

CIRCUMFERENTIAL BIOINSPIRED RIBLETS IN INTERNAL PIPE FLOW

RIBLETS CIRCUNFERENCIAIS BIOINSPIRADOS NO ESCOAMENTO INTERNO DE
TUBULAÇÃO**CHRISTIAN SANTOS**

<https://orcid.org/0009-0006-0966-8877> / christian7@aluno.ufrb.edu.br
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas – BA

VANIO VICENTE SANTOS DE SOUZA

<https://orcid.org/0009-0009-4030-6307> / vaniouvss@ufrb.edu.br
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas – BA

MARCELO LIMA BORGES

<https://orcid.org/0009-0001-6017-1982> / limaborgesmarcelo@gmail.com
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas - BA

Recebido em: 29/01/2025

Aprovado em: 17/05/2025

Publicado em: 17/06/2025

**RESUMO**

Este trabalho analisa a influência de riblets bioinspirados espaçados em 200 mm no comportamento da perda de carga em escoamento de água em um trecho de 1m de tubulação de 1". Os riblets utilizados são de geometria triangular e semicircular e foram fabricados em impressora 3D de filamento e aplicados sobre a superfície interna de uma tubulação pvc. O experimento foi realizado em uma bancada de testes com circuito fechado, com sensores de pressão e vazão, e um Arduino UNO R3 para fazer a aquisição de dados. Os resultados indicaram que riblets triangulares reduziram a perda de carga em até 10,35% para vazões de 14 L/min, enquanto os riblets semicirculares indicaram um aumento significativo na perda de carga para vazões superiores a 8 L/min. Os riblets semicirculares interagem com vórtices nas camadas subviscosas aumentando a troca de momento e não acumulam as tensões nas suas pontas, influenciando no aumento da perda de carga. Enquanto os riblets triangulares foram eficazes no alinhamento das camadas do fluido.

Palavras-chave: biomimética; perda de carga; riblets; tubulação; escoamento turbulento.

ABSTRACT

This work analyzes the influence of bioinspired riblets spaced 200 mm apart on the pressure drop behavior in pipeline flow. The riblets used are of triangular and semicircular geometry, manufactured using a 3D filament printer and applied to the inner surface of a PVC pipeline. The experiment was conducted on a closed-loop test bench, with pressure and flow sensors, and an Arduino for data acquisition. The results indicated that triangular riblets reduced the pressure drop by up to 10.35% for flow rates of 14 L/min, while semicircular

riblets showed a significant increase in pressure drop for flow rates above 8 L/min. The semicircular riblets interact with vortices in the subviscous layers, increasing momentum exchange, and do not accumulate stresses at their tips, which contributes to the increase in pressure drop. Despite promising results, the true efficiency of riblets is still unknown and limited, due to factors such as manufacturing difficulty, applicability, and geometry that is yet to be optimized.

Keywords: biomimetics; load loss; riblets; piping; turbulent flow.

1 INTRODUÇÃO

Quando um fluido escoar em uma tubulação, ocorre uma perda gradual de energia mecânica, sendo dissipada sob diversas formas de energia, como ruído e calor, ocasionada devido à resistência do escoamento com a superfície interna da tubulação. Segundo (ENTIAN LI et al., 2019), as bombas usadas em transporte de fluidos de longa distância acabam utilizando parte da sua energia para superar as perdas geradas ao longo da tubulação. Essa energia perdida causa a diminuição gradual da pressão do fluido na direção do escoamento, denominada de perda de carga. (SILVA TELLES, 2023 p. 4).

