



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
HidroUFF – Laboratório de Hidráulica

Disciplina: Fenômenos de Transporte

PRÁTICA CFD:

Determinação do coeficiente de arrasto por CFD

Tutorial elaborado por Renan Sandre
Atualizado por Matheus Lessa (2022)
Atualizado por Gabriel F. Carneiro (2023)

Professores: Elson Antonio do Nascimento (Depto. Eng. Civil)
Gabriel de Carvalho Nascimento (Depto. Eng. Agrícola e Meio Ambiente)
Malú Grave (Depto. Eng. Civil)

Introdução

O intuito desta prática é prover um primeiro contato à resolução de problemas de fenômenos de transporte via métodos numéricos, especificamente por meio da utilização de **Fluidodinâmica Computacional** (CFD - *Computational Fluid Dynamics*).

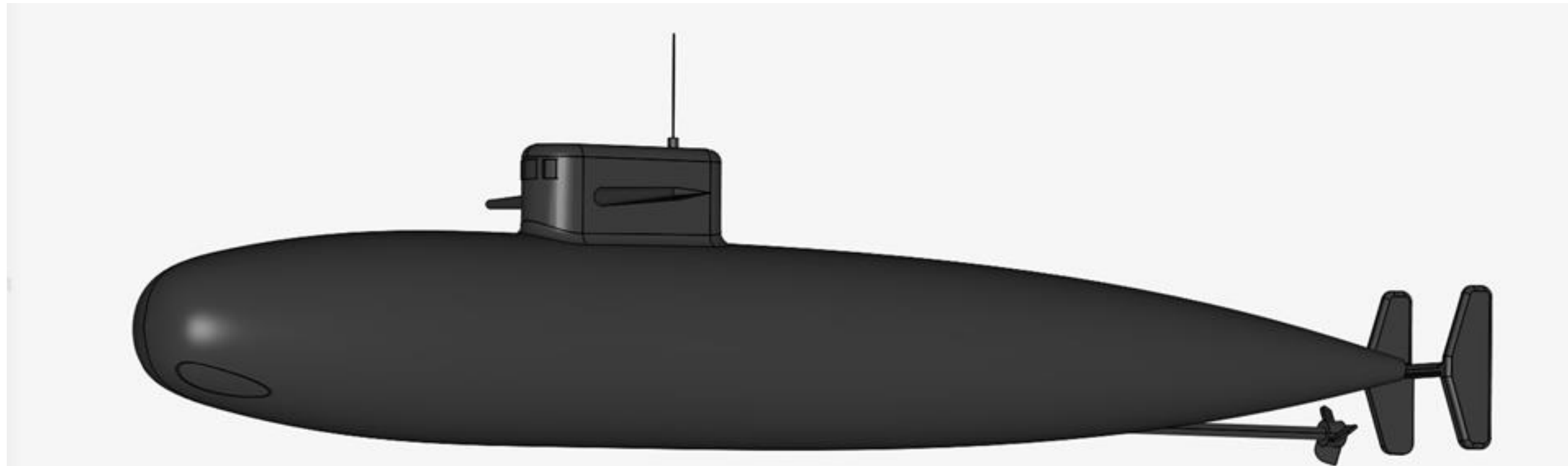
Ao final da atividade, você terá uma noção do que é CFD, como se utiliza, um tipo de problema que pode solucionado e resultados obtidos. Ressalta-se que é um tema complexo e, para uso comercial ou acadêmico, é exigido um conhecimento mínimo teórico, além do conteúdo ministrado em FENTRAN, e capacitação em algum software.

Será utilizado o Software **SimScale**, que é gratuito (com limitações) e funciona online, ou seja, não é exigida capacidade de processamento do seu computador para gerar as simulações. Nosso objetivo é analisar o perfil de velocidade e pressão ao longo do escoamento ao redor de um submarino e, posteriormente, calcular o coeficiente de arrasto.

Cálculo da força de arrasto em modelo de submarino

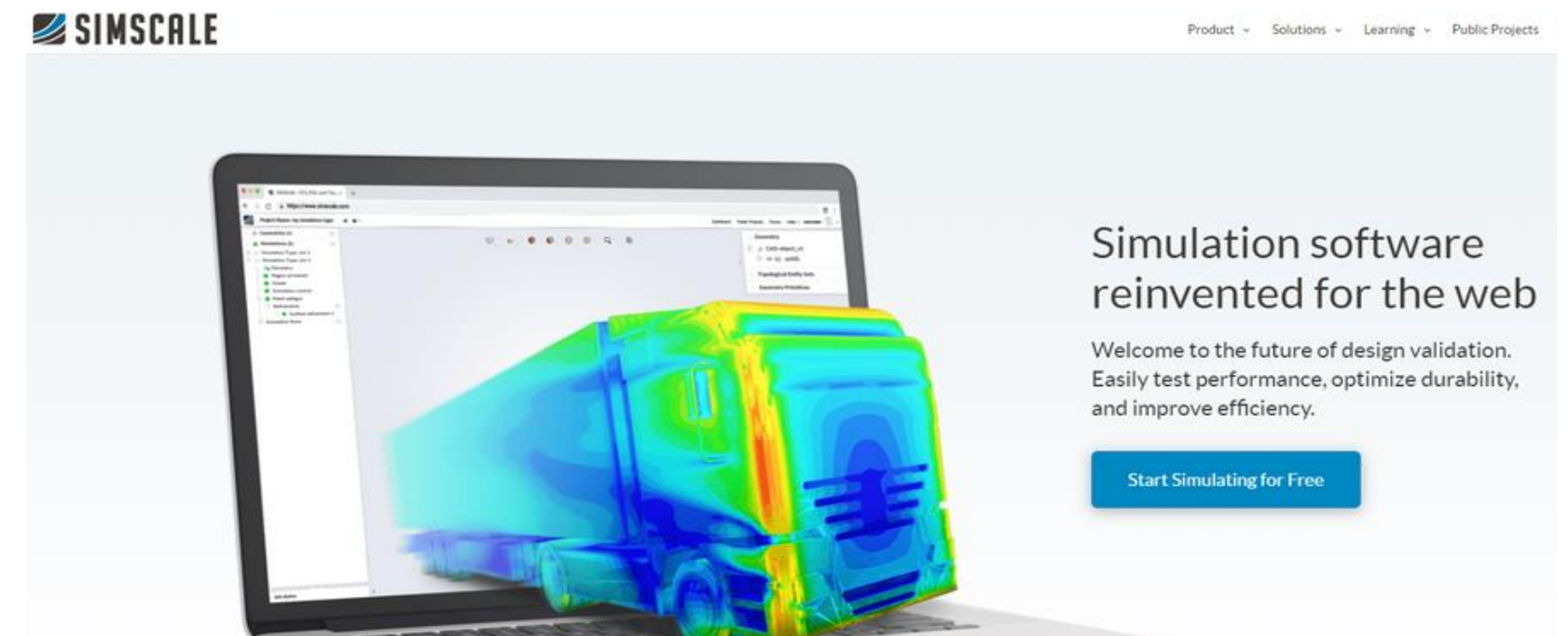
Até o momento, a única geometria disponível para esta prática é a ilustrada abaixo (submarino). Baixe o arquivo (.step) no link indicado no Moodle e salve-o em um diretório conhecido do seu computador.

Também será necessário verificar qual velocidade está atribuída ao seu nome, na lista também disponibilizada no Moodle.



Acessando o site do SimScale

- Acesse o site: simscale.com
- Clique em **Start Simulating for Free** e crie um perfil.
 - Na mensagem que será enviada para seu email, clique em **Activate Account**.
 - Na página que abrirá:
 - *username*: escolha um nome de usuário
 - *Company/Organization*: UFF
 - Marque a opção “I agree...”
 - Clique em **Next**
 - Na página seguinte, escolha as opções que desejar e clique em **Next**
 - Na terceira página, escolha **Start Simulating for Free**
 - Clique no canto superior esquerdo, em SIMSCALE e, depois, em **Start Simulating Now**
 - Clique em **New Project**



Criando o projeto

Create New Project ×

Project Title*
FENTRAN - Prática 5

Make private? ☐ [Upgrade my plan](#)

Project Description*
Cálculo do coeficiente de arrasto em um submarino.

Choose a category
Learning & Teaching ▼

Add a tag 0/12

✓ Advanced Settings

Create project

Na janela que abrirá (*Create New Project*):


- *Project Title*: **UFF_FENTRAN - AP1 – Nome do Aluno**
- *Project description*: Aula prática 1 de modelagem CFD, nome do aluno
 - Category: *Learning & Teaching*
 - Add a tag: **FENTRANUFF**
 - Clique em ***Create project***

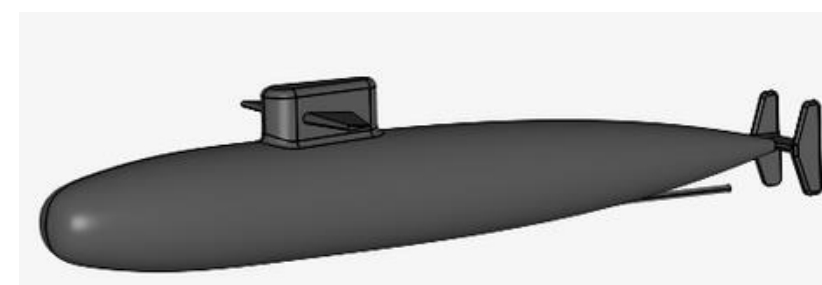
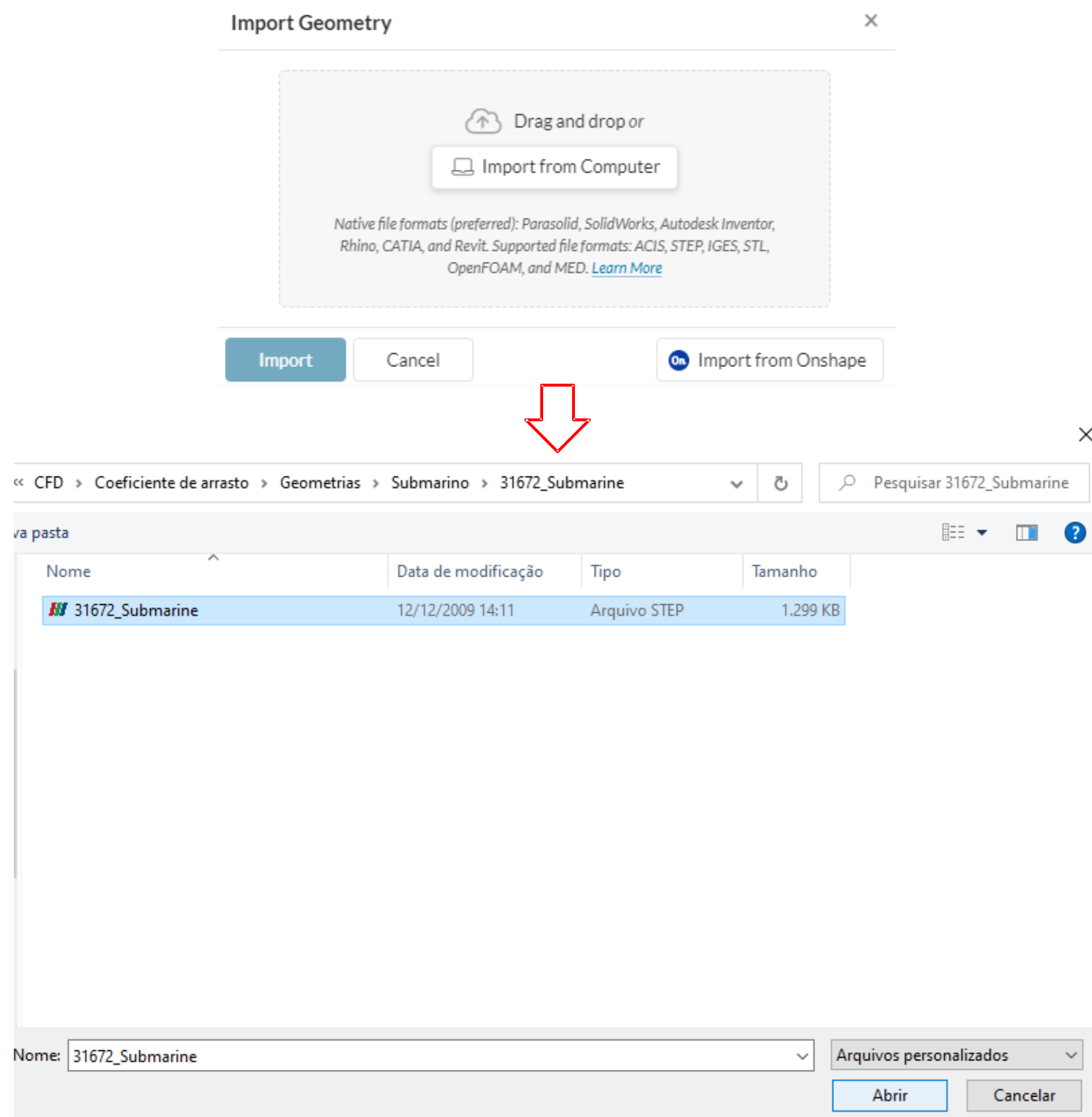
A partir de agora, serão abordadas as questões relativas à simulação propriamente dita.

Preste muita **atenção** a cada passo realizado e certifique-se de estar seguindo corretamente os procedimentos.

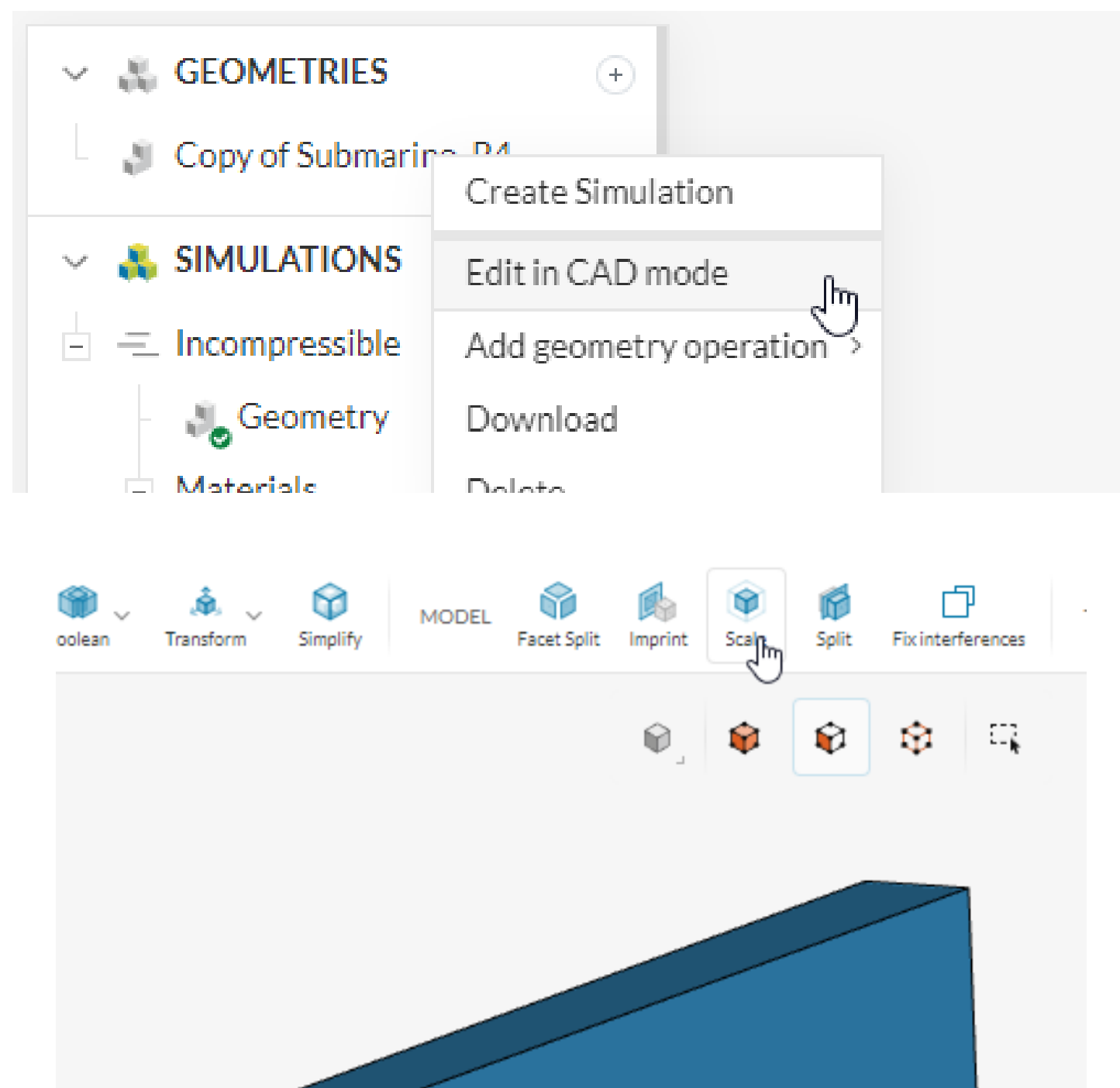
Pré-processamento – importando a malha

Na janela que abrirá (*Import Geometry*):

- Arraste e solte o arquivo com a geometria escolhida e solte na área delimitada por uma linha tracejada (*Drag and drop or*) ou clique nessa área e encontre o caminho onde o arquivo foi salvo no seu computador.
- Clique em ***Import***.
- Aguarde até que o processo finalize (*Uploading, Importing e Post-processing*).
- Na nova janela que foi aberta (*Submarino R4*), confirme a ação . Então, você conseguirá ver a imagem da geometria escolhida (figura abaixo).



