

Instituto de Física da USP  
Ciência e Tecnologia do Vácuo - 4300323  
Maio de 2020  
5ª Lista de Exercícios

**Questões computacionais (Programa Molflow+)**

- Para simular condutâncias corretamente certifique-se que a opção “*Calculate constant flow*” está ativada. Para ativá-la, vá em “*Time > Edit moments*” e marque a opção “*Calculate constant flow*”.
  - Adote a dessorção tipo “cosseno” para o cálculo das condutâncias a seguir.
1. Considere um tubo de diâmetro  $D = 1$  cm e comprimento  $L$  (100 passos de arco).
- a) Varie o comprimento do tubo (ao menos 5 valores) e obtenha sua condutância para as diferentes condições simuladas por método de Monte Carlo. Faça uma tabela com os resultados obtidos através de simulação e teoria.
  - b) Calcule a variação percentual entre os resultados obtidos por simulação em relação aos valores teóricos (tubo longo e tubo curto). Apresente em um gráfico os valores para variações percentuais em função dos comprimentos  $L$  adotados no item (a).

Para os cálculos teóricos, adote:

$$\langle P_{\text{transmissão}} \rangle = \frac{4D}{3L}$$

$$C_{\text{tubo curto}} = \frac{12.3 D^3}{L + \frac{4}{3}D}$$

$$C_{\text{tubo longo}} = 12.3 \frac{D^3}{L}$$

2. Considere um tubo anular de diâmetro interno  $D_1$ , diâmetro externo  $D_2$  e comprimento  $L$  (100 passos de arco).
- a) Considerando  $D_1 = 1$  cm e  $D_2 = 10$  cm, varie o comprimento do tubo anular (ao menos 5 valores) e obtenha a condutância para as condições simuladas por método de Monte Carlo. Calcule a variação percentual entre os resultados obtidos por simulação em relação aos valores teóricos. Apresente em um gráfico os valores de variação percentual em função dos comprimentos  $L$  adotados.
  - b) Considerando  $L = 100$  cm, varie a relação  $D_1/D_2$  para o tubo anular (ao menos 5 valores) e obtenha a condutância para as condições simuladas por método de Monte Carlo. Calcule a variação percentual entre os resultados obtidos por simulação em relação aos valores teóricos. Apresente em um gráfico os valores de variação percentual em função das relações  $D_1/D_2$  adotadas.

Para os cálculos teóricos, adote:

$$C_{\text{tubo anular}} = \frac{12.3}{L} (D_2^3 - D_1^3) \left(1 - \frac{D_1}{D_2}\right)$$

3. Um *Baffle* é um sistema de placas dispostas entre câmaras de vácuo e bombas de vapor (como por exemplo, a bomba difusora) cuja função é interceptar e condensar o vapor de *back-streaming*, devolvendo o líquido à bomba. *Baffles* causam redução na velocidade de bombeamento, porém, em compensação, reduzem significativamente o vapor de óleo de *back-streaming*. Considere a geometria do *baffle* a seguir.