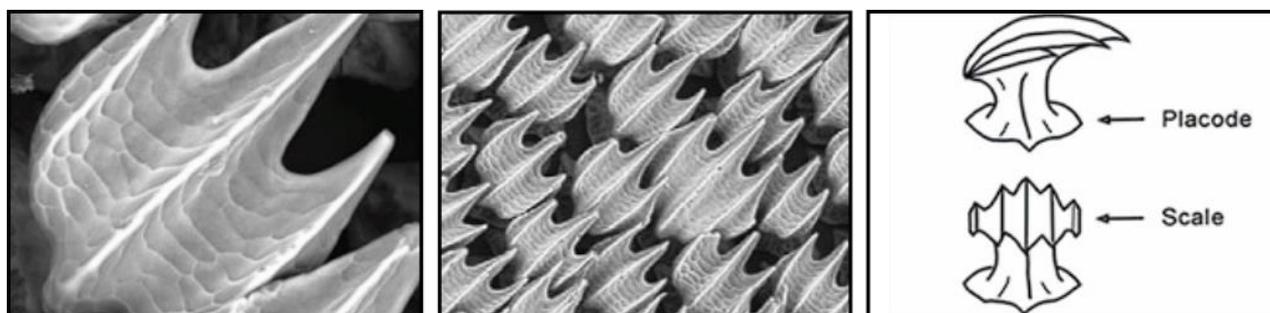
A perda de carga causa diversos problemas práticos de engenharia na indústria de transporte de fluidos. As extensas redes de tubulações, por exemplo, necessitam de bombas e equipamentos mais potentes para compensar a perda de pressão gradual, aumentando os custos operacionais (MARTINEZ et al., 2008). Portanto, é notório que pesquisas voltadas a mitigação desse problema sejam importantes no aumento da eficiência energética. Os perfis de turbulência na camada limite de escoamentos externos se assemelham em parte com os de escoamento interno, pois em ambos os casos há a formação de uma região de fluido viscoso próximo à parede. Essa semelhança permite que técnicas de redução de arrasto, como o uso de riblets, desenvolvidas inicialmente para superfícies externas sejam adaptadas para aplicações em tubulações, aproveitando-se das características do escoamento na camada limite (WILLEMSSENS, 2013).

Nas últimas décadas, diversas pesquisas voltaram-se para encontrar métodos eficazes que reduzissem as perdas no escoamento superficial por atrito ou arrasto, especialmente nos setores aeronáutico, naval e de transporte de fluidos. Desta forma, desde a década de 1970, a NASA, motivada pela necessidade de diminuir o consumo excessivo de energia, iniciou pesquisas voltadas à redução de arrasto. Segundo (WALSH, 1982), se houvesse uma redução de apenas 10% no arrasto da fuselagem de aeronaves, poderia resultar em uma economia anual expressiva de combustível, assim, um gasto de 350 milhões de dólares poderia ser economizado para as companhias aéreas.

Para a manutenção da vida, os sistemas biológicos criaram as mais diversas soluções, e têm sido uma inspiração na busca de tecnologias que otimizem o consumo de energia em diversos setores. Consequentemente, a Biomimética cujo significado deriva do grego, "bios" de vida e "mimésis" de imitação, ganhou notoriedade nas pesquisas. Segundo (BENYUS, 2003, p 8), essa ciência estuda padrões e mecanismos da natureza, desenvolvidos ao longo de bilhões de anos, para resolução de problemas complexos. A título de exemplo, sabe-se que animais marinhos como baleias, golfinho e tubarões, possuem uma excelente capacidade de nado, em consequência disso, surgiram estudos biomiméticos relevantes ao observar as pequenas estruturas da pele desses animais, especialmente os tubarões.

Devido à sua natureza predatória, os tubarões precisam de arrasto mínimo para atingir altas velocidades no oceano, além de contarem com uma proteção natural contra bioincrustações (DEAN; BHUSHAN, 2010). Sua pele, ao contrário do que muitos imaginam, não é lisa, mas revestida de pequenos dentículos dérmicos, que são escamas placoides, composto por um tecido conjuntivo mineralizado, que conseqüentemente possuem a capacidade de reduzir o arrasto ao guiar o fluxo próximo à superfície Figura 1 (REIF, 1982; Mota, 1977). Inspirados por essa adaptação natural, cientistas desenvolveram pequenas estruturas longitudinais ranhuradas chamadas em inglês de riblets, que têm demonstrado um grande potencial na redução do arrasto.