Pré-processamento – ajuste de escala



No quadro esquerdo da tela, dentro do grupo

GEOMETRIES:

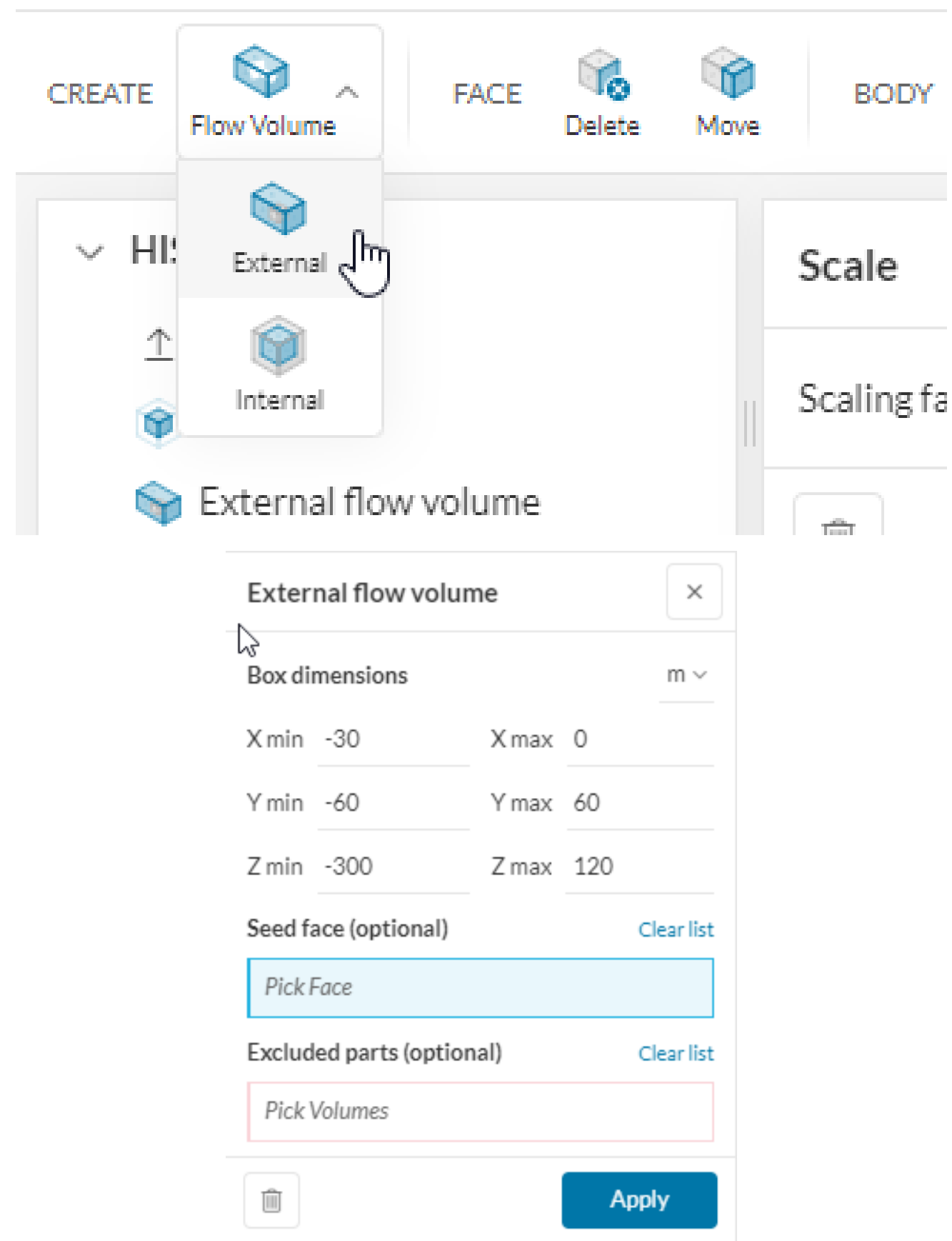
Será necessário fazer um ajuste de escala para que a geometria tenha um tamanho correspondente à realidade

- Passe o mouse pelo item Submarino até que apareça um ícone circular com três traços horizontais



- Clique nesse ícone, depois em ***Edit in CAD mode*** e irá abrir um local de edição com comandos na horizontal. Vamos procurar e selecionar o comando Scale, assim será aberta uma nova janela onde vamos mudar:
 - Scaling factor: 500
 - Clique em ***Apply*** e estará modificado.

Pré-processamento – domínio fluido



Agora, precisamos criar uma região onde ocorrerá o escoamento, uma “caixa” ao redor da geometria escolhida.

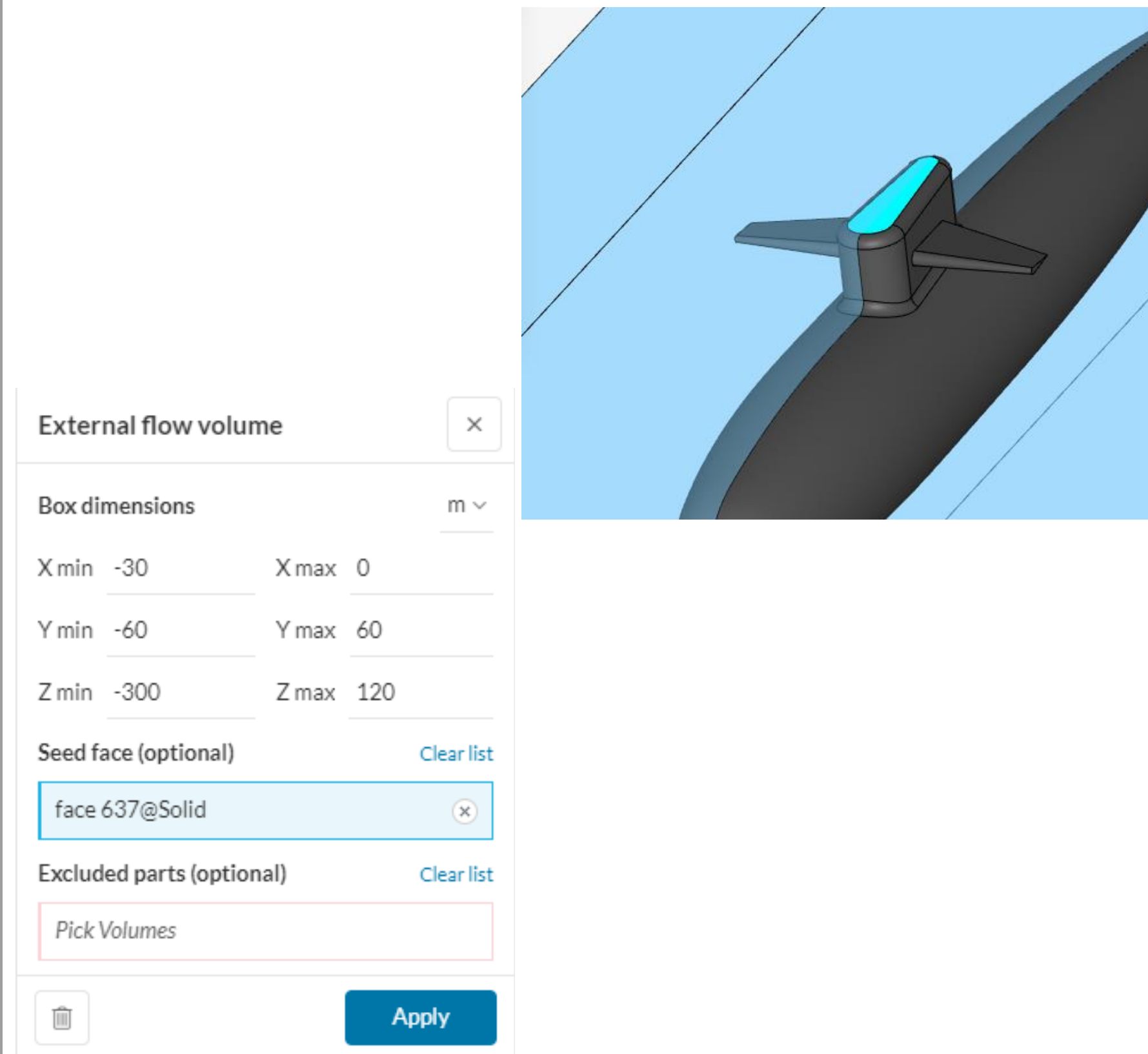
Para não gerar uma simulação demorada, iremos nos ater a uma região de escoamento limitada:

Ainda dentro do **Edit in CAD mode**, vamos selecionar o comando “Flow Volume □ External” e na janela esquerda da tela que abrir, vamos colocar:

- Minimum
 - x: -30 m
 - y: -60 m
 - z: -300 m
- Maximum
 - x: 0 m
 - y: 60 m
 - z: 120 m

(continua no próximo slide)

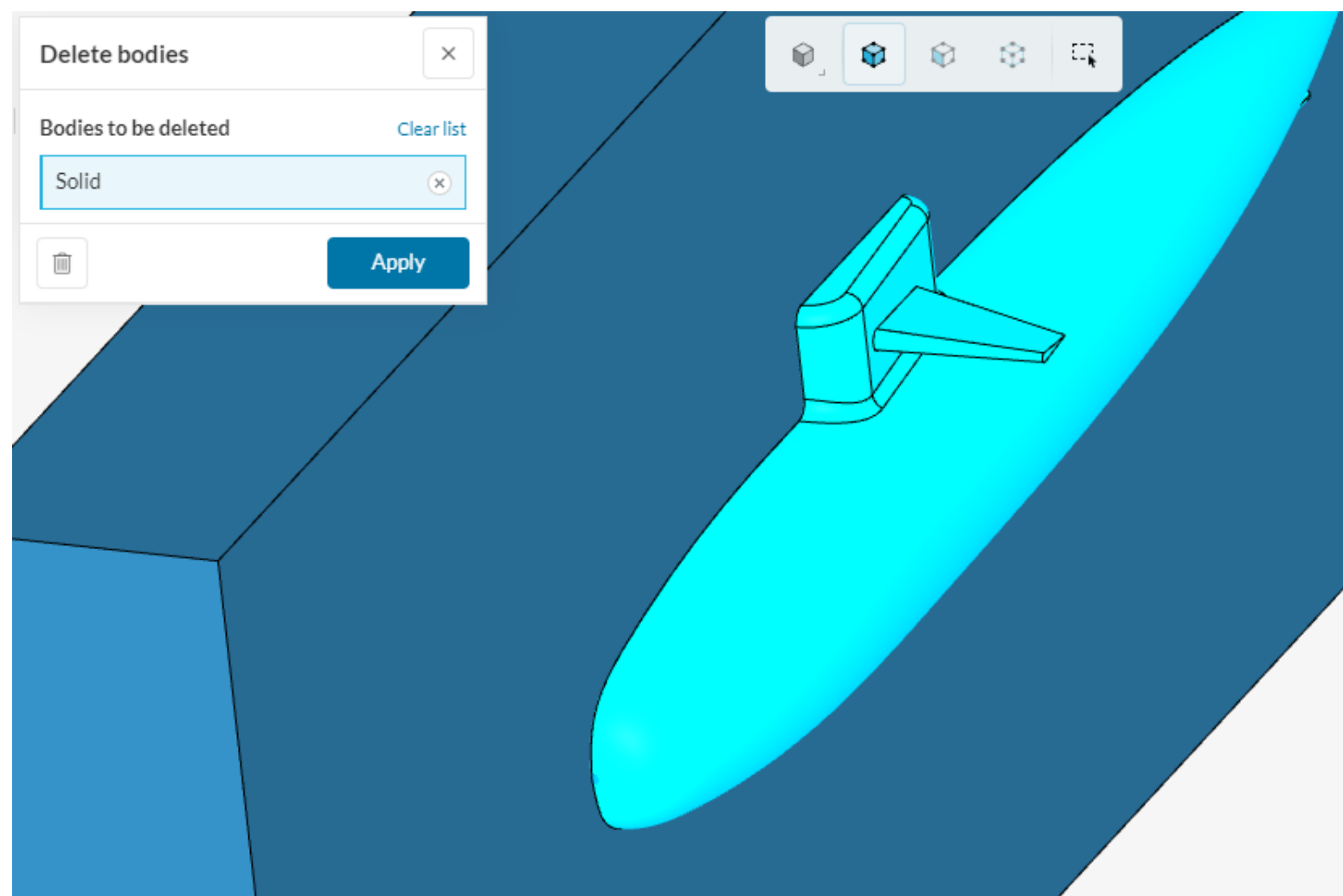
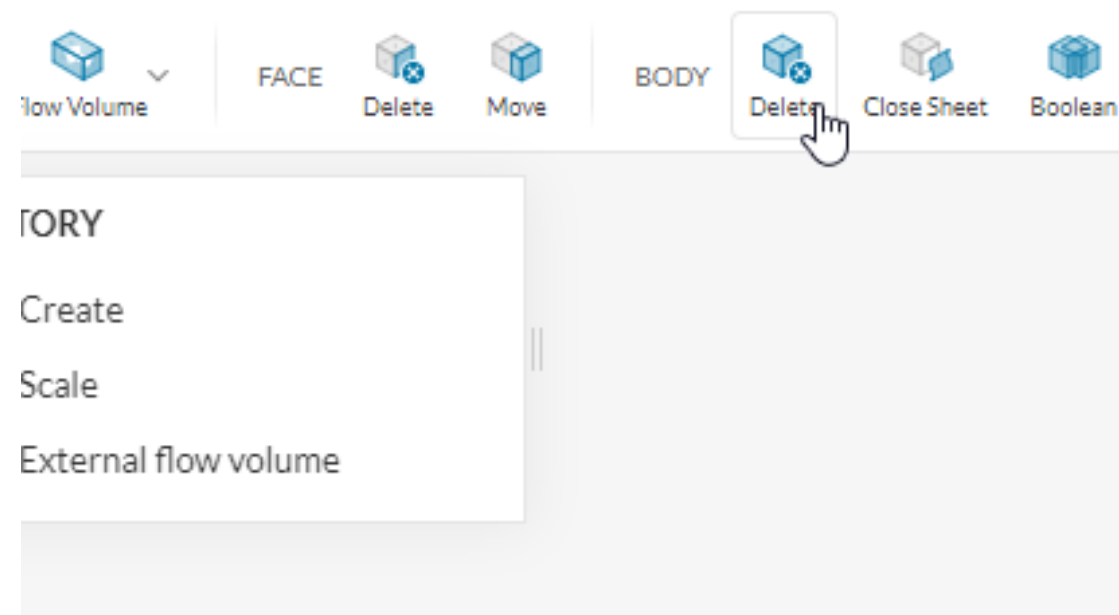
Pré-processamento – domínio fluido



- Ainda na janela “*External Flow Volume*”, **aprenda** a alterar a visualização utilizando:
 - rolagem (scroll) do mouse: zoom
 - ctrl + botão esquerdo: translação
 - botão esquerdo: rotação
- **Movimente** a imagem até que consiga uma visão semelhante à da figura ao lado.
- **Clique** na superfície superior do submarino (destacada na imagem ao lado)
- No quadro *External Flow Volume*, campo **Seed face (optional)**, certifique-se de que a face selecionada tem uma identificação (não é, necessariamente, igual a da imagem ao lado)
- Clique em **Apply** e estará feito.

(continua no próximo slide)

Pré-processamento – domínio fluido

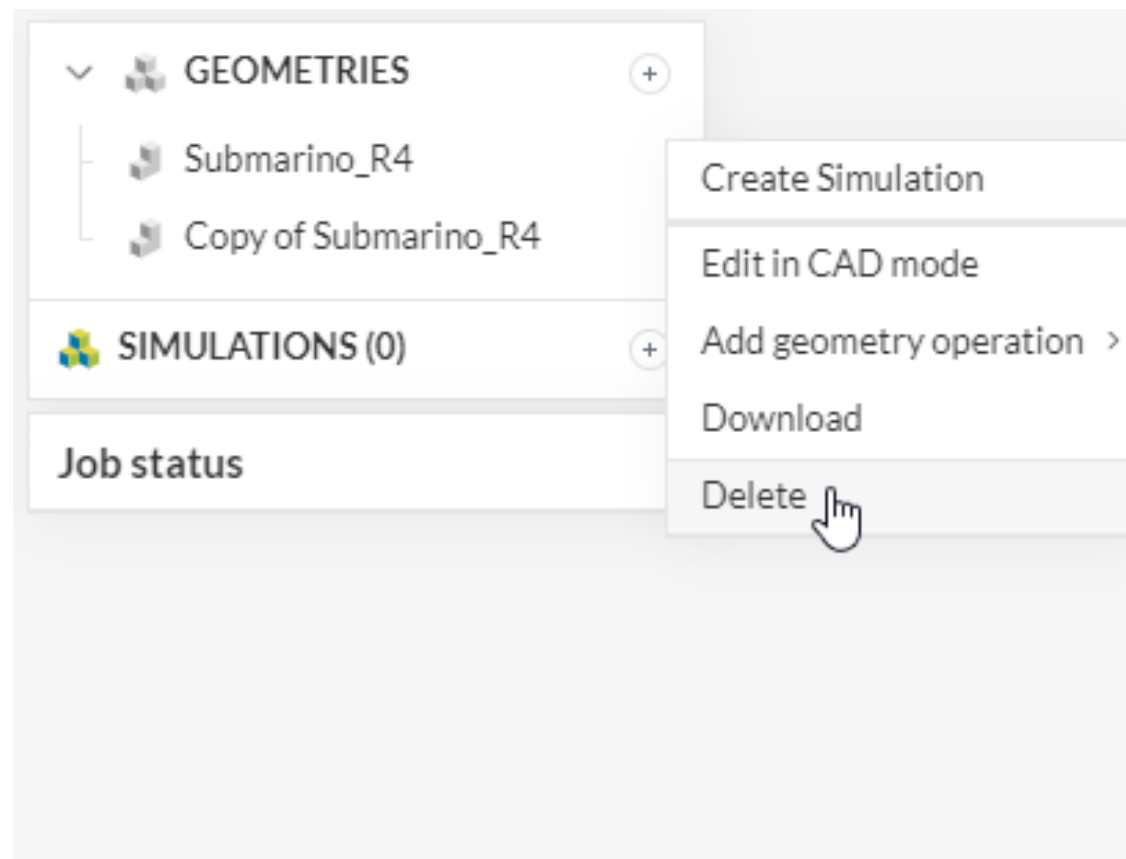


Agora que temos nosso volume de fluido (que é o nosso objeto de estudo) e o contorno dele à superfície do submarino, precisamos que o SimScale enxergue somente o fluido de estudo. Vamos deletar nossa cápsula de submarino sólido:

- Ao lado DIREITO de **Body**, vamos selecionar a opção “*Delete*” e escolher um corpo a ser deletado.
- **Clique** na superfície do submarino (destacada na imagem ao lado)
- Clique em ***Apply*** e estará feito.


Temos agora o volume do fluido com o contorno do submarino! Finalizadas as etapas, agora só precisamos exportar (ícone “*export*”) !