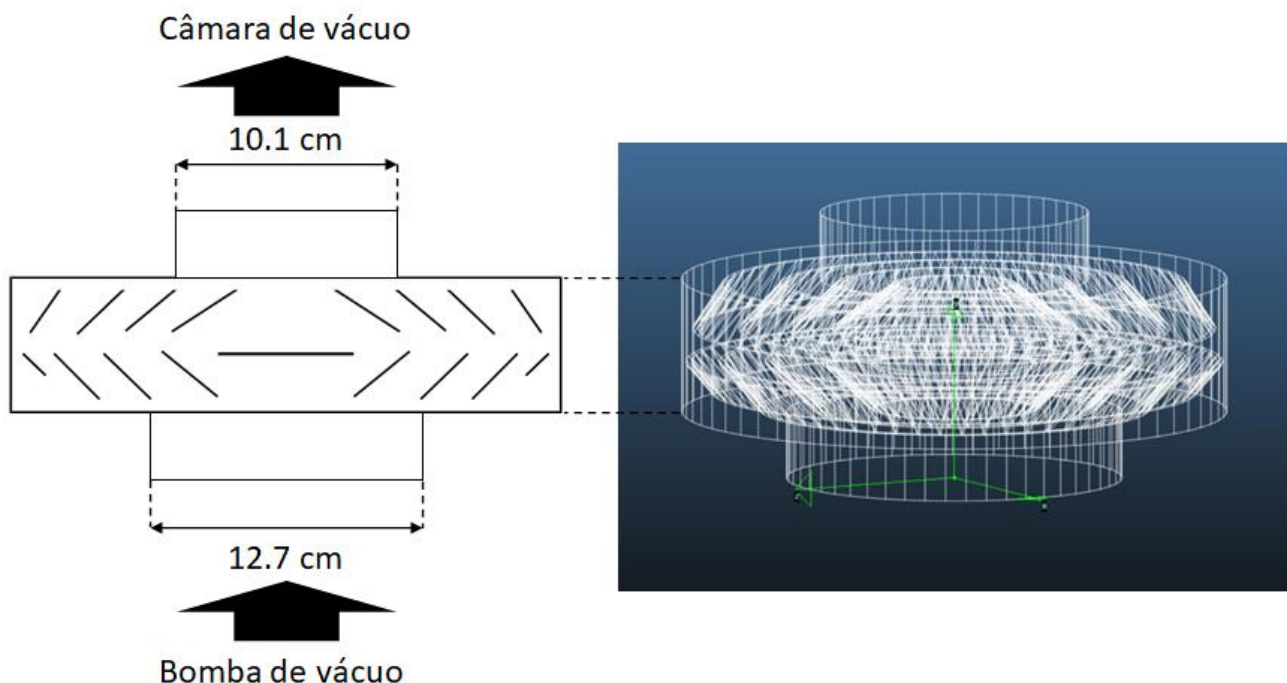


Figura 1. Desenho esquemático (esquerda) e desenho assistido por computador (direita) de um *baffle*.

Utilizando o arquivo “baffle1.zip”:

- Obtenha a condutância desse *baffle* por método de Monte Carlo.
- Utilizando o resultado do item anterior, calcule a velocidade de bombeamento efetiva ( $S_{ef}$ ) à câmara de vácuo para uma bomba cuja velocidade de bombeamento é de  $S = 300$  l/s. Qual percentual a velocidade de bombeamento efetiva  $S_{ef}$  representa da velocidade de bombeamento  $S$ ?

4. Considere armadilha a seguir.

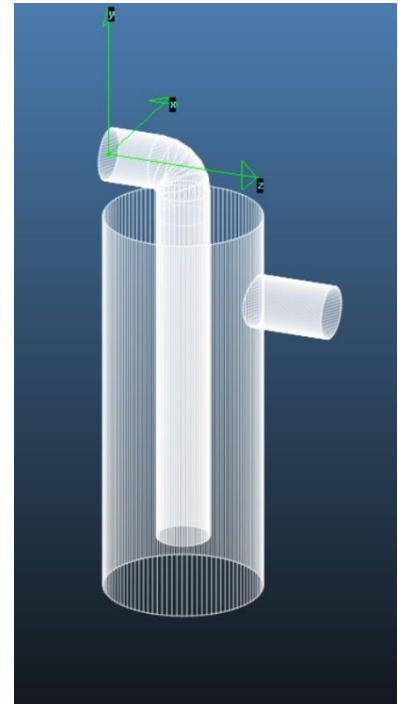
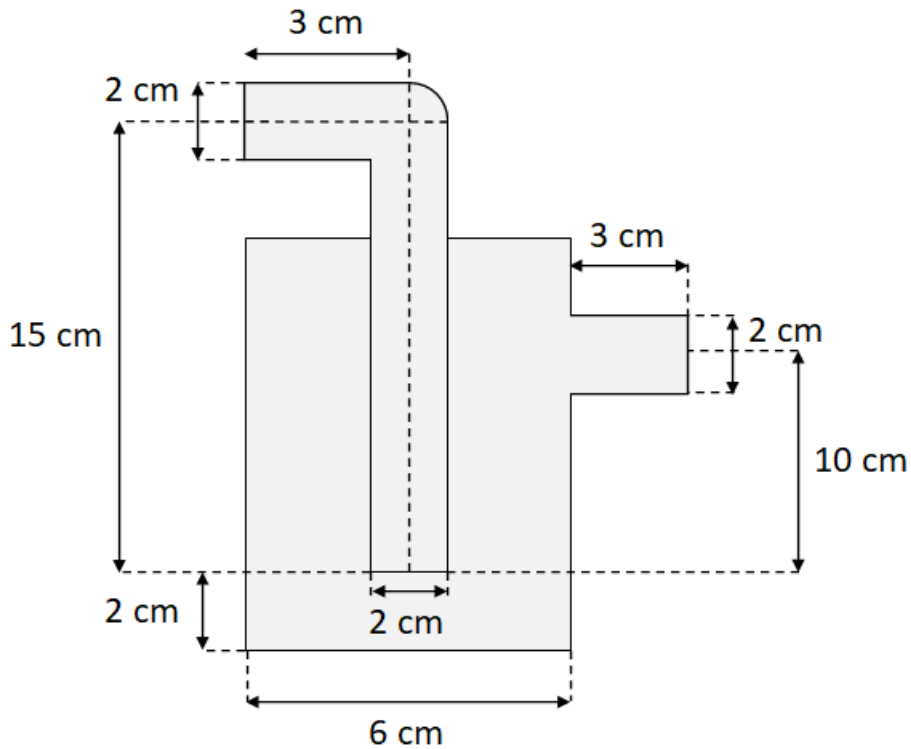