Figura 1: Foto dos dentículos dérmicos do tubarão



Fonte: Adaptado de LI; WEAVER; LAUDER (2014)

Diversos Estudos indicaram uma redução significativa no arrasto usando diferentes geometrias de riblets. (WALSH, 1983) conseguiu uma redução em até 8% das perdas em escoamento externo, enquanto (BECHERT et al., 1997) utilizando um canal de óleo para testar diferentes configurações de riblets, observou uma redução de até 9,9%. Isso evidencia a eficácia das estruturas. Porém, mesmo que eficiência dos riblets já tenha sido muito bem estudada em superfícies externas na indústria aeronáutica e naval, sua funcionalidade em escoamento interno de tubulações e em diferentes regimes ainda é pouco explorada. Essa conclusão foi baseada em uma revisão sistemática da literatura, utilizando bases de dados como, Web of Science e Google Scholar, onde foram pesquisados termos relacionados a riblets, escoamento interno e perda de carga. Essa limitação de conhecimento destaca a relevância do presente trabalho. Portanto, o objetivo presente estudos é experimentar o uso de riblets dispostos a cada 200 mm na superfície interna de um trecho reto de tubo liso de 1m e diâmetro de 1" para a redução de perda de carga em escoamento turbulento de água.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

Para se obter uma melhor compreensão de como os riblets podem influenciar na perda de carga, é necessário entender a dinâmica do escoamento interno.

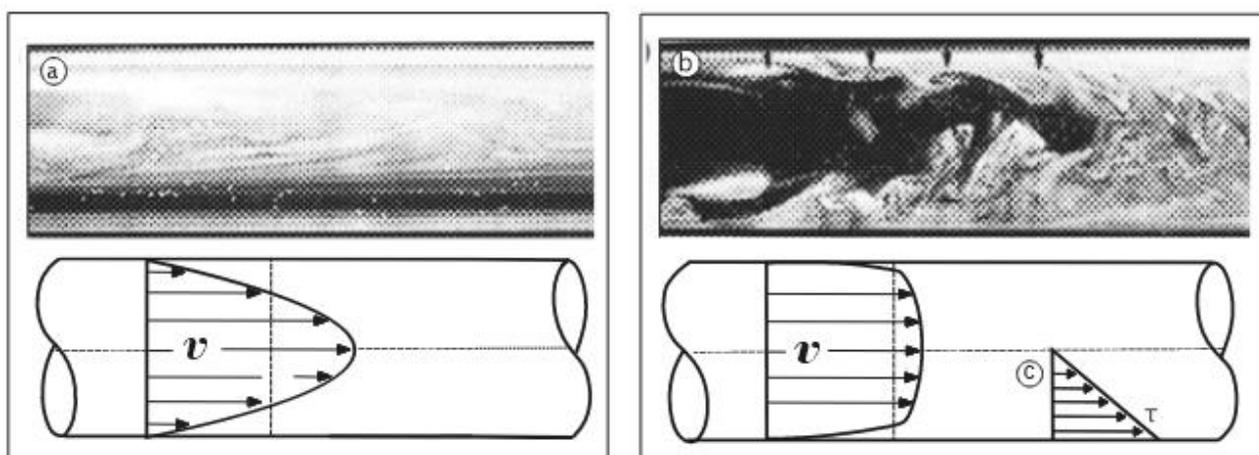
2.1 Escoamento Viscoso Em tubos

Quando um fluido escoar em um duto circular, surgem efeitos viscosos que influenciam o escoamento próximo às paredes. Formam-se camadas-limite devido ao contato do fluido com a superfície interna do duto, desacelerando o fluido que junto à parede, no ponto de contato, o fluido

assume velocidade igual a zero (VILANOVA, 2011 p. 50). No centro do tubo, a velocidade se mantém máxima, com um perfil de escoamento característico dependendo do regime de escoamento. “Além disso, a tensão cisalhante nas paredes e a taxa de queda de pressão ao longo do comprimento do duto permanecerem constantes, caso o fluido seja newtoniano” (WHITE 2011, p. 359).