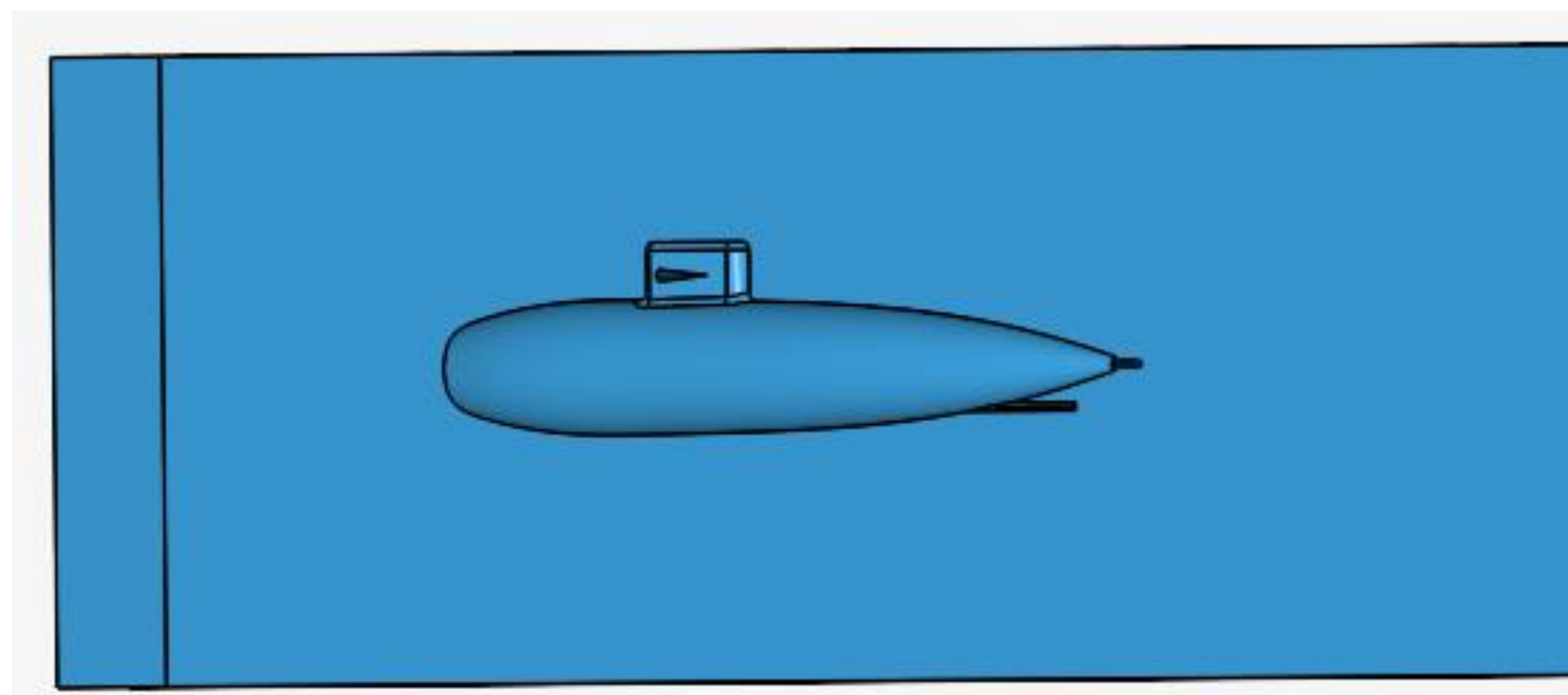
Pré-processamento – domínio fluido



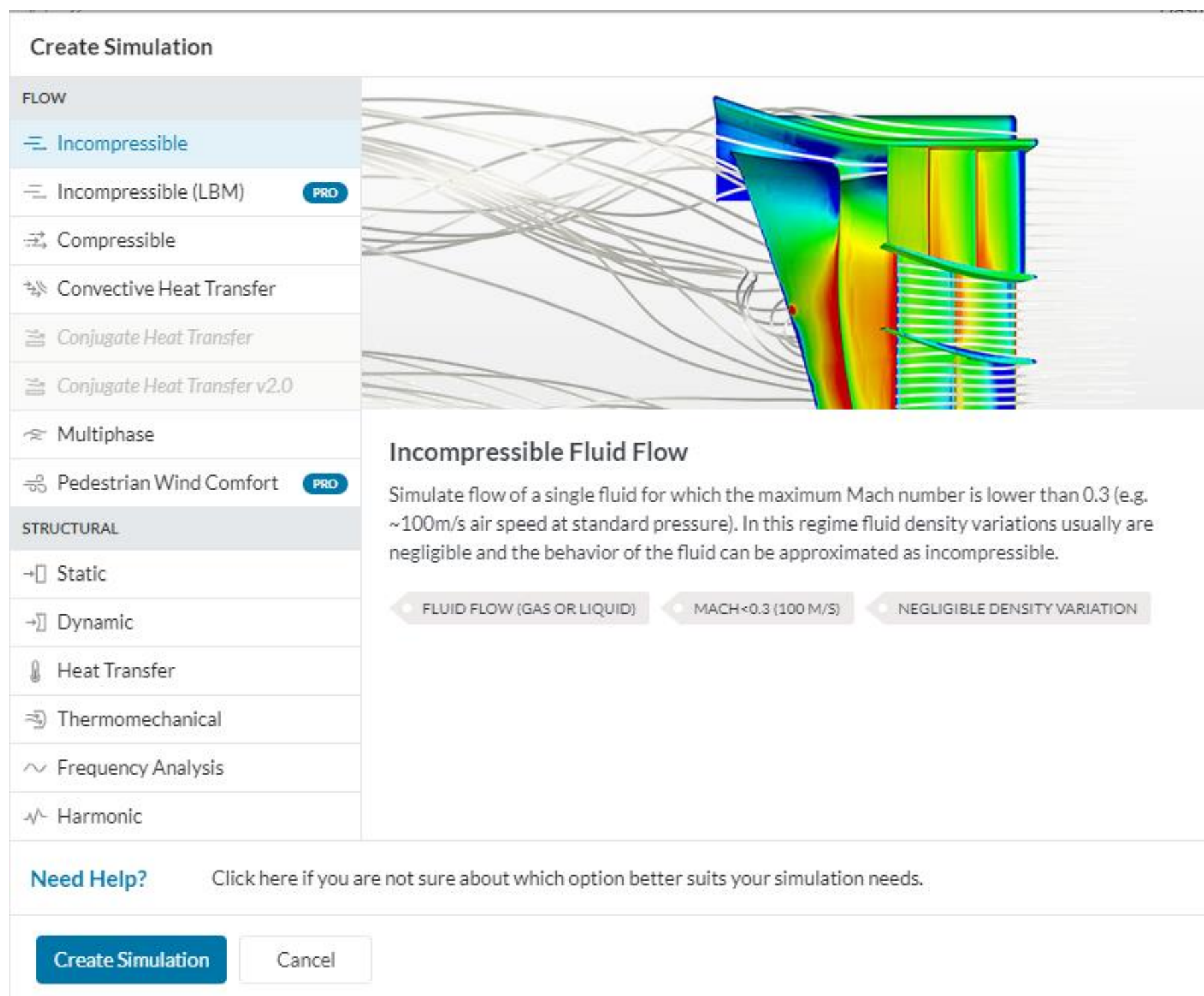
Voltando para a janela anterior, vamos ter duas Geometrias de Submarinos, porém a que nos interessa é somente a “*Copy of Submarino_R4*”!

Passando o mouse no “**Submarino R4**” e selecionando o botão com três traços horizontais e escolha “*Delete*” para excluir a geometria que não foi editada!

Assim vamos ter somente a geometria que nos interessa, igual a imagem ao lado! 




Pré-processamento – importando a malha




Clicando em “Copy of Submarino R4”, na janela que abrir, selecione o botão *Create Simulation*:

- Abrindo outra janela, selecione a opção ***Incompressible***. Leia o texto que aparece e verifique se a condição para que o escoamento possa ser considerado incompressível é a mesma que foi mencionada na aula teórica.
- Clique em ***Create Simulation***

Pré-processamento – modelo de turbulência e algoritmo

Incompressible	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Analysis	 Incompressib...	
Turbulence model	k-omega SST	▼
Time dependency	Steady-state	▼
Algorithm	SIMPLE	▼
Passive species	0	▼

- Selecione, como modelo de turbulência o ***k-omega SST***.
- Quanto ao solver utilizado, será utilizado o algoritmo **SIMPLE** (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations). Tal método é baseado em iterações para correções de pressão.
- Clique no ícone de confirmação 

Pré-processamento – fluido

Material

Air	Viscosity model	Newtonian	▼
Argon			
Carbon dioxide			
Crude oil	(v) Kinematic viscosity	9.338e-7	m²/s
Gaseous R-134a	(ρ) Density	997.3	kg/m³
Gasoline			
Hydrogen			
Liquid R-134a			
Lubricating oil SAE 30 120C			
Lubricating oil SAE 30 20C			
Nitrogen			
Seawater 3.5 pc saline			
Sulphur dioxide			
Water			

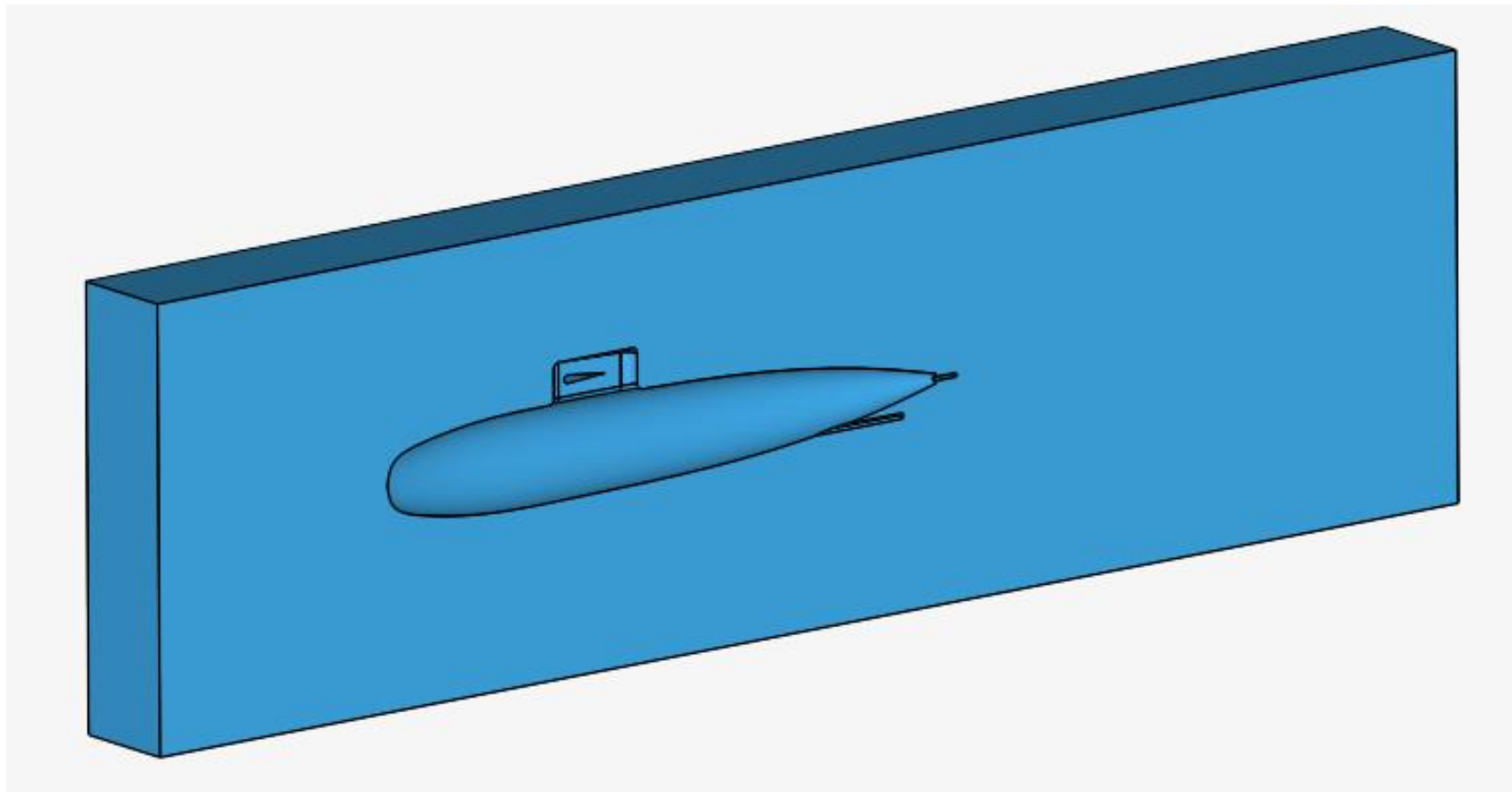
Apply

Cancel

No quadro lateral esquerdo, dentro do grupo SIMULATIONS --> Incompressible:

- Clique em **Materials**
- Selecione **Water**
- Clique em **Apply**

Pré-processamento – condições de contorno (Boundary Conditions).

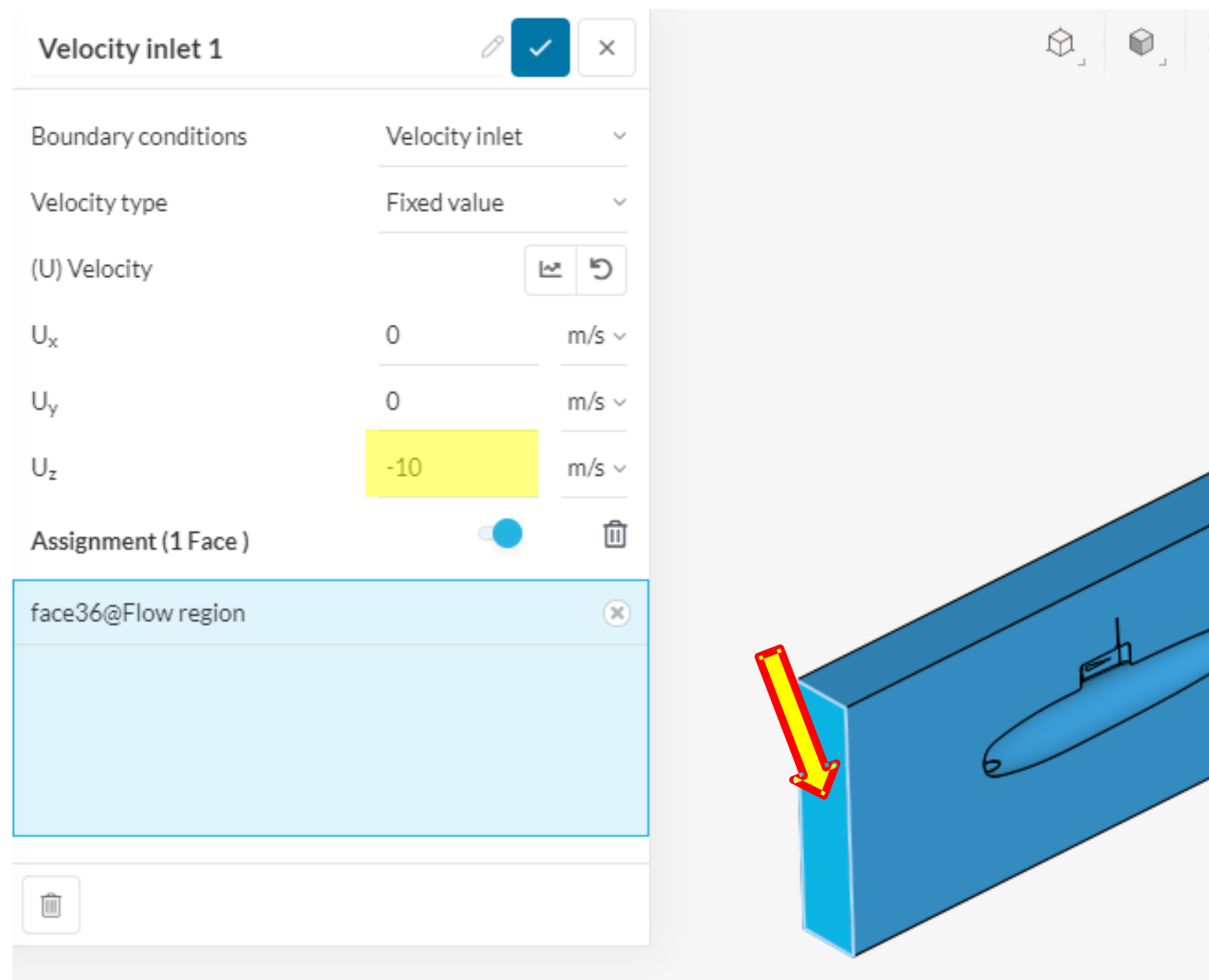


Um passo fundamental para resolução de um sistema de equações é a definição das condições de contorno (Boundary Conditions).

Consideraremos as seguintes condições de contorno:


- entrada do fluido (*inlet*), com velocidade especificada
- saída do fluido (*outlet*), com pressão especificada
- superfície (plano) de simetria
- superfícies de parede (sem entrada nem saída)

Pré-processamento – condições de contorno (entrada)



Vamos começar pela velocidade. Como o eixo Z tem direção contrária a do fluido, devemos estabelecer uma velocidade **negativa** no eixo Z.


No quadro lateral esquerdo, grupo SIMULATIONS:

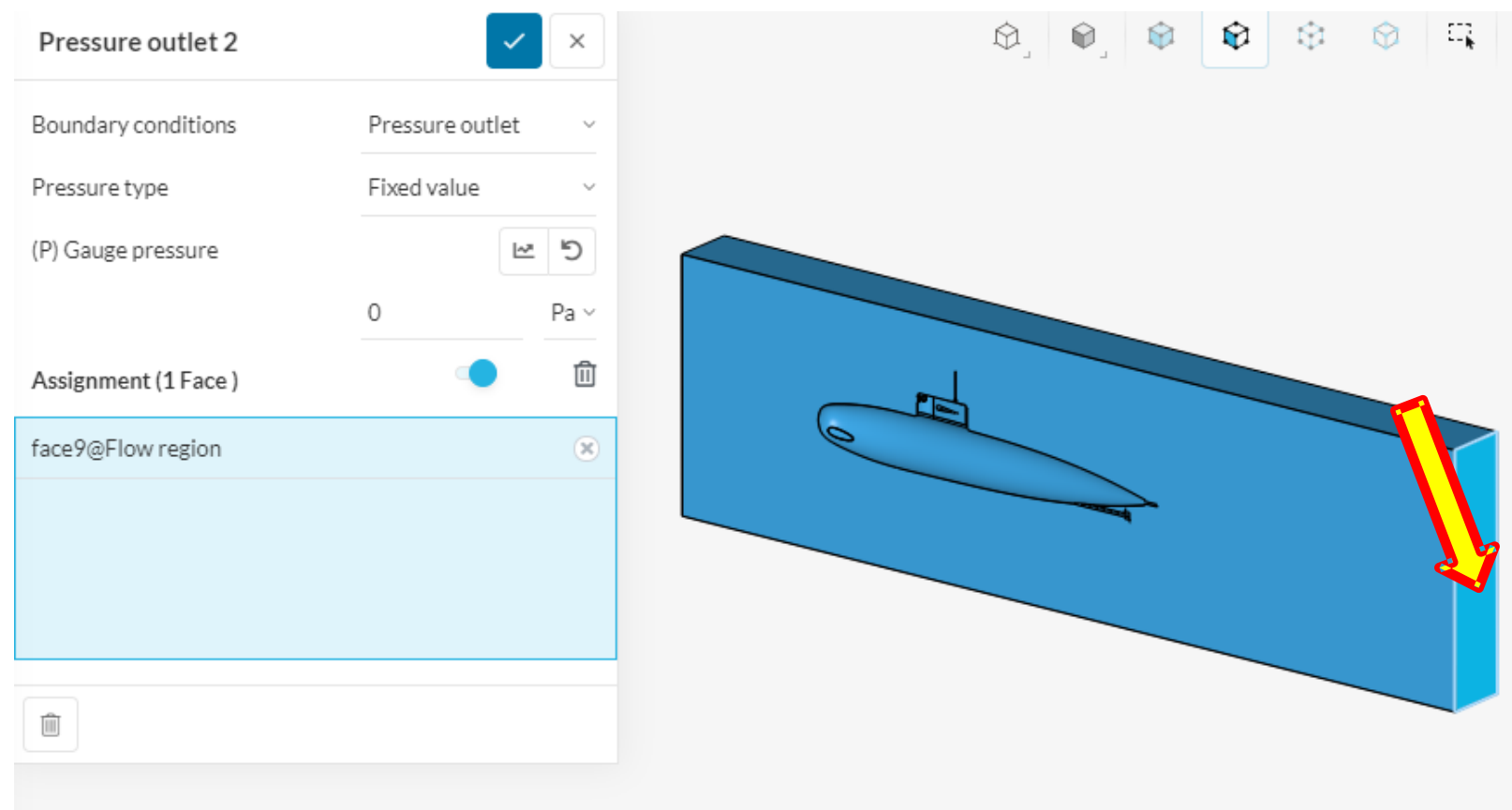
- Clique no item ***Boundary Conditions --> Velocity inlet:***
- **U_z :** coloque o valor de velocidade (**negativo**) associado ao seu nome, conforme a lista fornecida no Moodle
- Clique na face referente à entrada do fluido (destacada na imagem ao lado)
- Clique no ícone de confirmação 