Figura 2. Desenho esquemático (esquerda) e desenho assistido por computador (direita) de uma armadilha.

Adote que a armadilha não contém  $N_2$  e está à temperatura de 293.15 K. Utilizando o arquivo "armadilha\_roth.zip", obtenha a condutância da armadilha por método de Monte Carlo. Compare esse resultado obtido com o valor teórico.

Para os cálculos teóricos, adote:

$$C_{\text{cotovelo}} = \frac{12.3 D^3}{L_1 + L_2 + \frac{4}{3} D \frac{\theta}{180^\circ}}$$

$$C_{\text{diafragma}} = \frac{11.8 A}{1 - A/A_0}$$

$$C_{\text{tubo anular}} = \frac{12.3}{L} (D_2^3 - D_1^3) \left(1 - \frac{D_1}{D_2}\right)$$

$$C_{\text{orifício}} = 11.8 A$$

$$C_{\text{tubo curto}} = \frac{12.3 D^3}{L + \frac{4}{3} D}$$

Dica: A discussão da seção "3.4.3. *Molecular flow – traps*" do livro "Vacuum Technology" do Roth (pg. 93, 3ª edição) pode ajudar nos cálculos.

5. Considere um cotovelo arqueado composto por um tubo, tubo arqueado e outro tubo, sequencialmente.

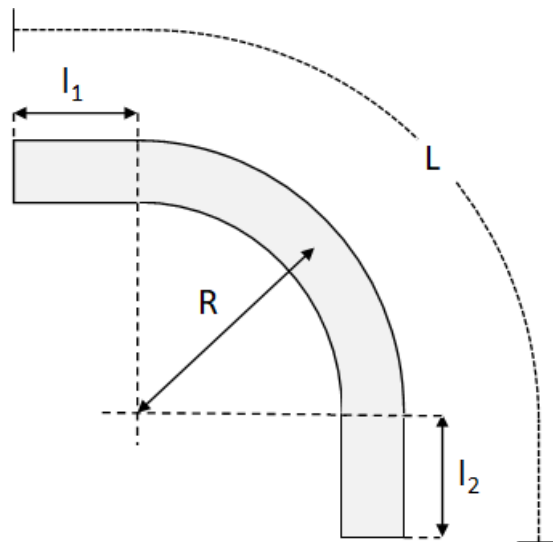


Figura 3. Desenho esquemático de um cotovelo estendido de comprimento total  $L = l_1 + \frac{1}{4} 2\pi R + l_2$ .