Um dos parâmetros que influenciam no comportamento da variação de velocidade da seção transversal de uma tubulação é a vazão, que é proporcional a velocidade do fluido. Ao aumentar a velocidade média do escoamento, conseqüentemente há um crescimento do número o número de Reynolds, que é um parâmetro crucial para entender o comportamento de um fluido. (FOX, 2014, p. 442). Na figura 2, é possível observar a comparação entre dois regimes de escoamentos em um tubo de vidro. Na Figura 2 (a) observa-se um escoamento laminar, onde camadas de fluido deslizam suavemente umas sobre as outras, sem misturas ou turbulências. “O perfil de velocidade não é influenciado significativamente pela presença da rugosidade da parede e se matem parabólico com a velocidade máxima no centro” (WHITE 2011, p 373).

Figura 2: Regimes de escoamento em tubo de vidro. (a) Escoamento laminar e seu perfil de velocidade (b) escoamento turbulento e seu perfil de velocidade



Fonte: Adaptado de Cambridge University (1989)

Na figura 2 (b) é notório um escoamento totalmente turbulento tomado de vórtices e flutuações aleatórias. “Nesse regime a rugosidade da parede emerge através da subcamada viscosa e afeta diretamente o gradiente do perfil de velocidade próximo a parede, que se torna maior do que o laminar, transformando-se em um perfil achatado” (FOX, 2014, p. 442).

2.2 Perda de carga ao longo do escoamento

A perda de carga, é a diminuição da pressão total que ocorre em um sistema de tubulação, ela pode ser dividida em dois tipos: a perda de carga linear que ocorre ao longo de uma tubulação retilínea de seção constante, e perda de carga localizada ocasionada por conexões e expansões (LAHIOUEL, 2012). Em escoamentos internos, a perda de carga linear corresponde ao atrito existente do fluido contra a superfície da parede, sendo o foco principal do estudo. Dessa forma,

em condições turbulentas, com a formação de vórtices, a rugosidade existente na superfície interna do tubo, diminui a capacidade de escoamento do fluido (BECHERT, 1997).

Por volta de 1839, um engenheiro alemão chamado Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen (1797 –1884) relatou em seus experimentos o comportamento da queda de pressão em função da vazão em tubulações de latão de 3 metros de comprimento e 6,35 mm de diâmetro. Considerando regime de escoamento laminar com água, e constatando que a queda de pressão Δp variava com a velocidade de forma linear, ou seja $\Delta p \propto \bar{V}$, porém com o aumento da vazão foi evidenciado comportamento diverso, onde Δp variava proporcionalmente com o quadrado da velocidade, assim, $\Delta p \propto \bar{V}^2$. Portanto, concluiu-se que a perda de carga aumenta proporcionalmente com a vazão e conseqüentemente mais rapidamente no escoamento turbulentos. (WHITE, 2011, p. 362; FOX, 2014, p. 442)

Esse comportamento dos fluidos é comumente utilizado nos projetos de dimensionamento do fluxo em tubos de seção circular, a perda de carga linear pode ser expressa, pela equação (1) de Darcy-Weisbach que relaciona a queda de pressão Δp , com o comprimento L , o diâmetro D , a velocidade média do escoamento \bar{V} , o fator de atrito f e a gravidade g . Portanto, a perda de carga tende a crescer ao aumentarmos o comprimento do tubo, a velocidade do escoamento e o fator de atrito. O fator de atrito de Darcy f é geralmente relacionado com a rugosidade da superfície, porém, de maneira alternativa pela equação (2), pode-se relacionar com a densidade do fluido ρ , a velocidade média V , e a tensão de cisalhamento τ . (WHITE, 2011, p 362). No qual o fator de atrito cresce proporcionalmente com os efeitos da tensão cisalhante da parede, essa relação facilita a compreensão da aplicação dos riblets no escoamento interno de tubulações.