Pré-processamento – condições de contorno (saída)

Em seguida, será definida a condição pressão especificada na face oposta:

No quadro lateral esquerdo, grupo SIMULATIONS:


- Clique no item **Boundary Conditions** (ícone +) --> Pressure Outlet:
- Gire a visualização do modelo e clique a face oposta à anterior (fundo do modelo)
- O campo numérico desta condição de contorno se refere à *gauge pressure*, que significa pressão manométrica. Deixe o valor padrão (zero)
- Clique no ícone de confirmação 

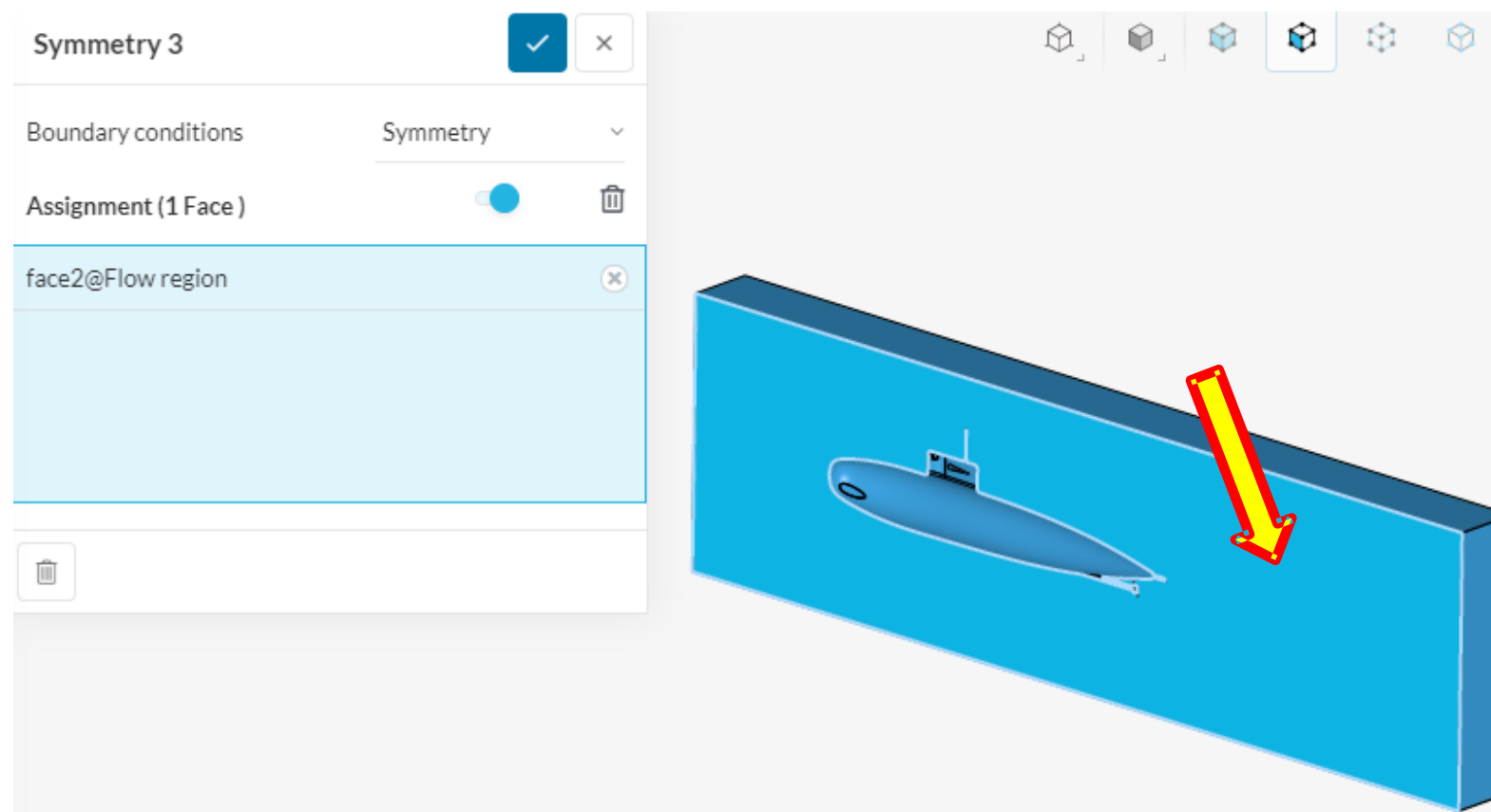


Pré-processamento – condições de contorno (simetria)

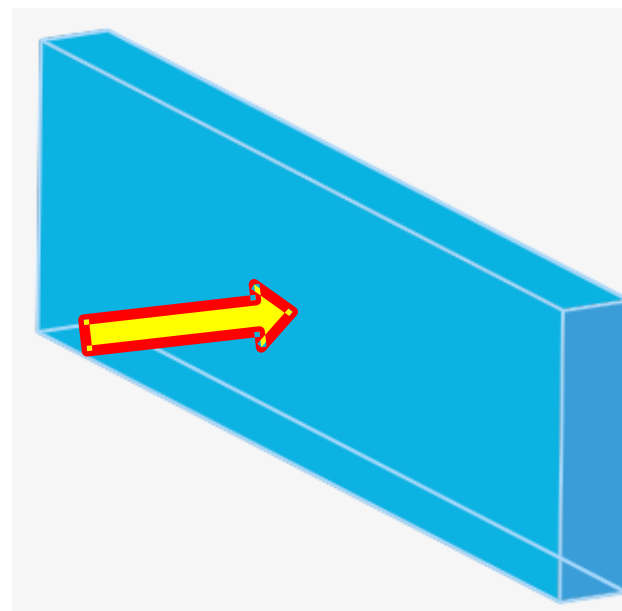
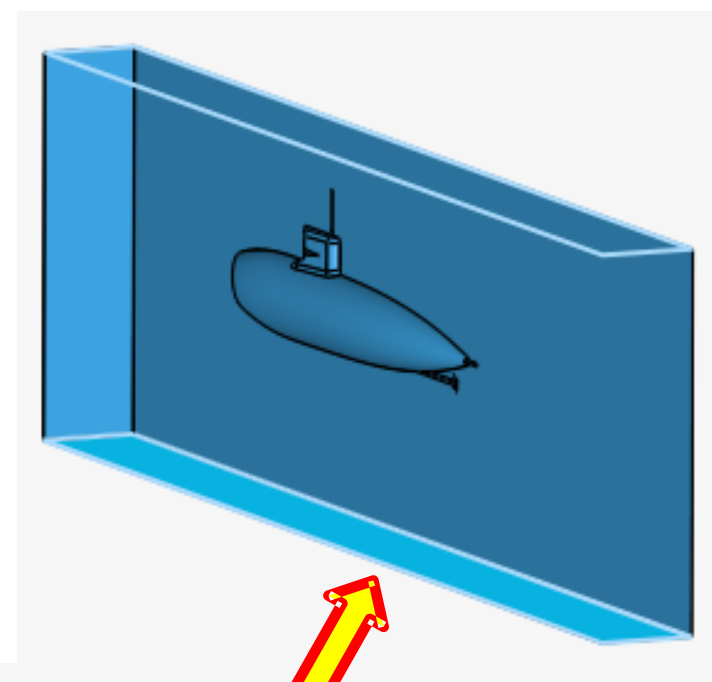
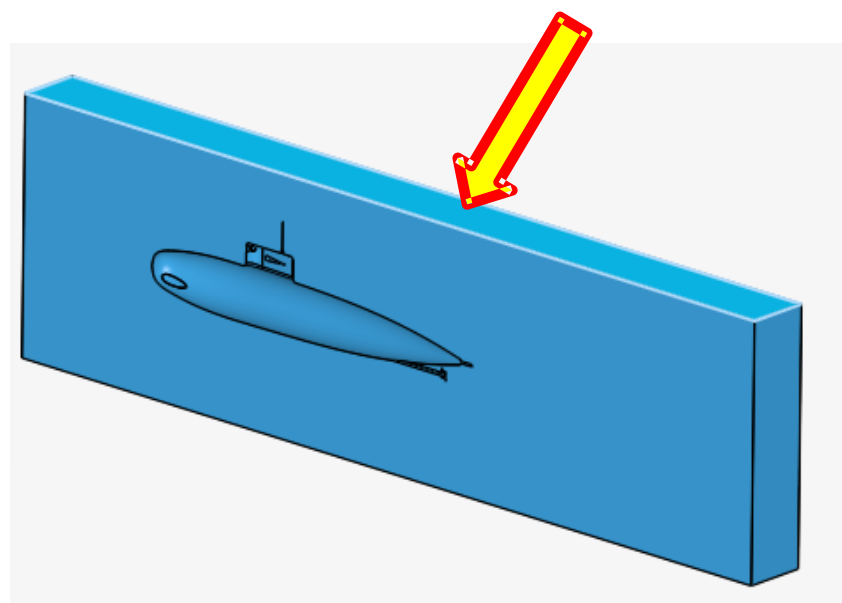
Para reduzir o custo computacional, iremos considerar que há uma simetria no problema estudado.

No quadro lateral esquerdo, grupo SIMULATIONS:

- Clique no item **Boundary Conditions** (ícone +) --> Symmetry:
- Clique na face correspondente ao plano de simetria (figura ao lado)
- Clique no ícone de confirmação 



Pré-processamento – condições de contorno (laterais)

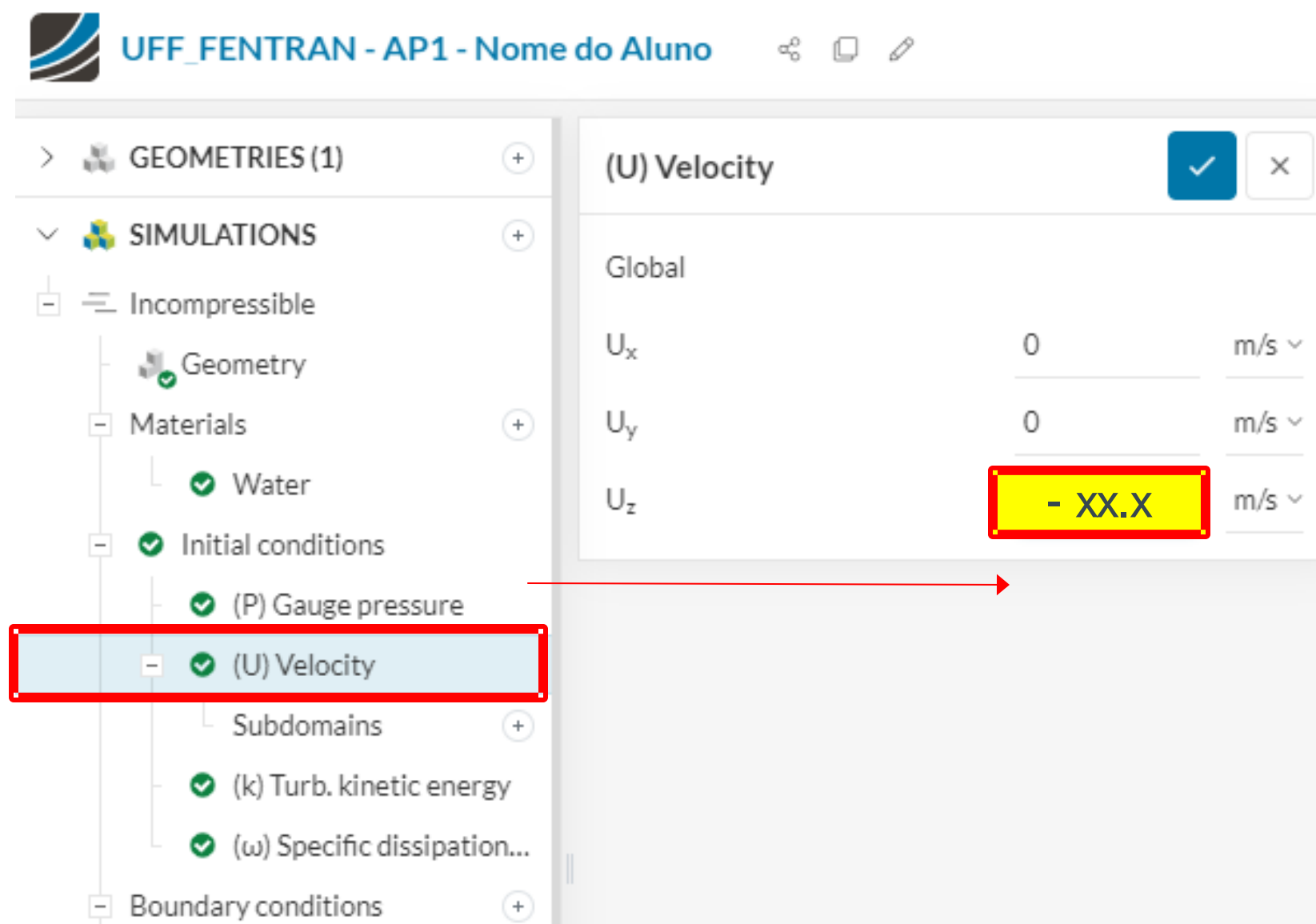


Para os demais contornos externos, iremos considerar paredes (*Wall*), ou seja, sem entrada nem saída de fluido. Adicionalmente, será escolhida a opção *slip*, que significa tensão cisalhante nula.

No quadro lateral esquerdo, grupo SIMULATIONS:


- Clique no item **Boundary Conditions** (ícone +) ☐ --
 - > Wall:
 - (U) Velocity: *Slip*
 - Gire a visualização do modelo e clique nas demais faces externas: superior, inferior e lateral (figura ao lado)
- Clique no ícone de confirmação ☒

Pré-processamento – condições iniciais (velocidade)

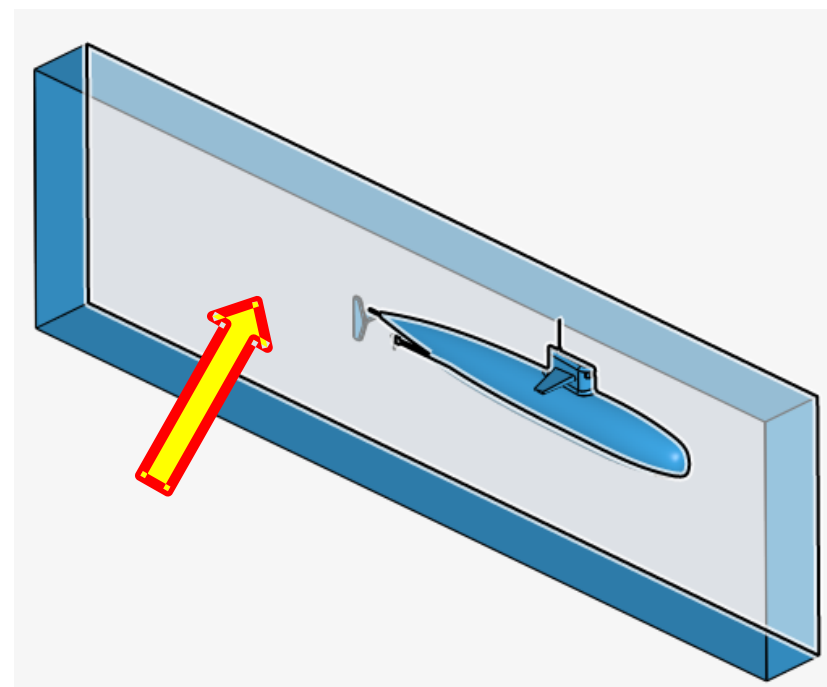
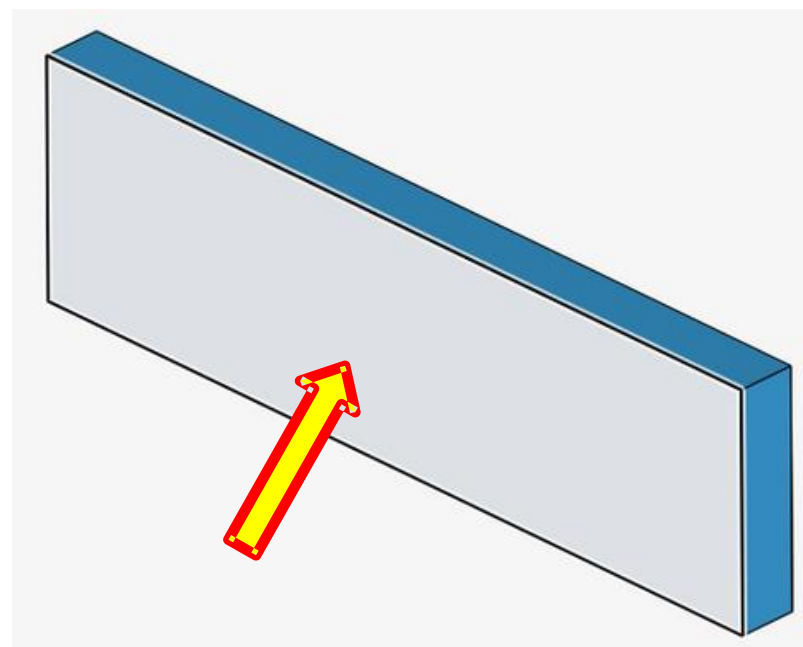


Para facilitar a convergência no processo iterativo de solução, vamos especificar uma velocidade inicial igual à de entrada (*inlet*).