Construa um cotovelo arqueado de diâmetro  $D = 1$  cm através do seguinte método:

- I. Tubo 1:
    - Em "Facet > Create Shape", crie uma faceta circular de 1 cm de diâmetro e 100 passos de arco;
    - Em "Facet > Extrude", faça a extrusão dessa faceta através de um comprimento  $l_1$  (a definir).
  - II. Tubo arqueado em  $90^\circ$ :
    - Em "Facet > Extrude", faça a extrusão de um tubo arqueado de raio R:
      - "Extrude Facet > Along curve > Against normal"
      - Radius base: Facet center (clique)
      - Radius direction: dX = 0 cm, dY = -1 cm, dZ = 0 cm
      - Radius: R (a definir)
      - Total angle: 90 deg
      - Steps: 10
    - Corrija os vetores normais das facetas recém criadas em "Facet > Swap normal".
  - III. Tubo 2:
    - Em "Facet > Extrude", faça a extrusão dessa faceta através de um comprimento  $l_2$  (a definir).
- Exclua as facetas circulares que separam os tubos do tubo arqueado.  
*Sendo predefinidas com 100% de opacidade, elas bloquearão as partículas simuladas ao longo da geometria construída.*
- Verifique se os vetores normais de todas as facetas estão corretamente definidos, isto é, apontando para o eixo central da geometria construída.  
*Caso contrário, haverá vazamentos durante a simulação.*

Em teoria, vimos que a condutância de um cotovelo independe de sua transição ser “aguda” ou “suave”. Em simulação, vimos que a condutância de um cotovelo depende muito pouco dessa consideração geométrica.

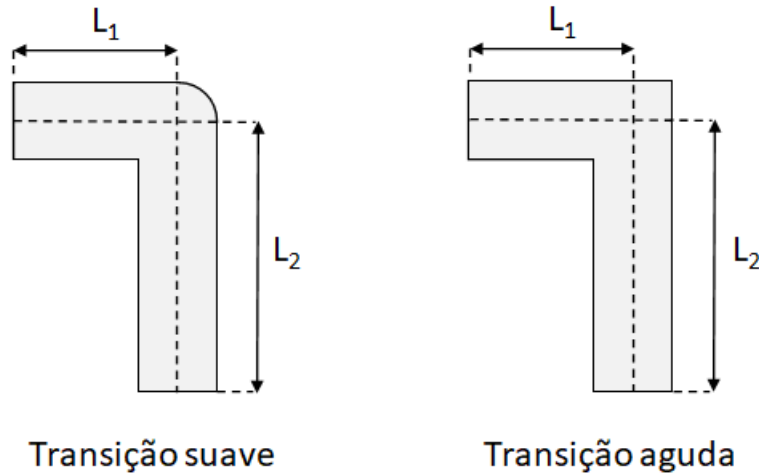


Figura 4. Representação de um cotovelo de transição suave (esquerda) e um cotovelo de transição aguda (direita).

Varie o raio de curvatura (ao menos 5 valores) do cotovelo arqueado e determine a condutância simulada. Compare os resultados obtidos em simulação com os valores teóricos da fórmula de cotovelo e de tubo curto, levando-se em consideração os mesmos comprimentos.

Adote como comprimento L, em centímetros, os últimos 2 dígitos de seu número USP. Caso o penúltimo dígito seja 0, adote os 3 últimos dígitos de seu número USP.

**Exemplo**

*Sendo o número USP XXX...X10, adota-se L = 10 cm para as simulações.*

*Se o comprimento do tubo arqueado simulado é  $L = l_1 + \frac{1}{4} 2\pi R + l_2 = 10$  cm, comparar sua condutância com as condutâncias teóricas de um cotovelo com  $L = L_1 + L_2 = 10$  cm e de um tubo curto com  $L = 10$  cm. Varia-se R, mantendo-se L = 10 cm fixo.*

Para os cálculos teóricos, adote:

$$C_{\text{cotovelo}} = \frac{12.3 D^3}{L_1 + L_2 + \frac{4}{3} D \frac{\theta}{180^\circ}}$$

$$C_{\text{tubo curto}} = \frac{12.3 D^3}{L + \frac{4}{3} D}$$

**Desafio:** tente elaborar um modelo teórico para a condutância do tubo arqueado e de um cotovelo arqueado, considerando também o parâmetro R na equação algébrica.