$$\Delta p = f \frac{L \bar{V}^2}{D 2g} \quad (1)$$

$$f = \frac{8\tau}{\rho \bar{V}^2} \quad (2)$$

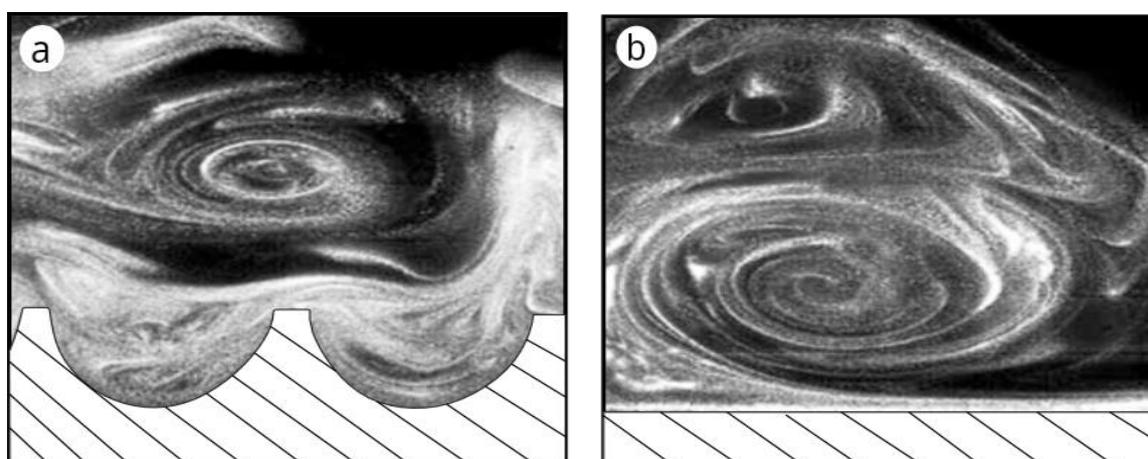
2.2 Funcionalidade dos Riblets

Os riblets inspirados nos denticulos dérmicos dos tubarões, são estruturas que, alinhadas ao fluxo, possuem a capacidade de reduzir o arrasto da superfície. Porém, existem outras estruturas superficiais como a das escamas ósseas do tipo cicloides do peixe voga (*Cyphocarax voga*), que tem uma forma arredondada e com posições sobrepostas, como se fosse um telhado, sendo dispostas contra o fluxo (HAMILTON et al., 2023). O mecanismo de redução do arraste também se encontra presente, existindo uma transição tardia do comportamento turbulento, como se fossem (batentes de vórtices), levando os vórtices a ficarem parcialmente confinados aos vales a jusante das cristas da escama. (BEMVENUTI et al., 2011). Logo, a aplicação dos riblets nas superfícies podem ser contra o fluxo e na direção do fluxo.

O arrasto do fluido cresce significativamente com o aumento da área de superfície, devido às tensões de cisalhamento atuantes sobre essa área. A funcionalidade dos riblets advêm da capacidade de restrição da dispersão lateral dos vórtices na camada limite, como mostra a figura 3.

Diminuindo a troca de momento entre as camadas de fluido e limitando a dissipação de energia na turbulência (DEAN; BHUSHAN, 2010).

Figura 3: Escoamento turbulento em placa plana: (a) vórtices em superfícies com riblets semicirculares, (b) vórtices em superfícies lisas



Fonte: Adaptado de lee e lee (2001)