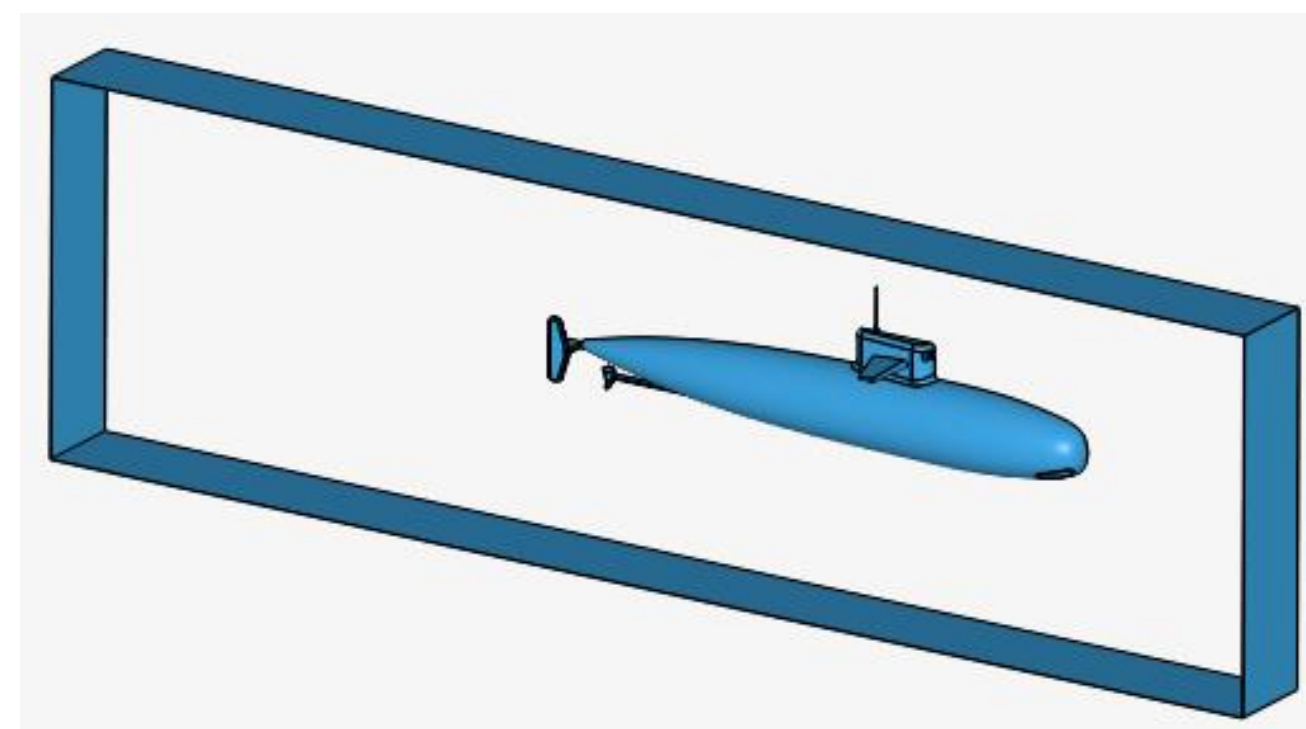
No quadro lateral esquerdo, grupo SIMULATIONS:

- Clique no item ***Initial Conditions --> (U) Velocity***:
- **U_z** : coloque o valor de velocidade (**negativo**) associado ao seu nome, conforme a lista fornecida no Moodle
- Clique no ícone de confirmação 

Pré-processamento (superfície de interesse)

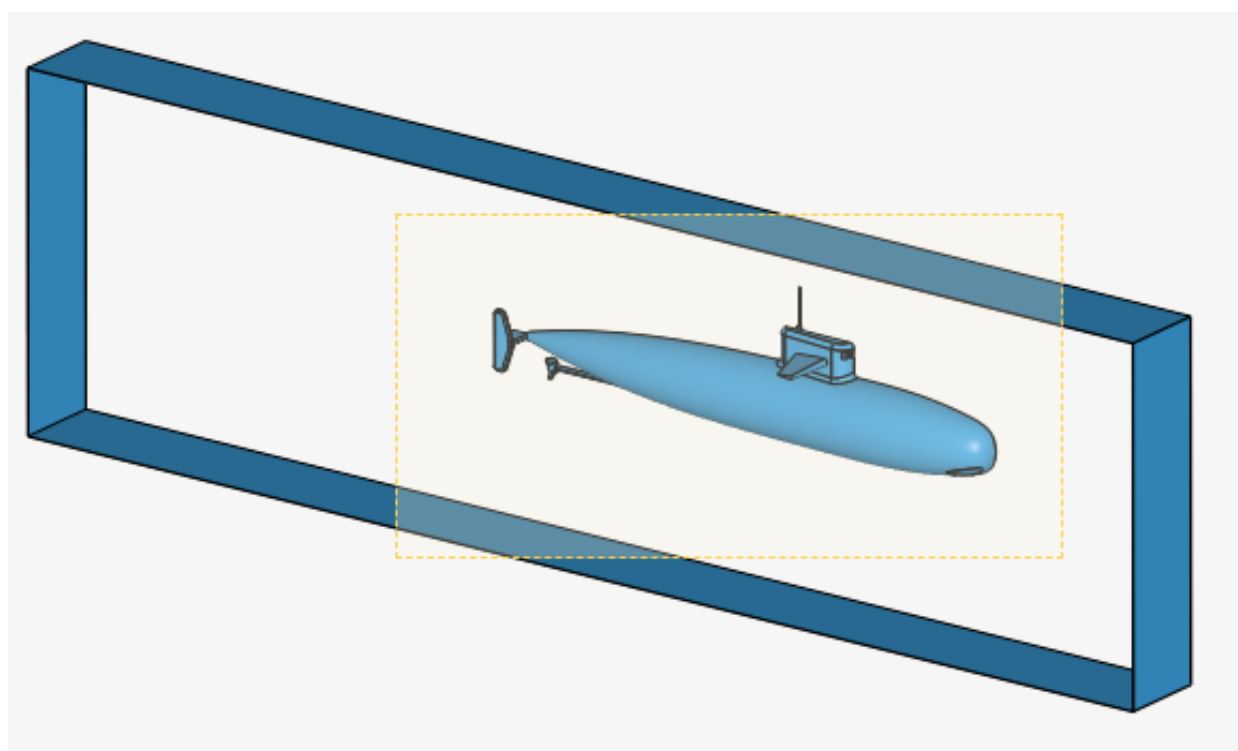
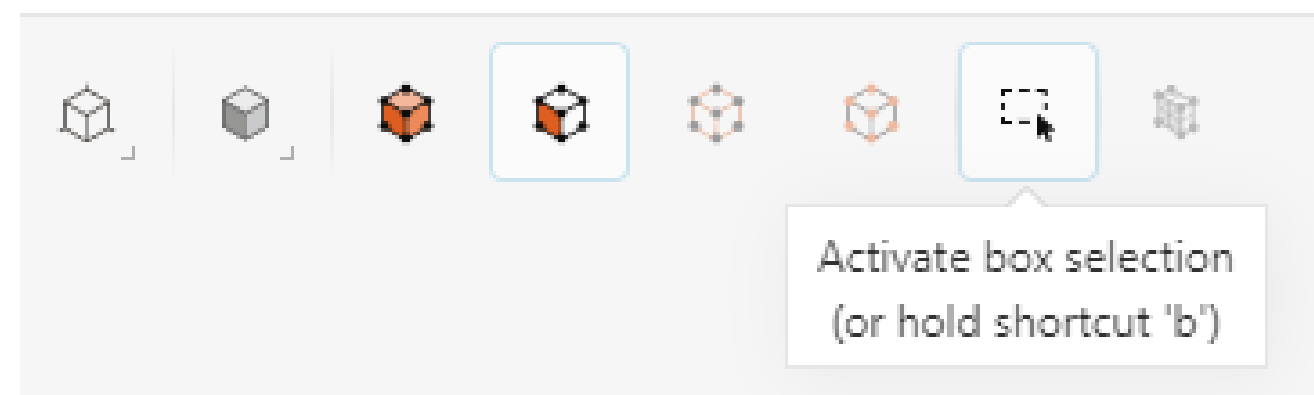


- Clique com o botão direito do mouse na face lateral externa (oposta à face de simetria), conforme a figura ao lado:
- No menu suspenso que aparecerá, clique em **Hide face30@Flow region**, ou na opção como nome mais próximo
- Repita o procedimento anterior para a face de simetria (figura ao lado)
- Esses passos ocultarão as faces lateral e de simetria, restando as faces da figura abaixo

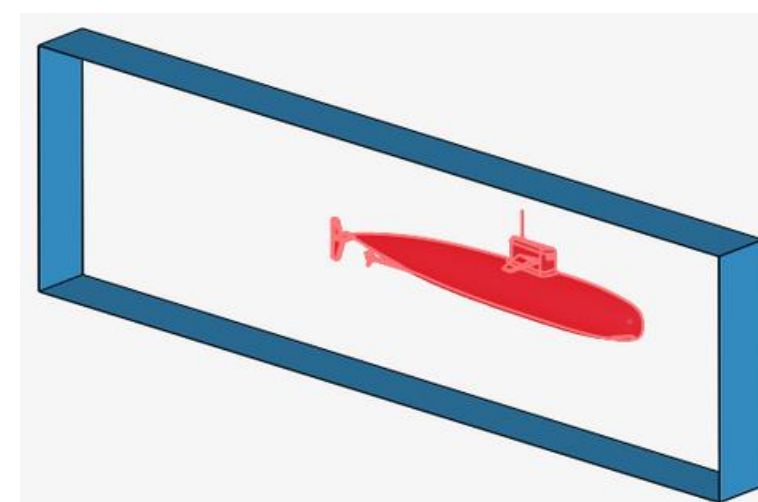


Pré-processamento – superfície de interesse

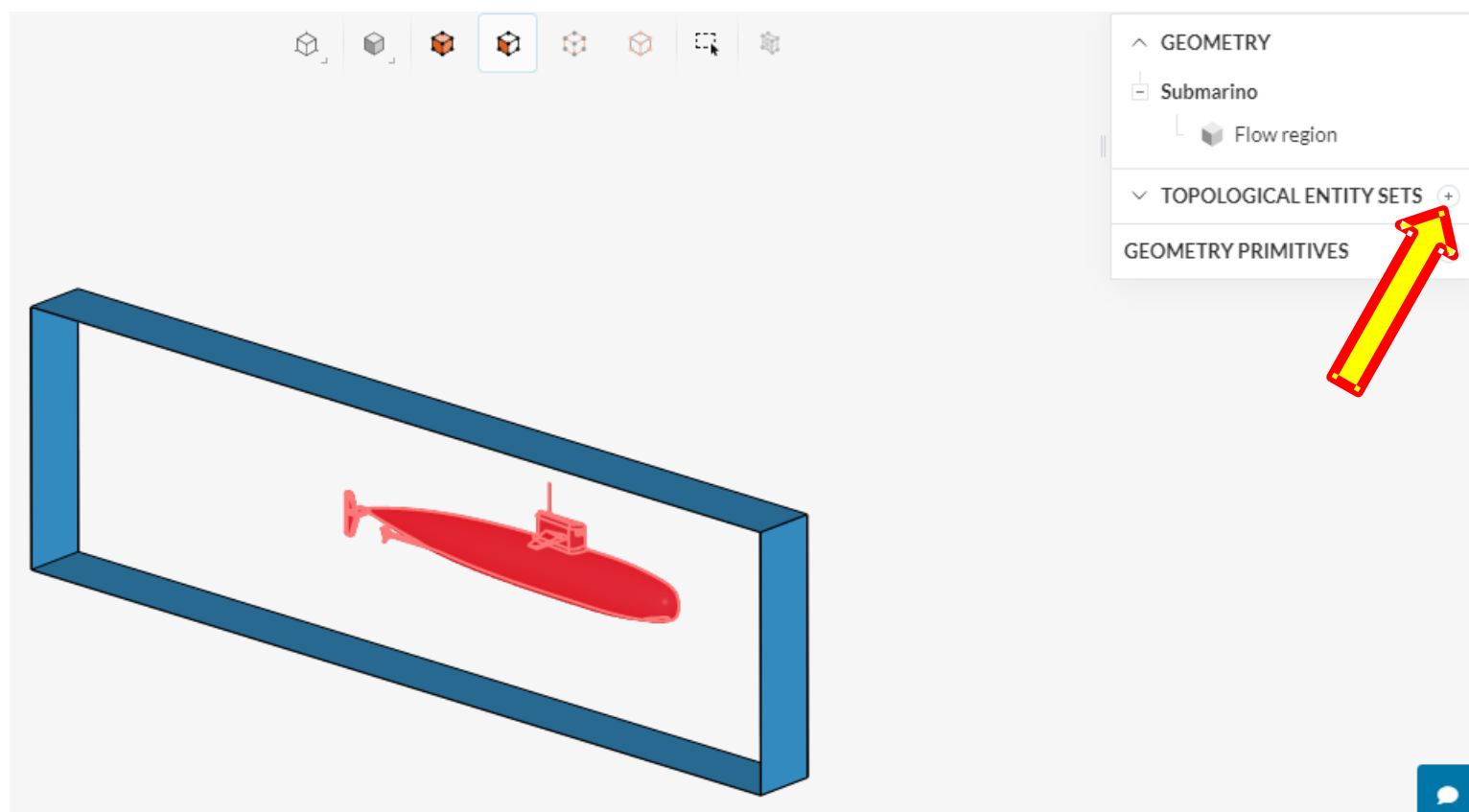
- Nas opções de seleção da parte superior central da tela, clique em **Activate box selection**



- Clique e arraste o mouse, desenhando um retângulo que inclua a geometria de interesse (ex.: submarino)
- Ao soltar o botão do mouse, a superfície do objeto ficará destacada em vermelho, conforme a figura abaixo

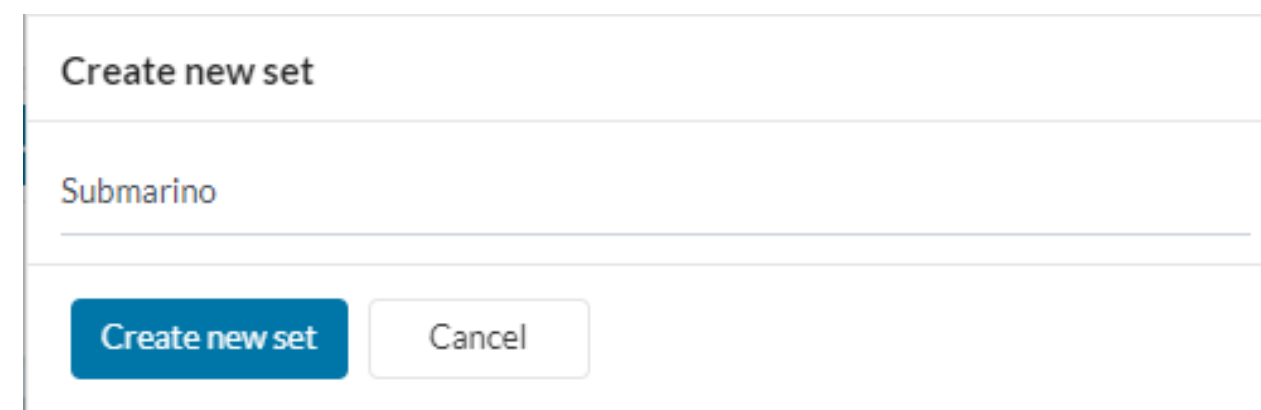


Pré-processamento – superfície de interesse

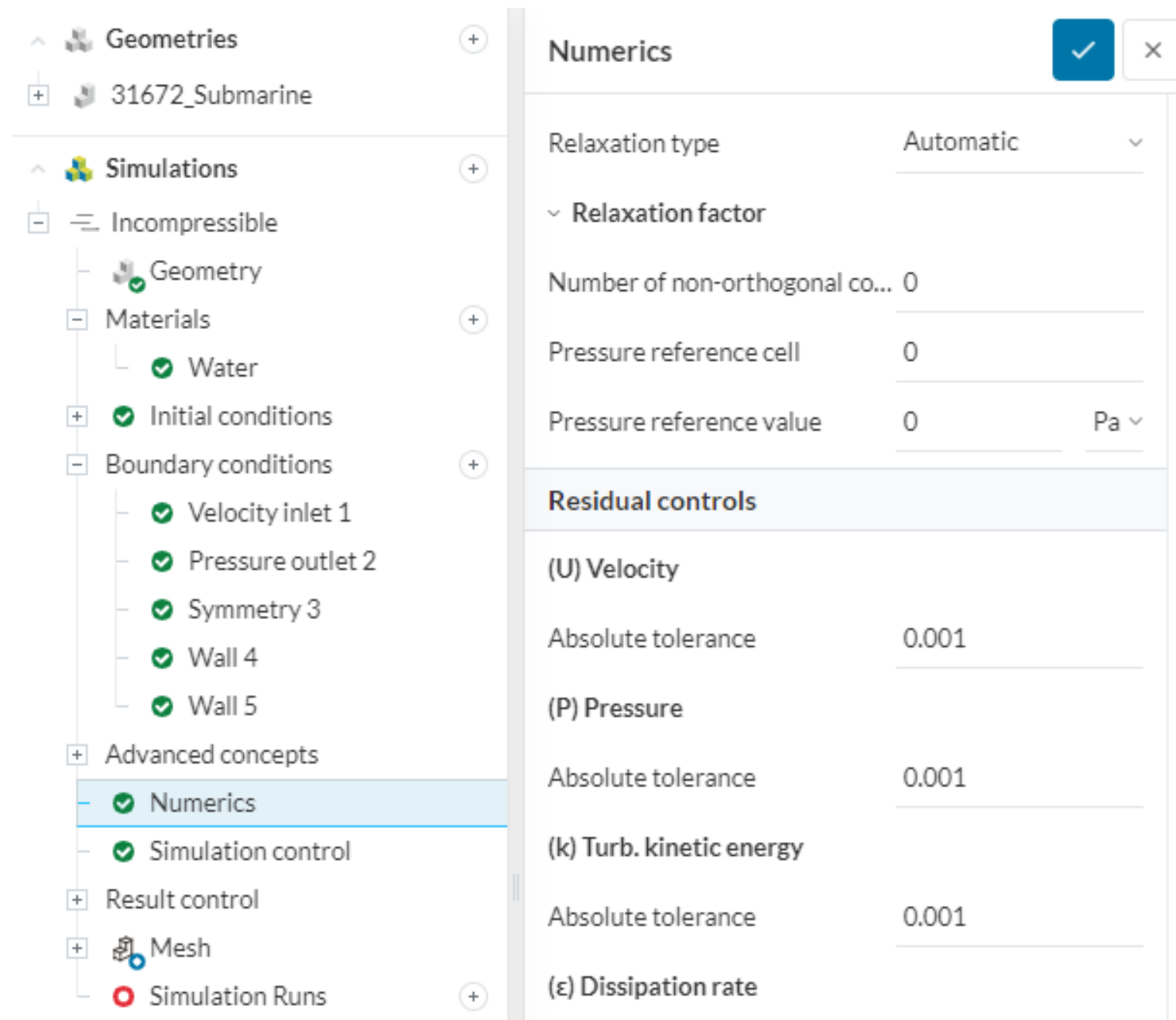


- No canto superior direito, clique em ***Topological Entity Sets*** (ícone +):
 - Defina o nome **Submarino** e clique em ***Create new set***

Pronto, agora podemos dar continuidade às configurações da simulação.

