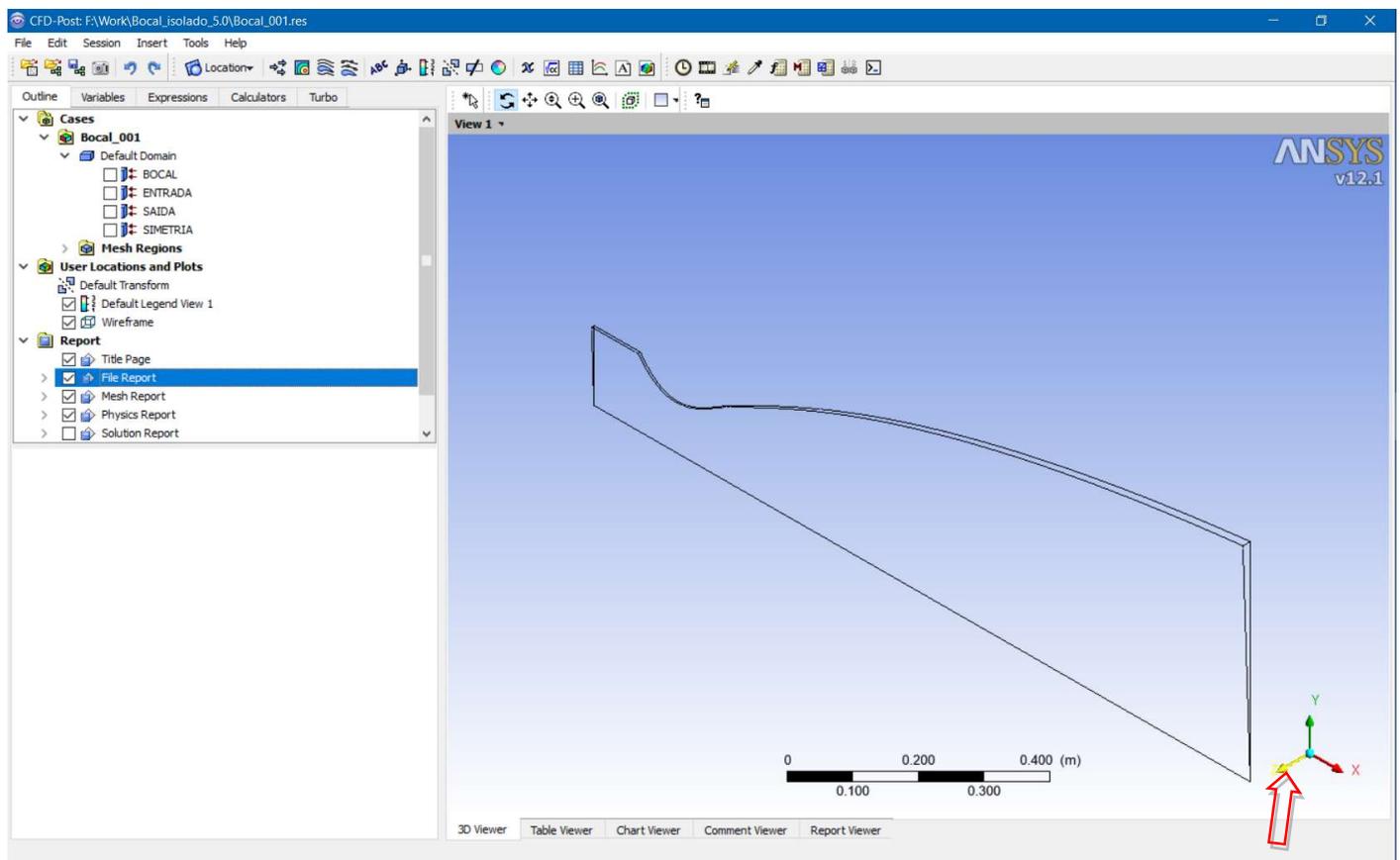
A mudança do “Residual Type” para MAX faz com que o critério de convergência se torne mais rigoroso que o padrão RMS (média) e que haja uma garantia maior de que se atingiu o regime permanente. O aumento no número máximo de iterações serve para garantir que o critério de convergência seja atingido.