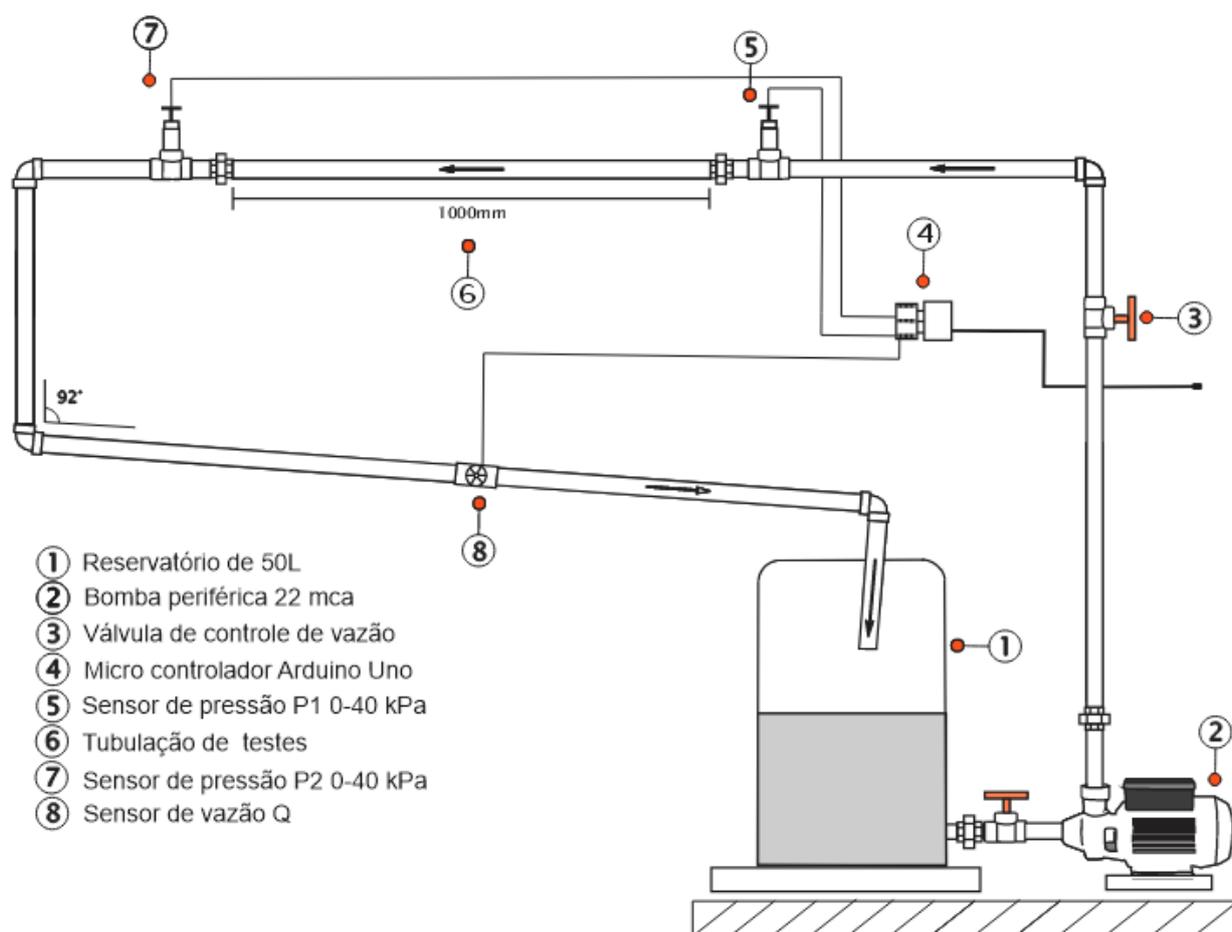
Em escoamentos turbulentos, riblets podem linearizar o movimento dos vórtices, o que aumenta a perpendicularidade ao longo da parede da tubulação e, portanto, reduz o atrito ocorrido a partir do momento transferido dos vórtices. Esse efeito é alcançado, devido a manutenção dos vórtices acima das pontas dos riblets, reduzindo as altas tensões de cisalhamento concentradas apenas nas pontas dos riblets ao invés da maior área integral da superfície, enquanto que nos vales os vórtices secundários ficam parcialmente aprisionados, existindo baixas tensões de cisalhamento devido ao contato fluido-fluido (DEAN; BHUSHAN, 2010; BECHERT et al., 1997).

3. METODOLOGIA

3.1 Bancada experimental

A bancada experimental foi projetada para investigar o comportamento da variação de pressão com variação da vazão do fluido ao longo de uma tubulação de seção circular, avaliando assim, a eficácia dos riblets ao longo do trecho da tubulação na perda de carga. A bancada de testes, conforme ilustrada na figura 4, constituída por um circuito fechado de tubulações em policloreto de vinila (PVC).