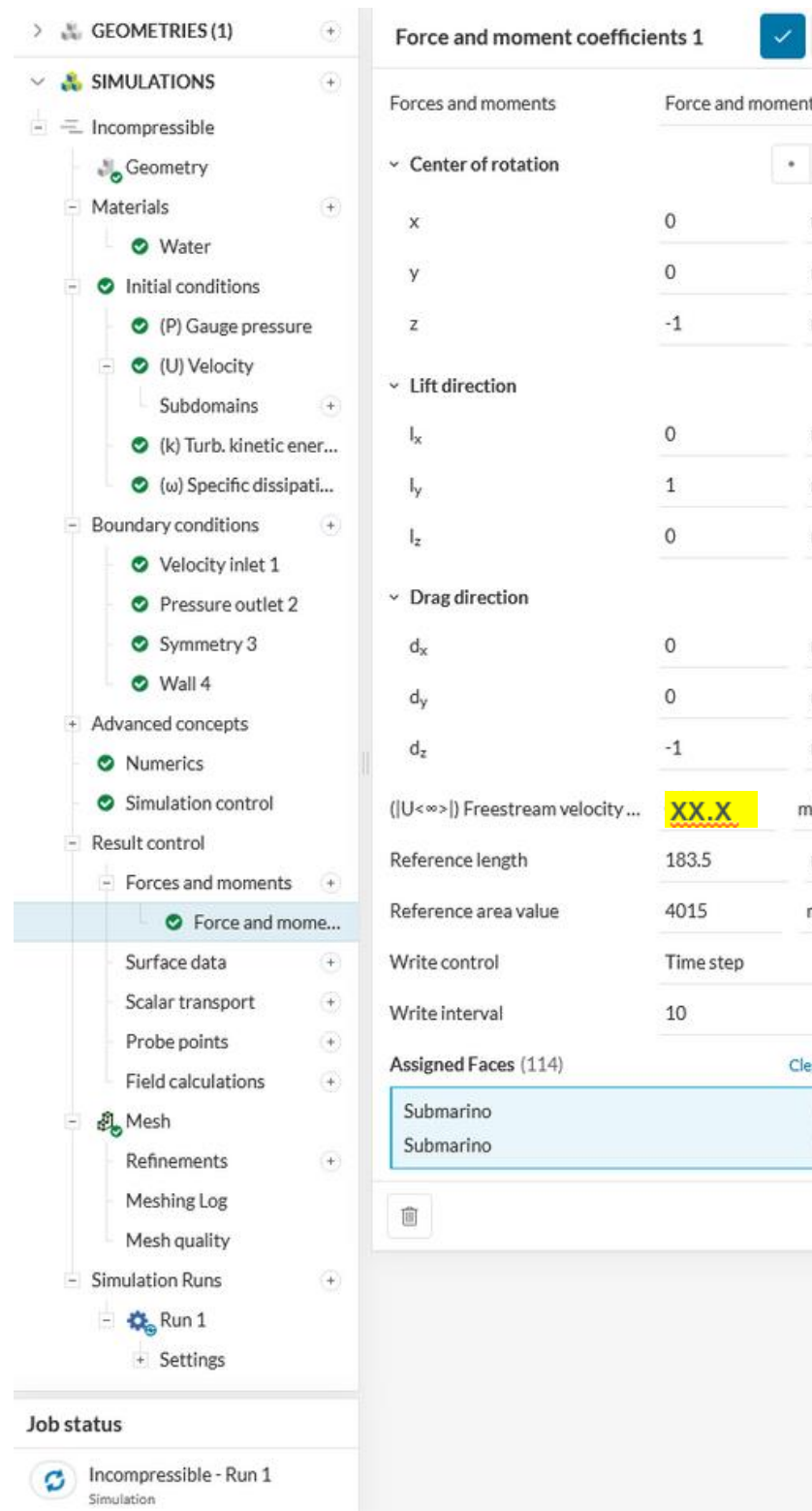


Pré-processamento – parâmetros de convergência



- No quadro lateral esquerdo, grupo SIMULATIONS, clique no item Incompressible --> Advanced concepts --> **Numerics**:
- Certifique-se de que o parâmetro “*Number of non-orthogonal*” está com valor “0” (zero).
- Altere todos os valores de **Residual controls** para 0.001, pois não é necessário um grande rigor na precisão deste problema, visto que é apenas para fins didáticos, reduzindo o tempo de processamento.

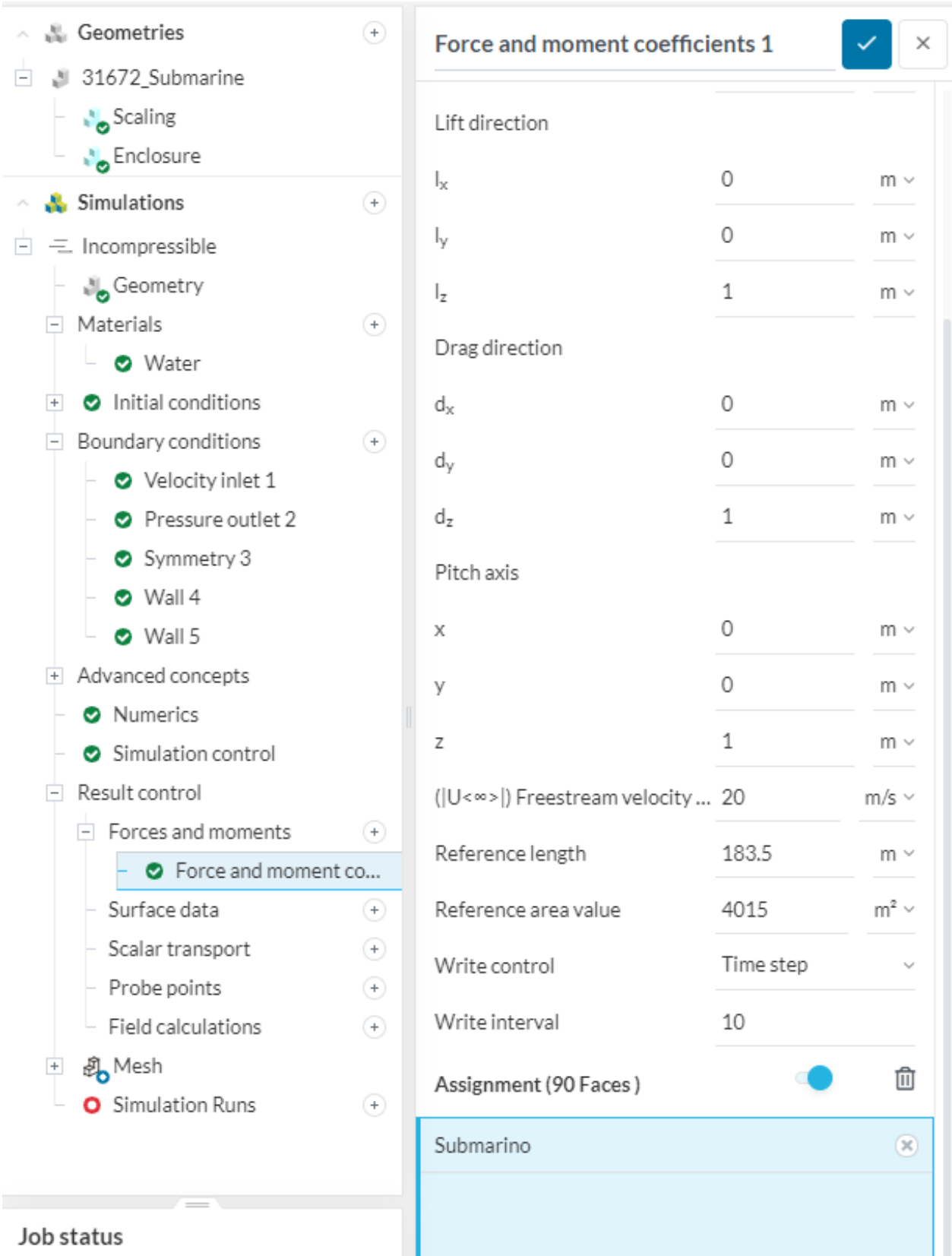
Pré-processamento



- No quadro lateral esquerdo, grupo SIMULATIONS, clique no item *Incompressible* → *Result Controls* → *Forces and moments* → *Force and moment coefficients* e altere os seguintes campos:
 - *Lift Direction*:
 - $l_x = 0$ m
 - $l_y = 1$ m
 - $l_z = 0$ m
 - *Drag Direction*:
 - $d_x = 0$ m
 - $d_y = 0$ m
 - $d_z = -1$ m
 - Center of rotation
 - $x = 0$ m
 - $y = 0$ m
 - $z = -1$ m
 - $(|U_{\infty}|)$ *Freestream velocity* = (velocidade definida para o seu nome, com valor positivo)
 - *Reference length* = 183.5 m
 - *Reference área value* = 4015 m²
 - *Write interval* = 10
- Clique, no canto superior direito, em *TOPOLOGICAL ENTITY SETS* → **Submarino**
- Clique no ícone de confirmação

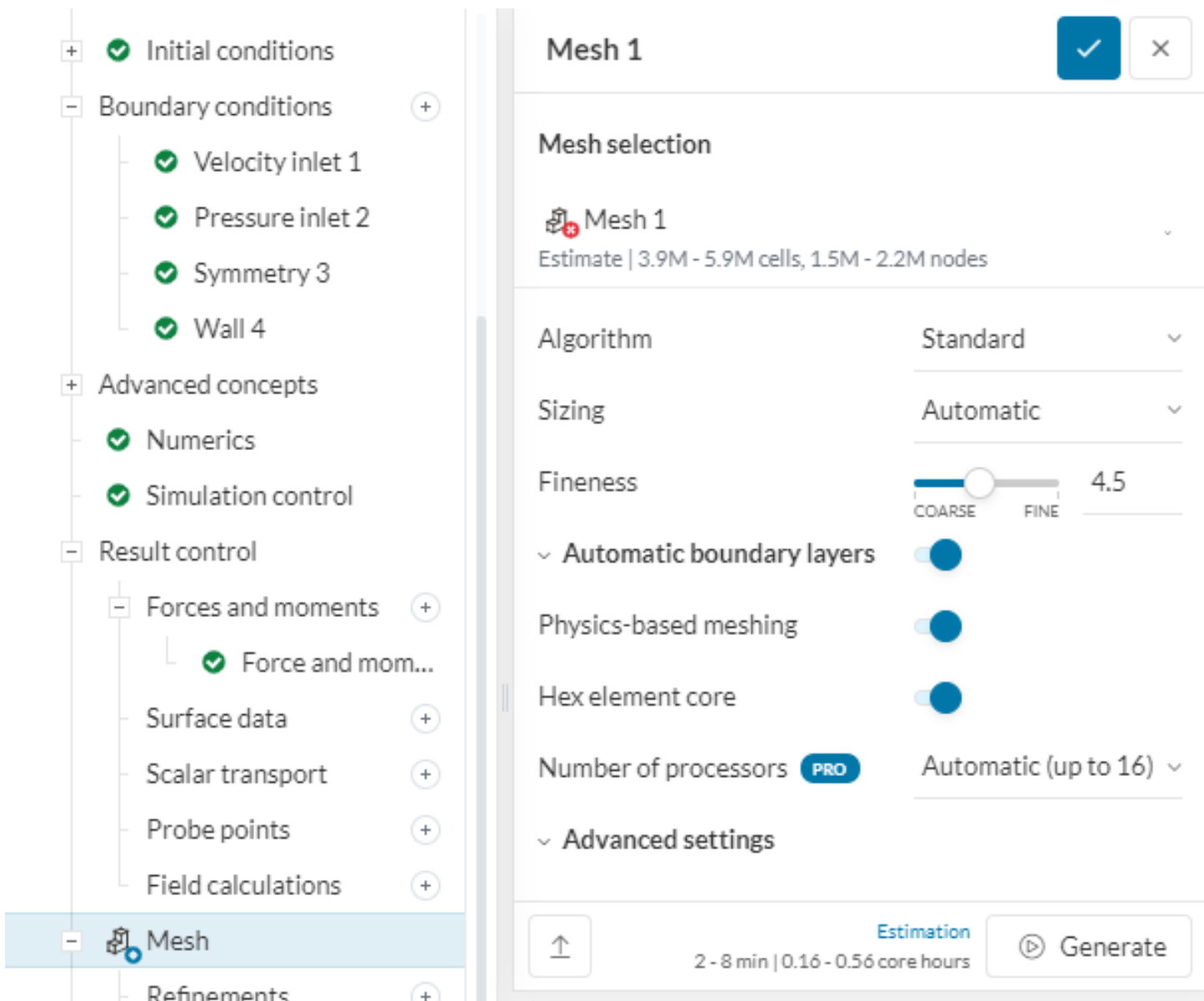


Pré-processamento



Os campos de comprimento de referência e área de referência (fórmula do coeficiente de arrasto) foram calculados externamente utilizando comandos de escala no AutoCad. Como se trata de um objeto muito comprido, onde o arrasto de atrito é significativo, o valor da área utilizado é a da projeção **lateral** do submarino.

Pré-processamento - malha

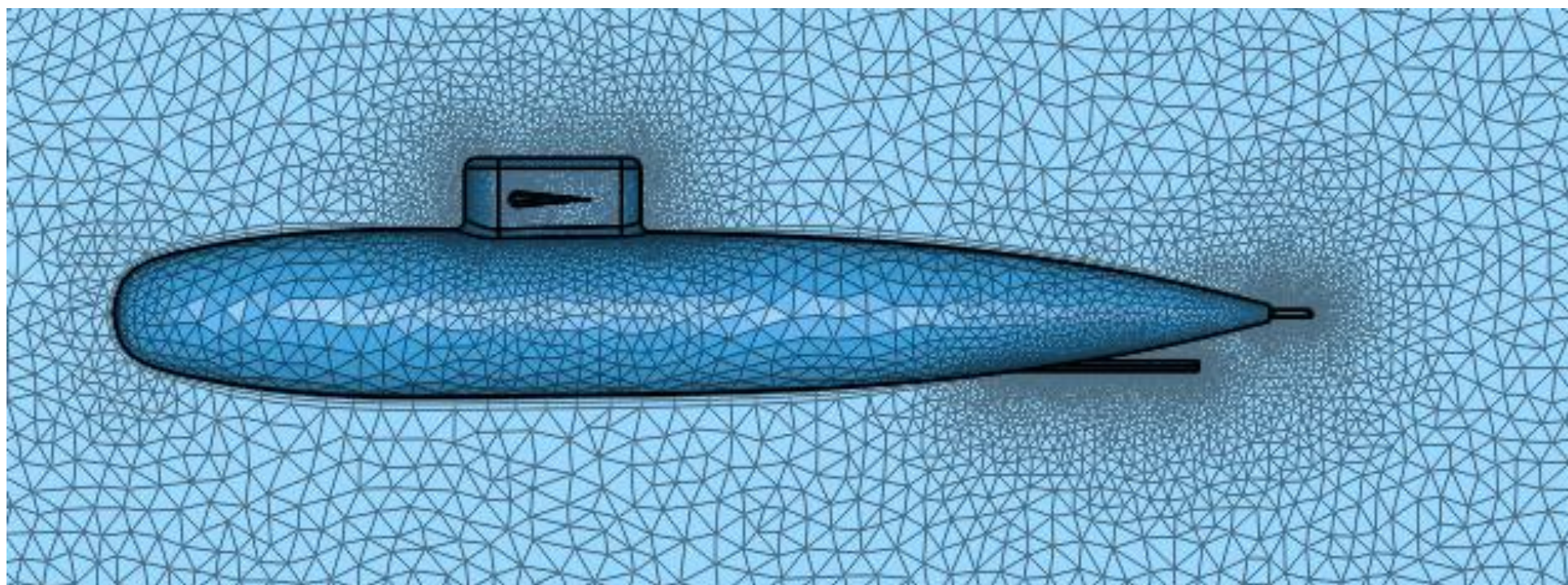


Um ponto fundamental da simulação é a geração da malha. Todas as equações serão resolvidas em cada célula do domínio e, caso tenhamos uma malha grosseira, teremos problemas em alcançar a convergência e erros elevados.

Como este é um estudo com fins didáticos, não é necessário grande rigor com a malha.

- No quadro lateral esquerdo, grupo SIMULATIONS, clique no item Incompressible --> **Mesh (final da lista):**
 - *Fineness* = 4.5
- Clique em **Generate** e aguarde até o fim do processo de geração da malha e confirme.

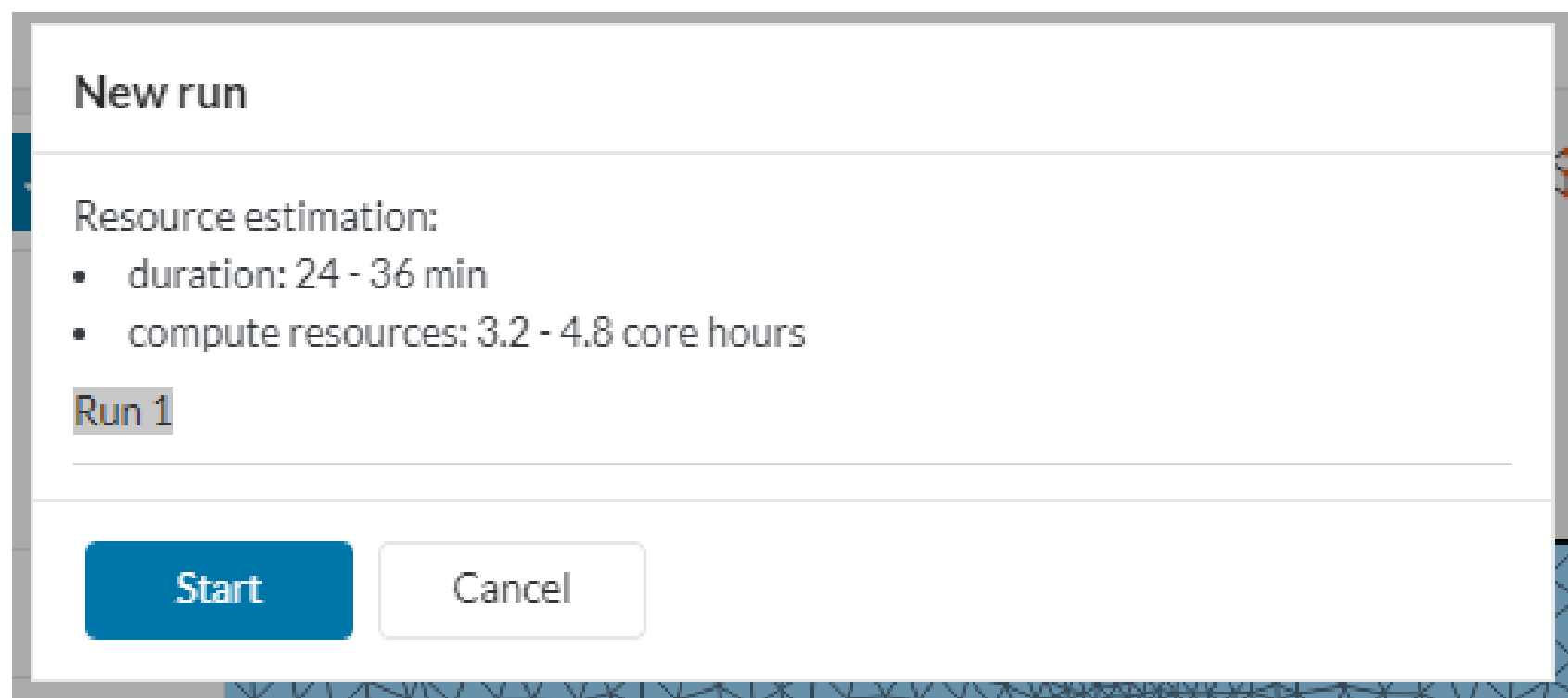
Pré-processamento - malha



A malha gerada será exibida na tela.

Repare que haverá um maior refinamento nas regiões próximas à superfície do submarino, pois é onde se faz necessária maior precisão.

Processamento




Finalmente, é hora de executar a simulação.