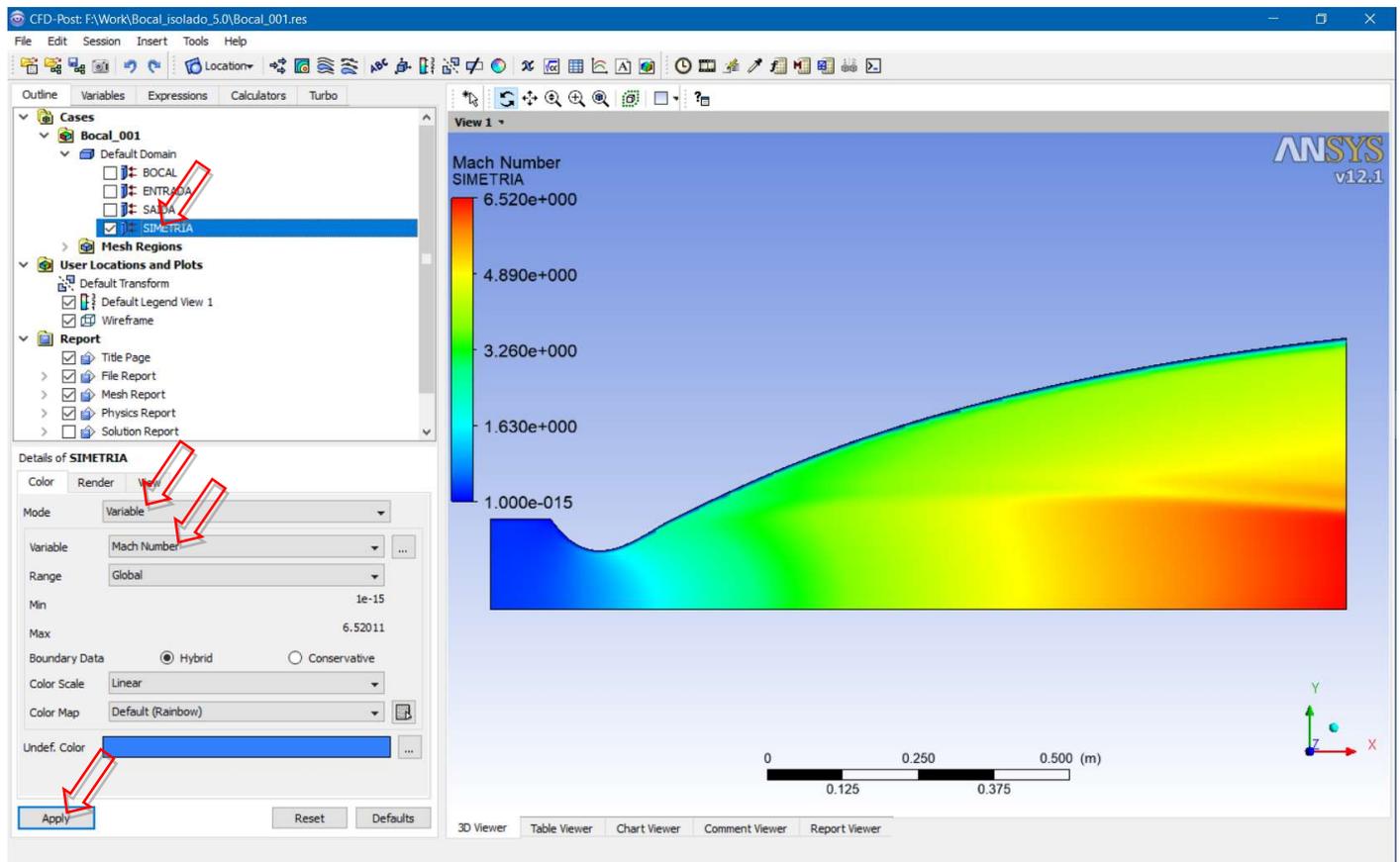
A solução pode ser vista usando o pós-processador (CFD-Post). Clique em “Launch CFD-Post” e “OK”.