Figura 4: Croqui da bancada experimental



Fonte: Dos autores 2024

O sistema foi feito de (4.1) reservatório plástico de 50L que mantém a água disponível durante os experimentos. Para manter um fluxo contínuo de água, utilizou-se uma (4.2) bomba centrífuga periférica com potência de 0,5 CV, vazão (Q) 30 L/min e altura manométrica de 22 mca. Após descarga da bomba, foi montada uma (4.3) válvula de esfera metálica de 1/2" que permitiu controlar a vazão desejada para o circuito. (4.6) A tubulação de testes de material policloreto de vinila (PVC), com comprimento total de 1 metro e diâmetro interno de $(28 \pm 0,05)$ mm.

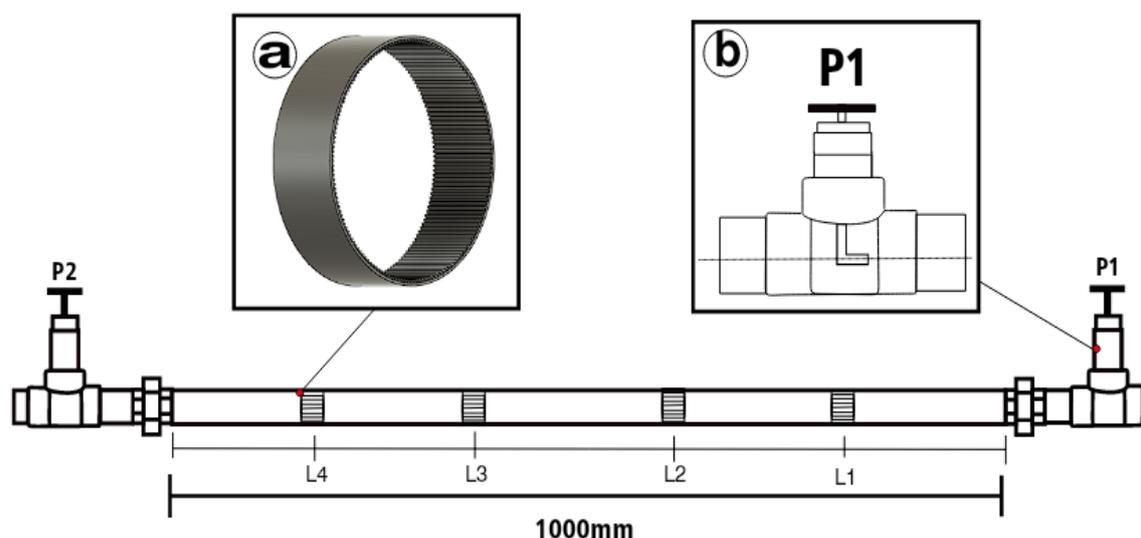
Dois sensores de pressão barométrica P1 (4.5) e P2 (4.7) modelo HX710B, faixa de operação 0-40 kPa foram posicionados nas extremidades da tubulação de testes para medir a queda de pressão ao longo do trecho, um tubo em formato de "L" semelhante a um tudo de Pitot foi conectado aos sensores para obter leituras da pressão dinâmica como mostra a figura 5 (b). Posicionado ao final

do circuito um (4.8) sensor de Fluxo de Água 1/2 YF-S201 com faixa de operação 0-30 L/min. O sistema de aquisição de dados foi automatizado com auxílio de um (4.4) micro controlador Arduino UNO R3, com coleta e transmissão de dados dos sensores de pressão e vazão a cada segundo, enviando os dados para um computador em tempo real. A partir da porta serial e interface gráfica feita em Python 3.0 que recebe os dados e escreve as informações em uma planilha de dados, permitindo análise precisa e organizada das medições ao longo do tempo