- No quadro lateral esquerdo, grupo **SIMULATIONS**, clique no item *Incrompressible* --> ***Simulation Runs*** (final da lista):
- Clique em ***Start***

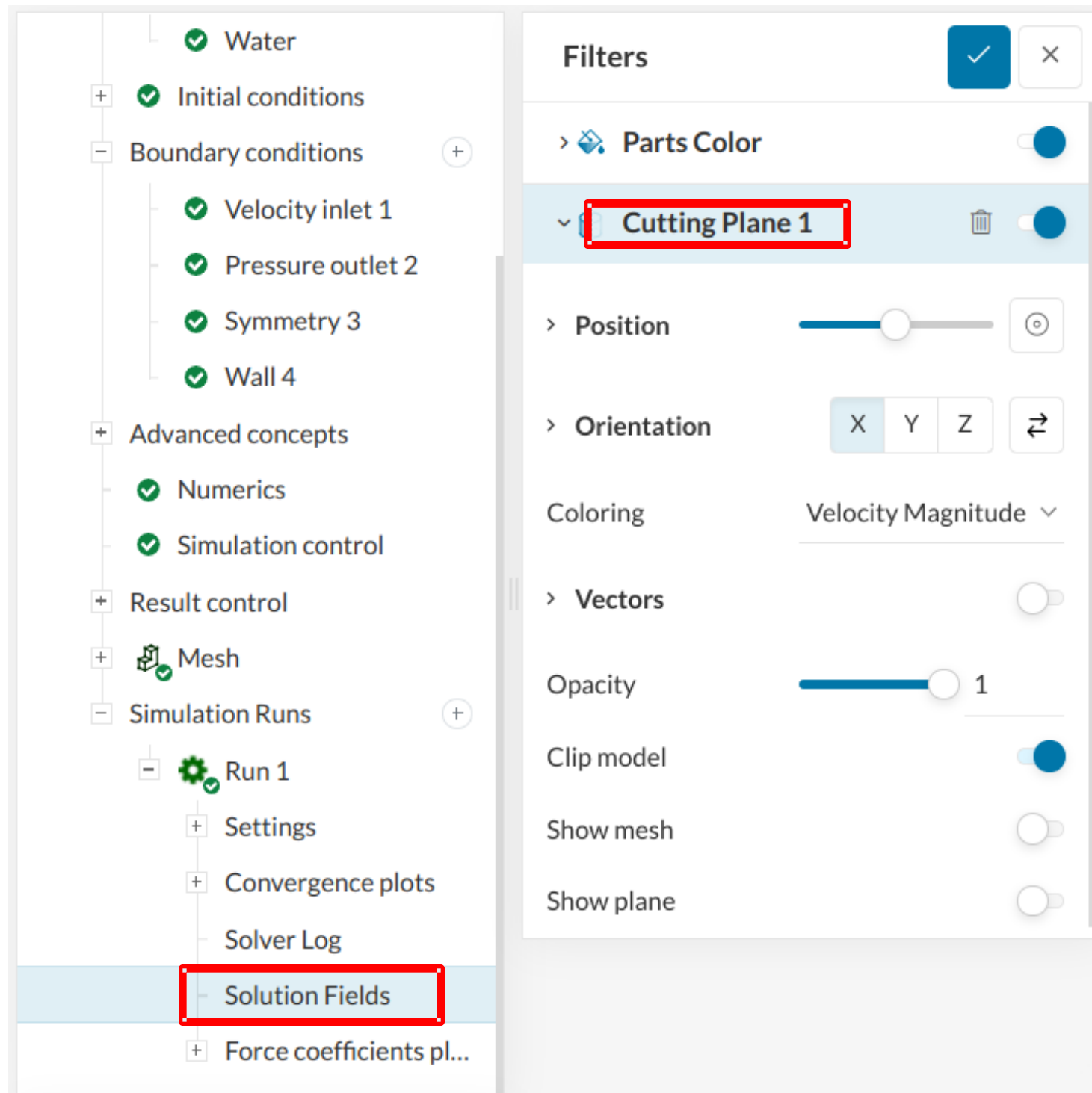
Pegue um café e tenha paciência, pois este processo deve levar cerca de meia hora. Você receberá um e-mail quando a simulação terminar.



Ao finalizar a simulação:

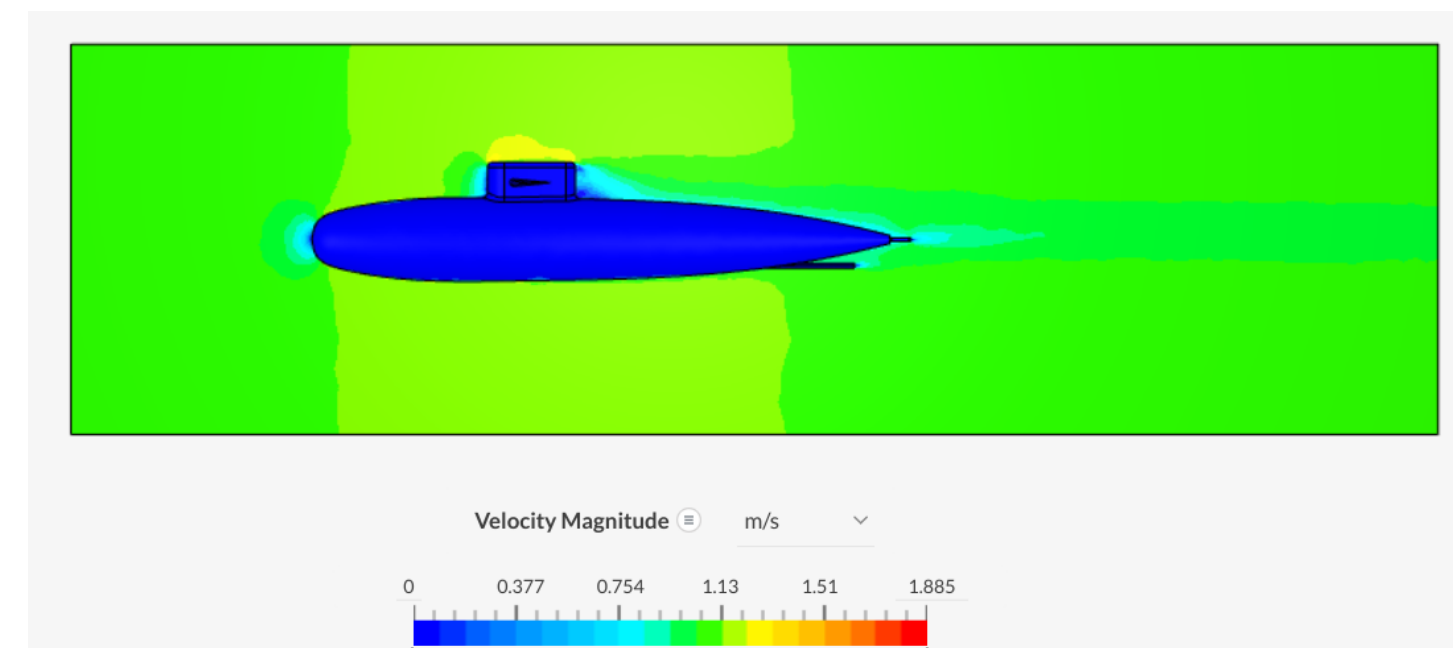
- Clique em ***Post-process results***.
- Novamente no quadro lateral esquerdo, encontre *Incrompressible* --> ***“Solution Fields”***, passe o mouse em cima, e clicando no  , selecione ***Switch to Legacy interface***

Pós-processamento



Os resultados estarão disponíveis dentro de ***Solution Fields***. Veja se já existe uma visualização chamada "Cutting Plane 1" (o número pode variar) e caso sim, exclua esse plano de visualização clicando na lixeira.

O programa irá mostrar a malha com os campos de escoamento. Você pode girar o campo de visualização com o seu mouse ou mover a imagem com o botão do meio.

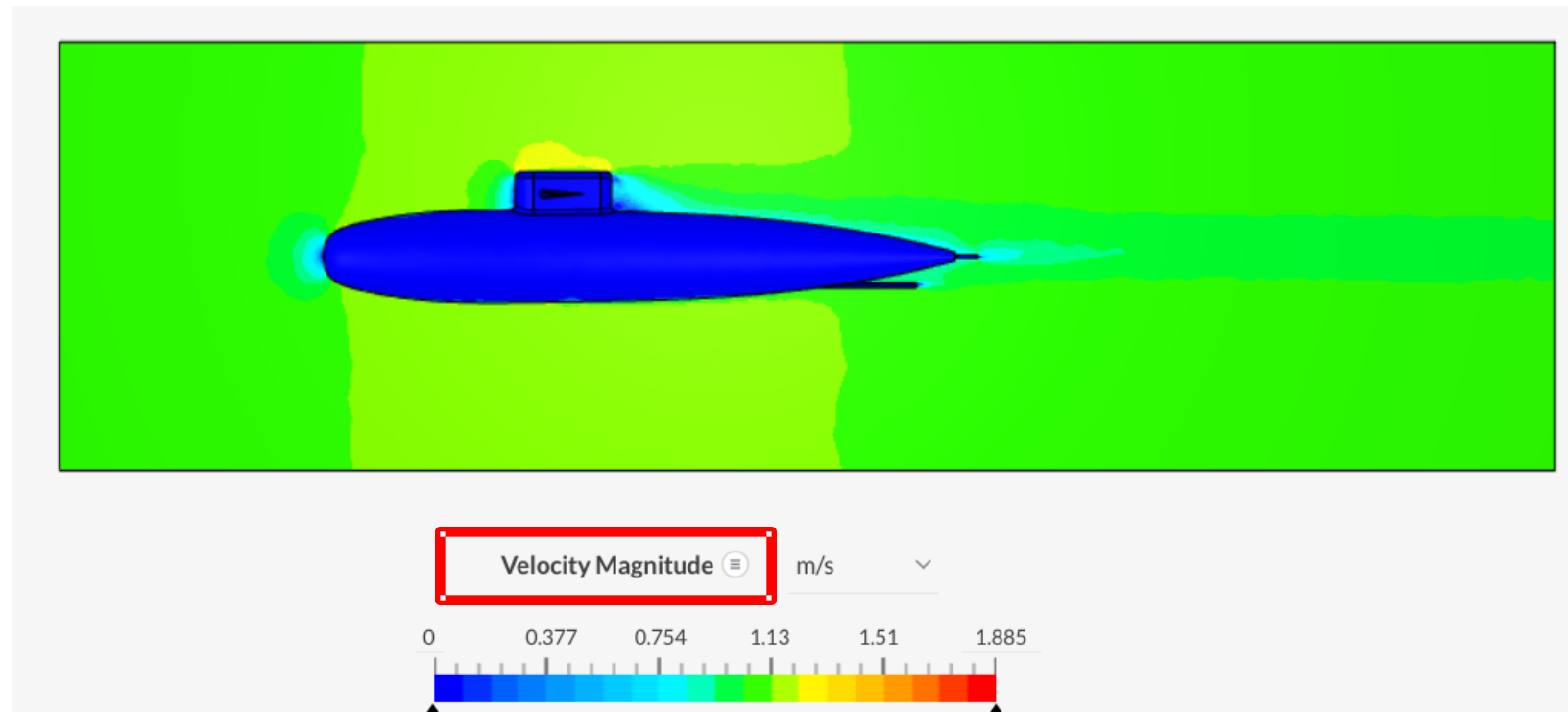


Pós-processamento – velocidades

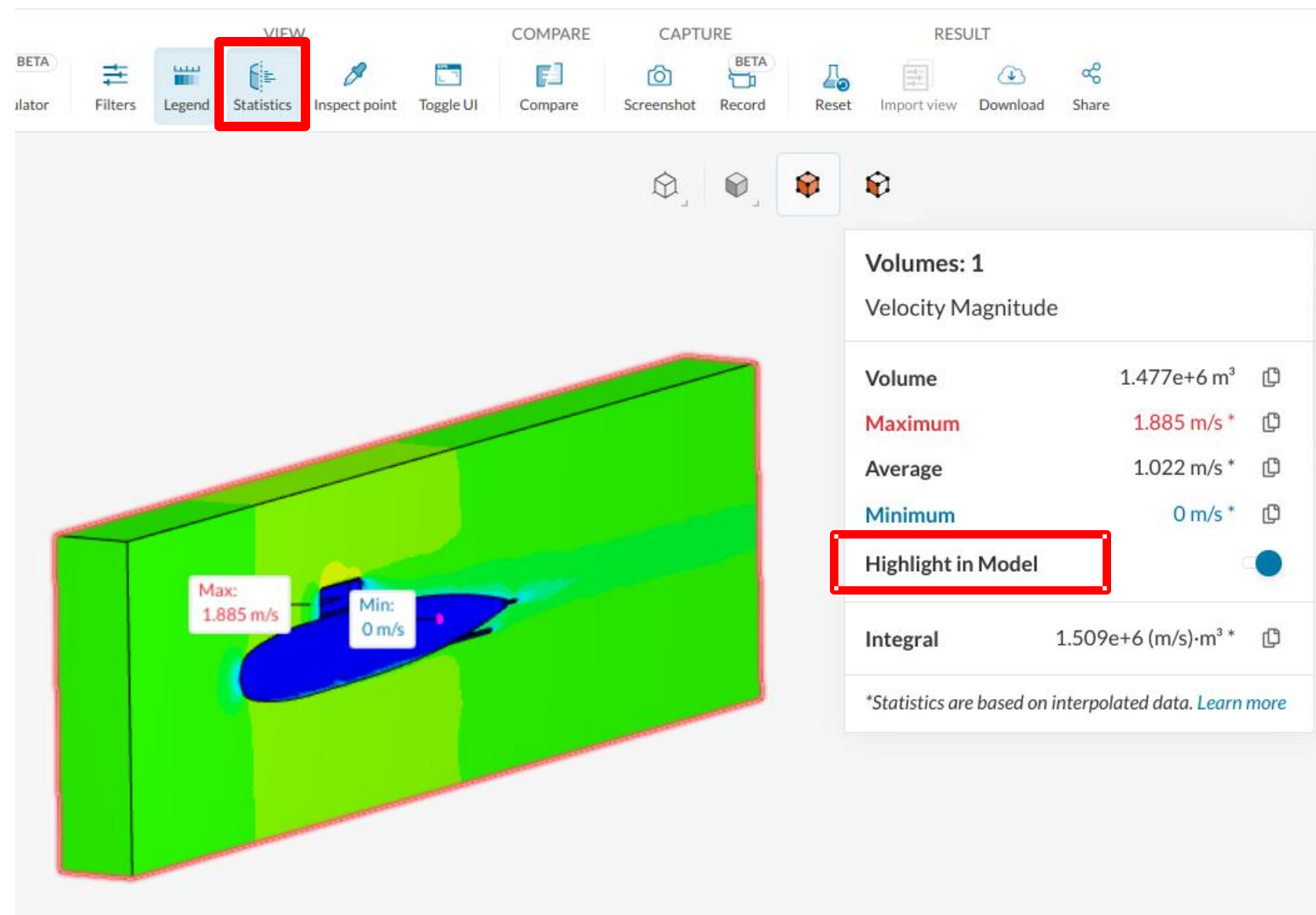
Para visualizar o campo de velocidades, verifique se a opção selecionada na legenda é **Velocity Magnitude**. A escala de cores já mostra os valores máximos e mínimos.


Anote o valor máximo de velocidade.

É importante ressaltar que a velocidade do submarino consta como 0 (condição de não escorregamento na superfície do submarino), mas o que realmente é nosso material de estudo é o fluido ao redor do submarino.



Pós-processamento – velocidades

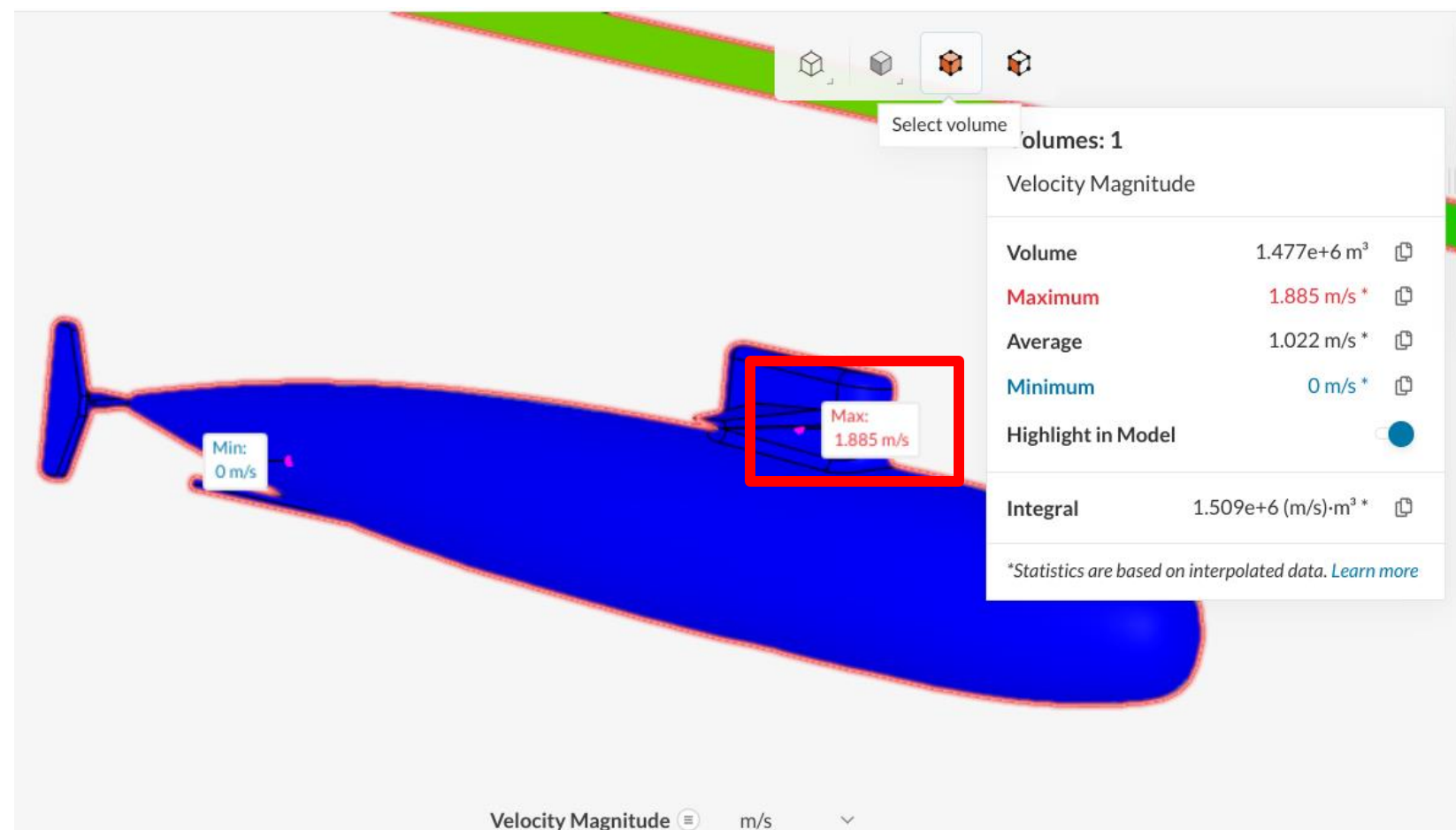



Para visualizarmos onde que ocorre o ponto de velocidade máxima e mínima, podemos selecionar o volume clicando primeiro no símbolo , depois na malha para selecionar o volume e em seguida clica em **Statistics**.

Aparecerá as estatísticas do volume numa caixa ao lado da figura. Clicando em **Highlight in Model**, o programa irá apresentar os pontos de velocidade máxima e mínima.

A velocidade mínima ocorre em qualquer ponto da superfície do submarino que é igual a zero. A velocidade máxima está dentro do domínio.