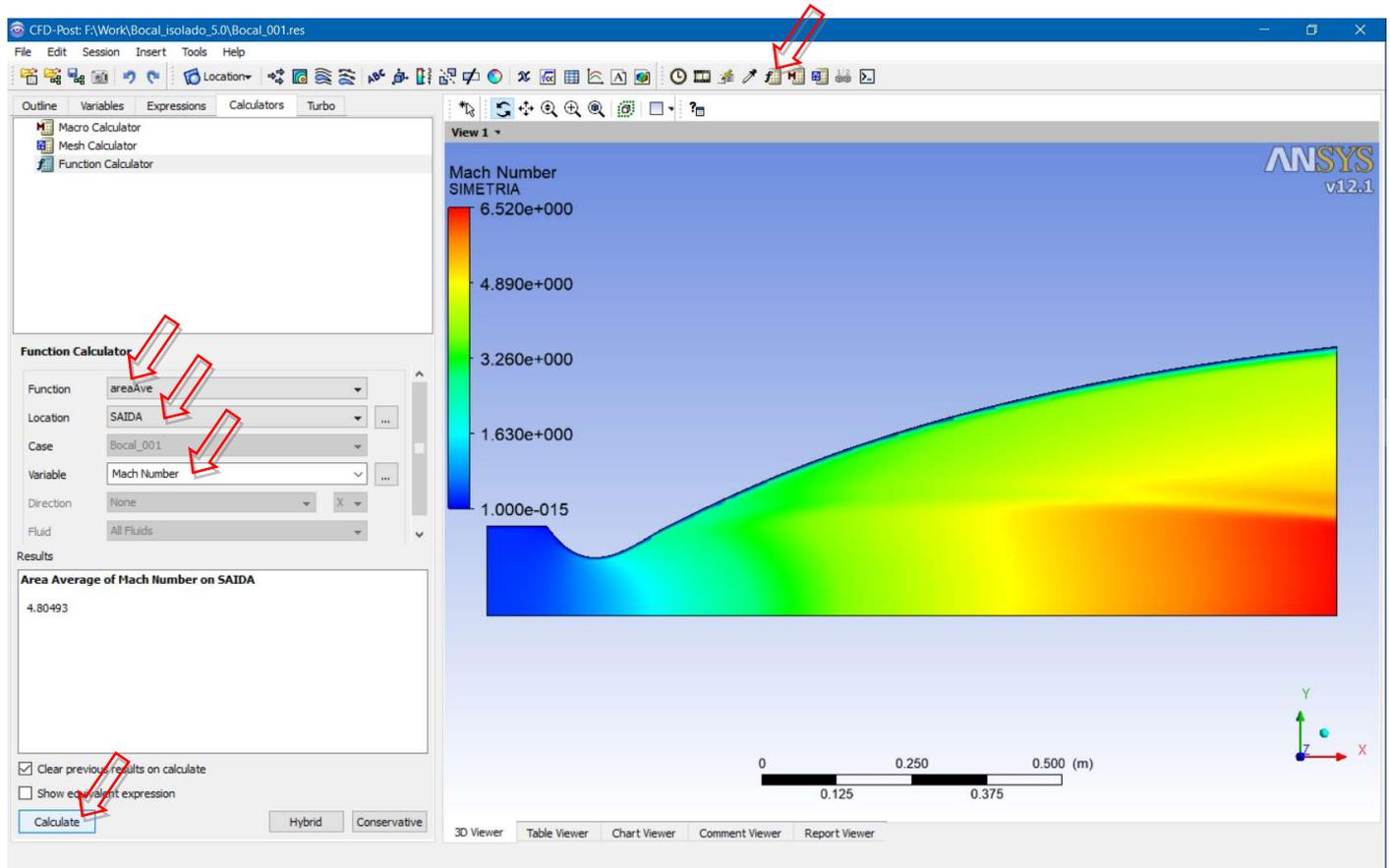
Clique no eixo Z do sistema de coordenadas para ter uma vista lateral do bocal.



Clique duas vezes em “SIMETRIA” > “Mode” “Variable” > “Variable” “Mach Number” > “Apply”. O que se observa é que o Mach não é uniforme na saída, mas isso é de se esperar para um caso 3D. O valor máximo é bem maior que o estimado (Mach 5) mas um cálculo do Mach médio deve se aproximar do valor estimado.