Pós-processamento – velocidades



Por enquanto estamos visualizando somente as superfícies externas do domínio do problema. Para visualizar exatamente onde a velocidade máxima está localizada, clique na seleção  e depois clique em alguma superfície que obstrua a visualização com o botão direito do mouse e escolha "Hide Selection".

Removendo apenas as superfícies laterais, podemos observar onde a velocidade máxima está localizada.

Após remover as superfícies, não esqueça de selecionar o volume de novo para verificar essas estatísticas.

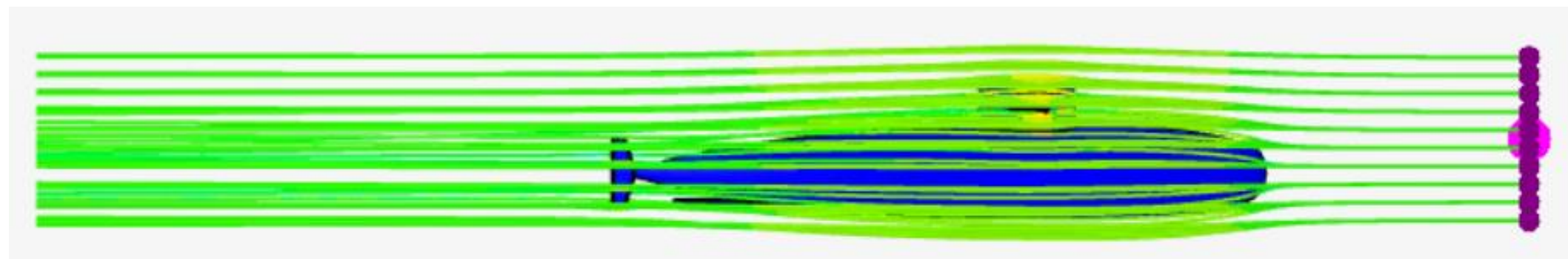
Pós-processamento – linhas de corrente

Outra forma de visualizarmos as velocidades é através de linhas de corrente. Talvez seja interessante ressetar a visualização, mas não é estritamente necessário. Clique em **Particle Trace** no menu superior e preencha os dados conforme a figura ao lado.

Talvez seja necessário ocultar algumas faces para melhor visualização.

Clique em **PICK POSITION** e em seguida clique na visualização do modelo em um ponto na **superfície de entrada do fluido** em altura próxima ao centro do objeto. Faça tentativas até que sejam criadas linhas ao redor de **todo** o objeto

Gire a visualização para observar o escoamento ao redor do objeto.



Filters

✓

×

> Parts Color

▼ Particle Trace 1

Pick Position

Seeds horizontally 10

Seeds vertically 10

Spacing 5

Coloring

Velocity Magnitude ▼

Representation

Cylinders ▼

Size 5.5e-1

Trace both directions

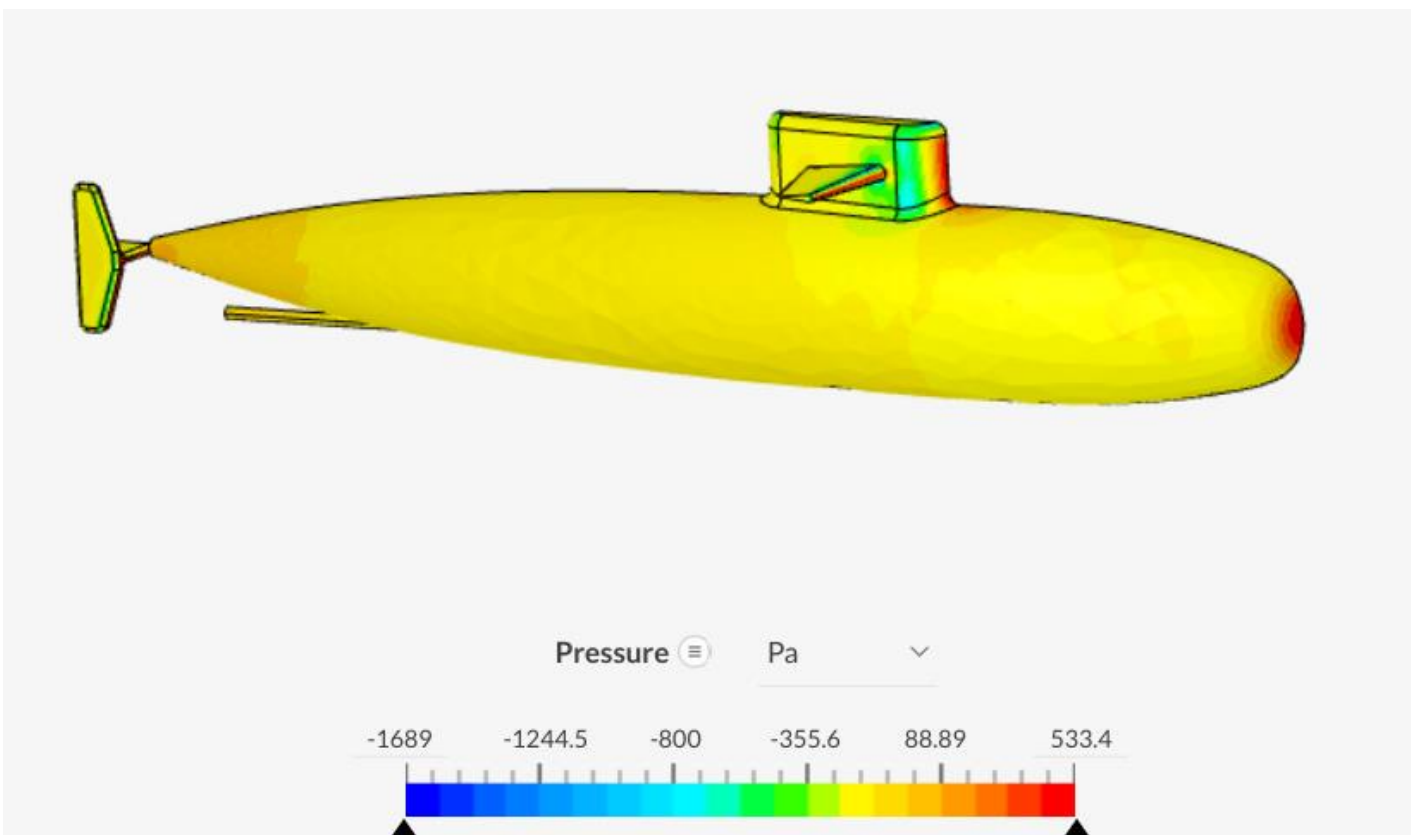
Pós-processamento – pressão

Para visualizar a pressão, você pode desativar as linhas de corrente e clicar mudar a legenda de cores para pressure. Se necessário, clique em alguma superfície que obstrua a visualização com o botão direito do mouse e escolha "Hide Selection".

Como esperado, as maiores pressões ocorrem nas superfícies frontais do submarino (pressão de estagnação), enquanto as menores ocorrem nas superfícies onde a velocidade é maior, conforme previsto por Bernoulli.

Anote o valor máximo e mínimo de pressão calculado.

Selecionando o volume e estatísticas, você poderá visualizar os pontos de pressão máxima e mínima também.



Cálculo e comparação por Bernoulli

Para comparação, vamos calcular as pressões pela equação de Bernoulli, então:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

De um lado da equação, serão usadas a velocidade de entrada (associada a sua matrícula) e a pressão atmosférica. Do outro, serão usados os valores de Vmax e Vmin achados no CFD e a pressão será a incógnita a ser descoberta nos dois casos. Vamos considerar $z_1 = z_2$ para os dois casos também.

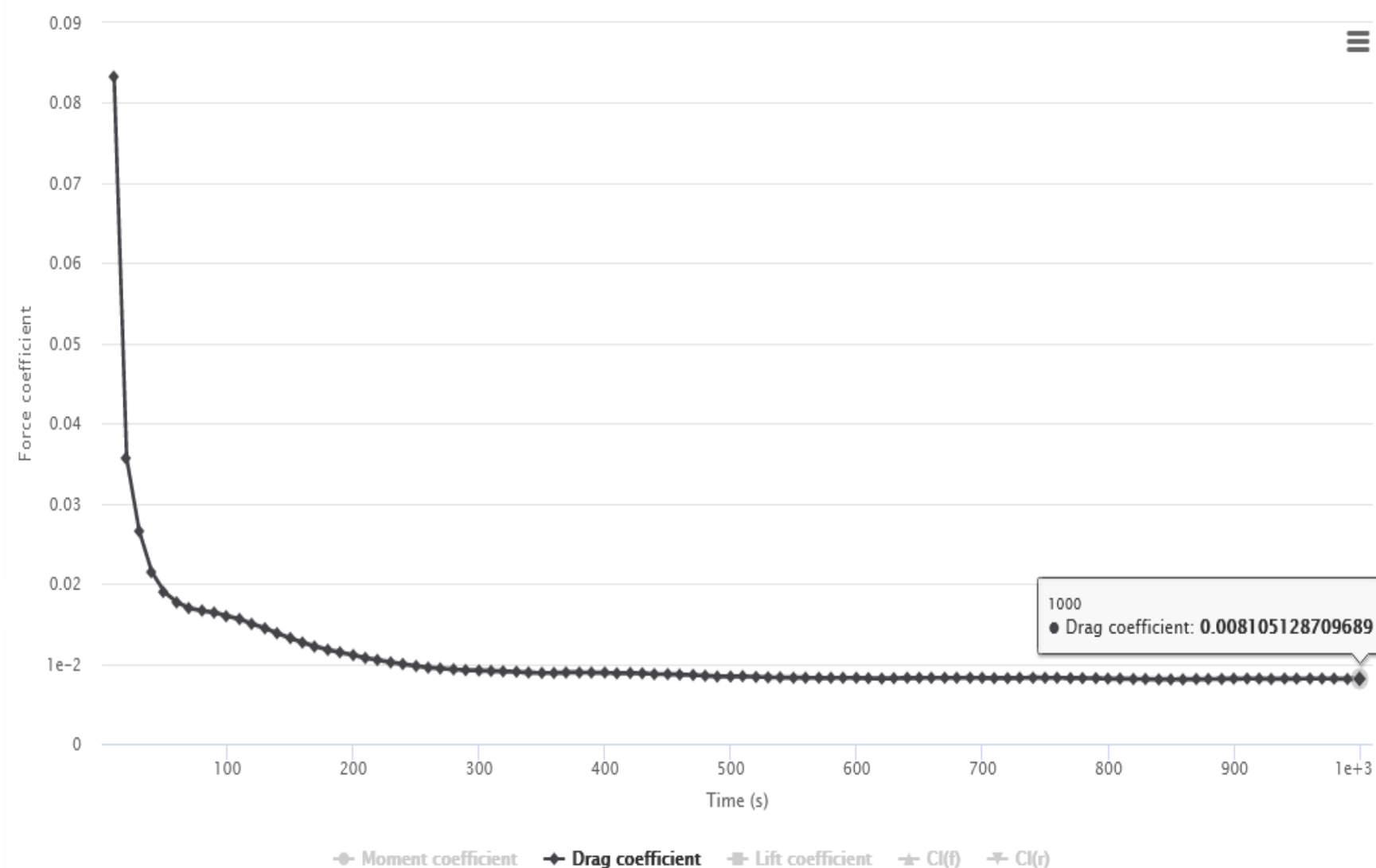
Vmax é a Velocidade máxima

Vmin é a Velocidade mínima

Como o CFD faz uso da pressão manométrica, a pressão atmosférica será 0.

Compare os resultados com as pressões máximas e mínimas calculadas pelo CFD.

Pós-processamento – resultado do coeficiente de arrasto



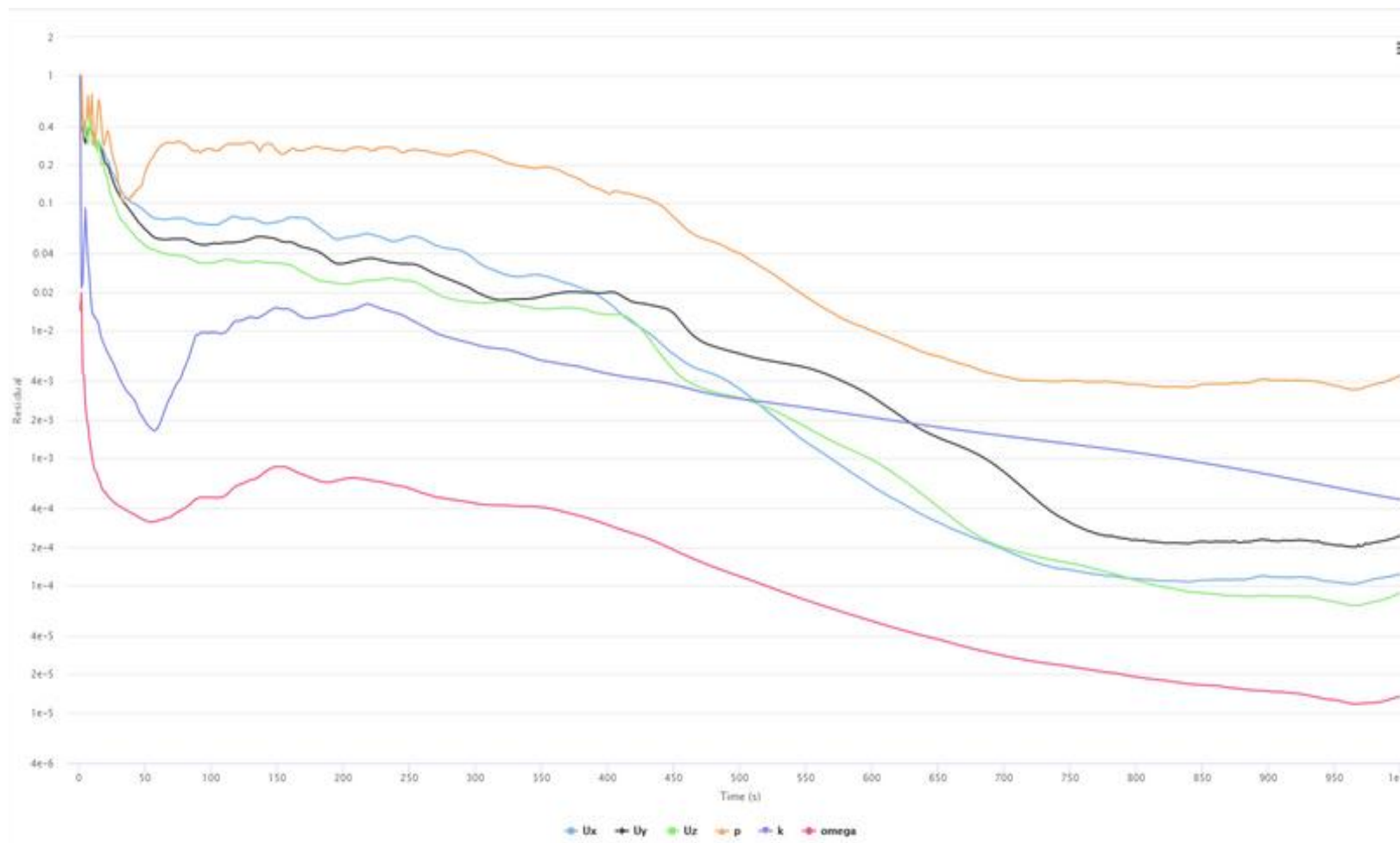
Para obter os resultados do coeficiente de arrasto, clique em “Force coefficients plot” --> “**Forces and moment coefficients 1**”. Na parte inferior do gráfico, mantenha apenas selecionada a opção “Drag Coefficient”.

Observe o valor obtido ao final das interações (semelhante à figura ao lado).

Anote o valor para o qual a curva do gráfico convergiu. Ele deverá ser informado ao submeter sua atividade no Moodle.

Conforme visto em aula teórica, o coeficiente de arrasto é função do número de Reynolds, Re . Calcule Re pela fórmula abaixo e informe também na submissão da atividade. $Re = \rho V L / \mu$, adotando L como a raiz cúbica do volume do objeto (volume do submarino = $32,8 \text{ m}^3$), o que corresponderá ao “Reynolds volumétrico”.

Pós-processamento – resíduos numéricos



Por último, é fundamental analisar os resíduos numéricos da resolução de seu sistema linear. Resíduos com elevada ordem de grandeza são indicativos que o problema não atingiu a convergência numérica.

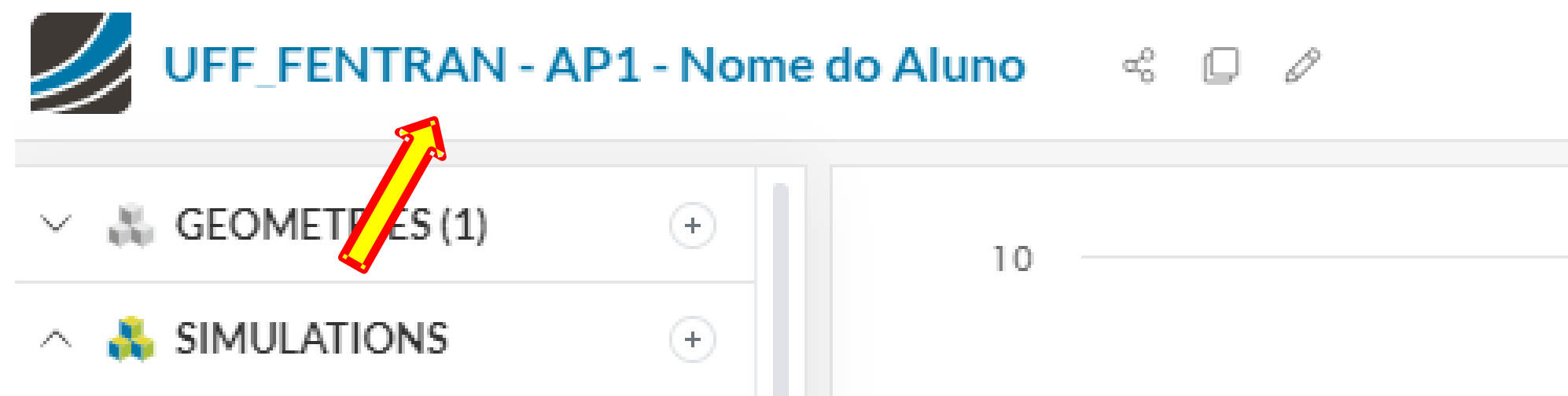
- No quadro lateral esquerdo, grupo SIMULATIONS, clique no item Incompressible --> Simulation Runs --> Run 1 --> Convergence plots --> **Residuals**:

Se os resíduos caem continuamente ao longo das iterações, significa que o modelo tem estabilidade numérica. Isso não significa, necessariamente, que os resultados são precisos, pois outros fatores podem influenciar, como refinamento da malha, modelo de turbulência e detalhamento geométrico.

Compartilhamento dos resultados com os avaliadores

Para avaliação seu projeto deve ser compartilhado.

- Clique no nome do seu projeto, localizado canto superior esquerdo, indicado na figura abaixo.



- Na página que abrirá, copie o link que aparecerá na barra de endereços (ex.: simscale.com/projects/numedousuario/uff_fentran_-_ap1_-_nome_do_aluno/).

Esse link deverá ser colado no texto online a ser preenchido na submissão da atividade na plataforma Moodle.

**Parabéns! Você realizou com sucesso
sua primeira simulação em CFD.**