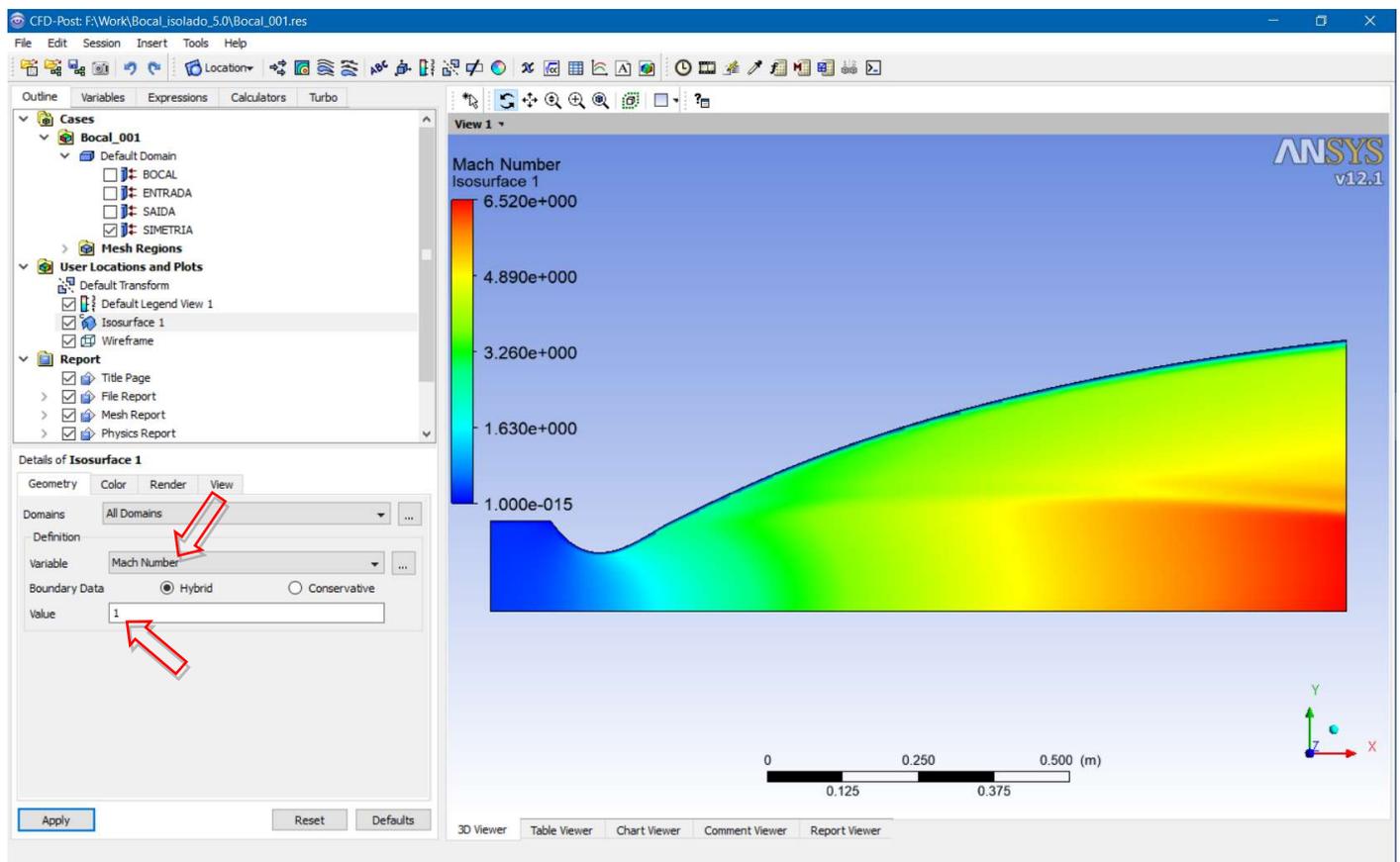
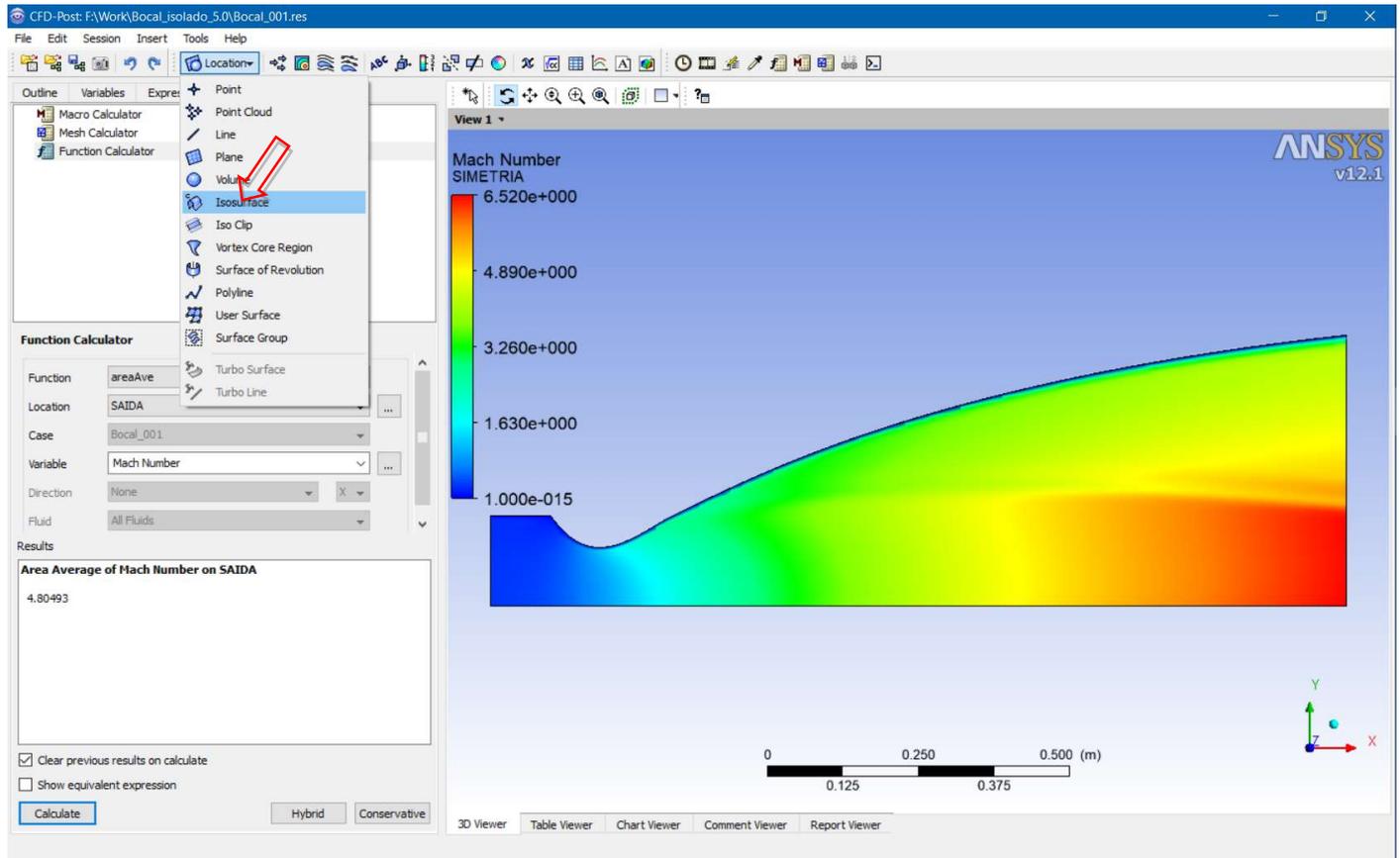


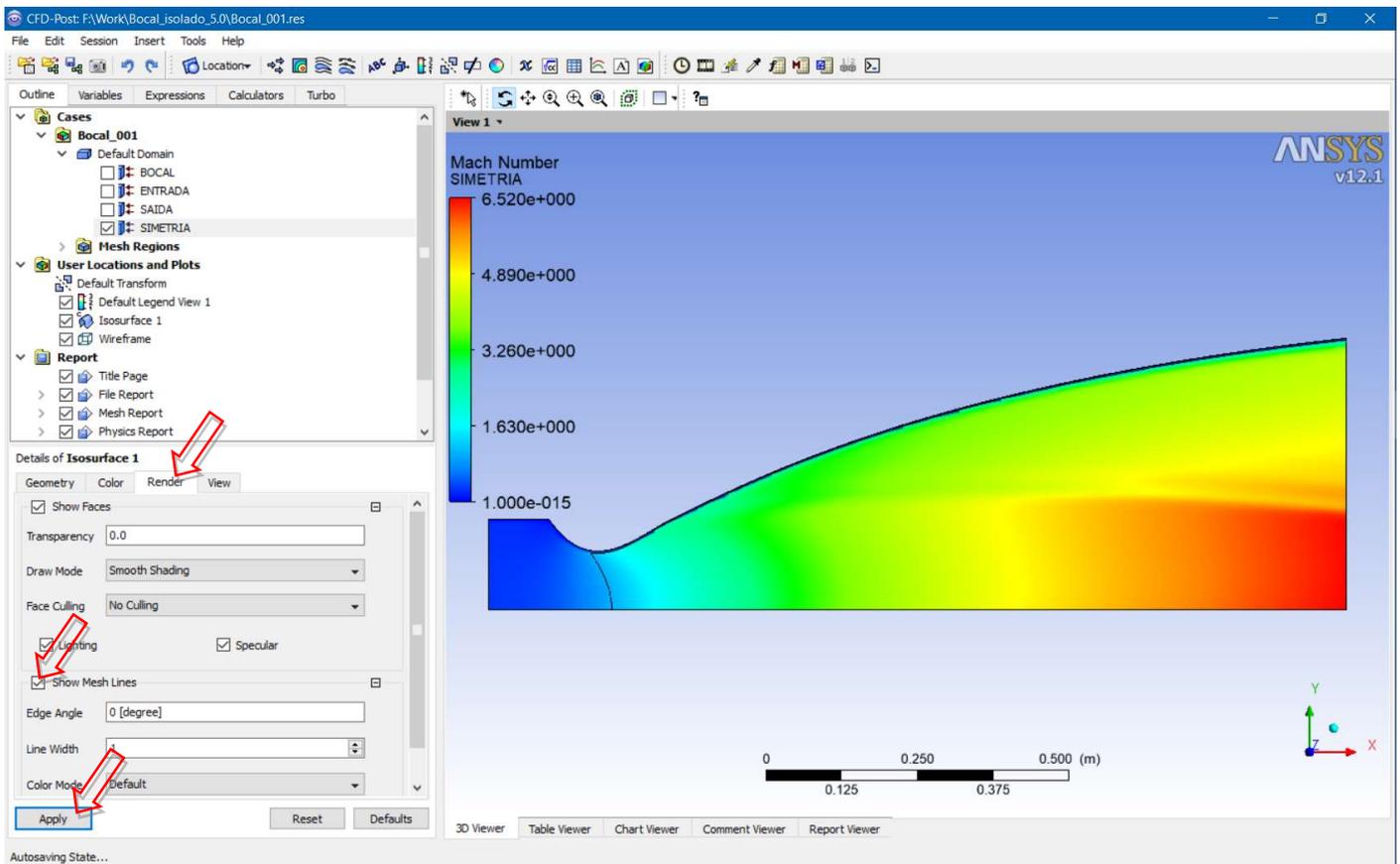
Usando a “Function Calculator” é possível obter esse valor médio. O valor de 4.8 já bem mais próximo de 5 e esperado que fosse mais baixo já que o bocal foi cortado em 60%.



Existe uma infinidade de dados que podem ser explorados nessa análise dos resultados e pouca coisa está sendo mostrada nesse tutorial.

Uma outra característica esperada é que o Mach na garganta seja igual a 1. Uma maneira de visualizar isso é criar uma isosuperfície.





De fato a linha com Mach 1 está na garganta mas não é uma linha reta. É isso mesmo que acontece na realidade.