3.2 Fabricação dos riblets

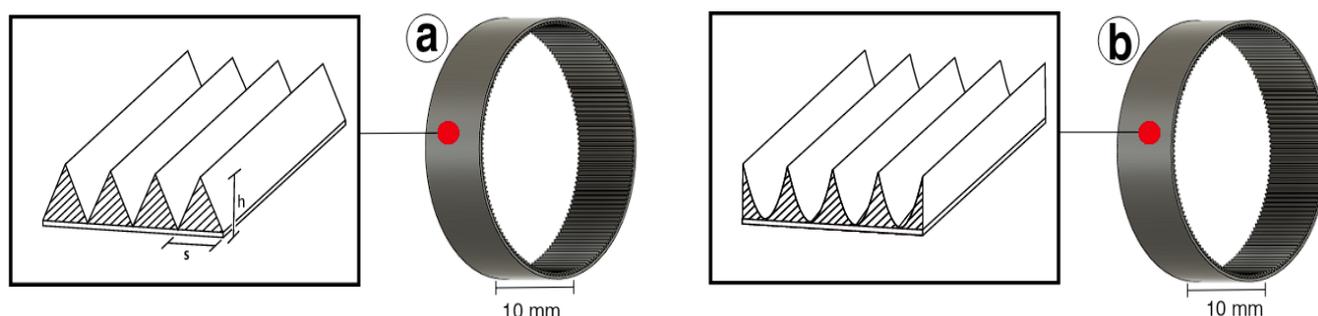
Os riblets propostos utilizam dois mecanismos de redução de atrito, um reduz na direção do fluxo e o outro contra o desnível do batente, combinando os dois mecanismos. Para confeccioná-los, foi necessário o uso de uma impressora com filamento de abs (acrilonitrilo butadieno estireno) e resolução de 0,2 mm, a modelagem foi feita no software Fusion 360. Os riblets foram montados circunferencialmente sobre a superfície interna da tubulação em forma de anéis com ranhuras na direção do fluxo. A redução da área nos anéis gerando batente contra o fluxo (base de impressão dos anéis), o dimensionamento dos anéis teve como largura $L=10$ mm, espaçamento $s = 0,5$ mm e altura $h = 0,5$ mm Figura 6. Para realizar os testes, os riblets circunferenciais foram montados nas quatro seções médias da tubulação para que todos ficassem com o mesmo espaçamento na tubulação, $L1 = 200$ mm, $L2 = 400$ mm, $L3 = 600$ mm e $L4 = 800$ mm figura 5. Trabalhos como os de (WALSH, 1989; BECHERT et al., 1997; LEE e LEE, 2001) testaram diferentes formas de riblets e demonstrando resultados promissores. No trabalho foram escolhidas as geometrias: triangulares e semicirculares, como mostra a figura 6 (a) figura 6 (b).

Figura 5: Posição dos riblets da tubulação de teste (a), sistema de medição da pressão (b)



Fonte: Dos Autores 2024

Figura 6: Modelos de Riblets: Triangulares TRT (a) e semicirculares TRSC (b)



Fonte: Dos autores 2024

3.3 Procedimento experimental

Após preencher o reservatório com 25 L de água a uma temperatura de 22 °C, realizou-se acionamento da bomba centrífuga periférica, ajustando a válvula de controle até que o sensor de vazão indicasse valores estáveis. Foram realizadas 5 coletas de dados para os respectivos valores de vazão: 6; 8; 10; 12; 14 L/min. Após a estabilização da vazão, procedeu-se com medição por 2 minutos. Nesse período, o microcontrolador (Arduino UNO R3) coletou e transmitiu leituras dos sensores de pressão P1 e P2 e vazão Q a cada segundo, armazenando os dados em uma planilha eletrônica. Foram utilizadas 15 amostras de pressão em cada vazão e, posteriormente, efetuou-se a média da vazão e as médias das leituras de P1 e P2. Assim, a variação de pressão Δp foi obtida pela diferença das médias de P1 e P2. Os riblets foram aplicados na superfície interna da tubulação com o auxílio de uma haste de PVC equipada com uma ponta de espuma flexível, permitindo o posicionamento preciso dos riblets nas localizações L1, L2, L3 e L4. Por fim, representou-se graficamente a relação de Δp em função de sua respectiva vazão Q, gerando curvas para cada condição da superfície interna do tubo de teste: tubo liso, com riblets triangulares e com riblets semicirculares.

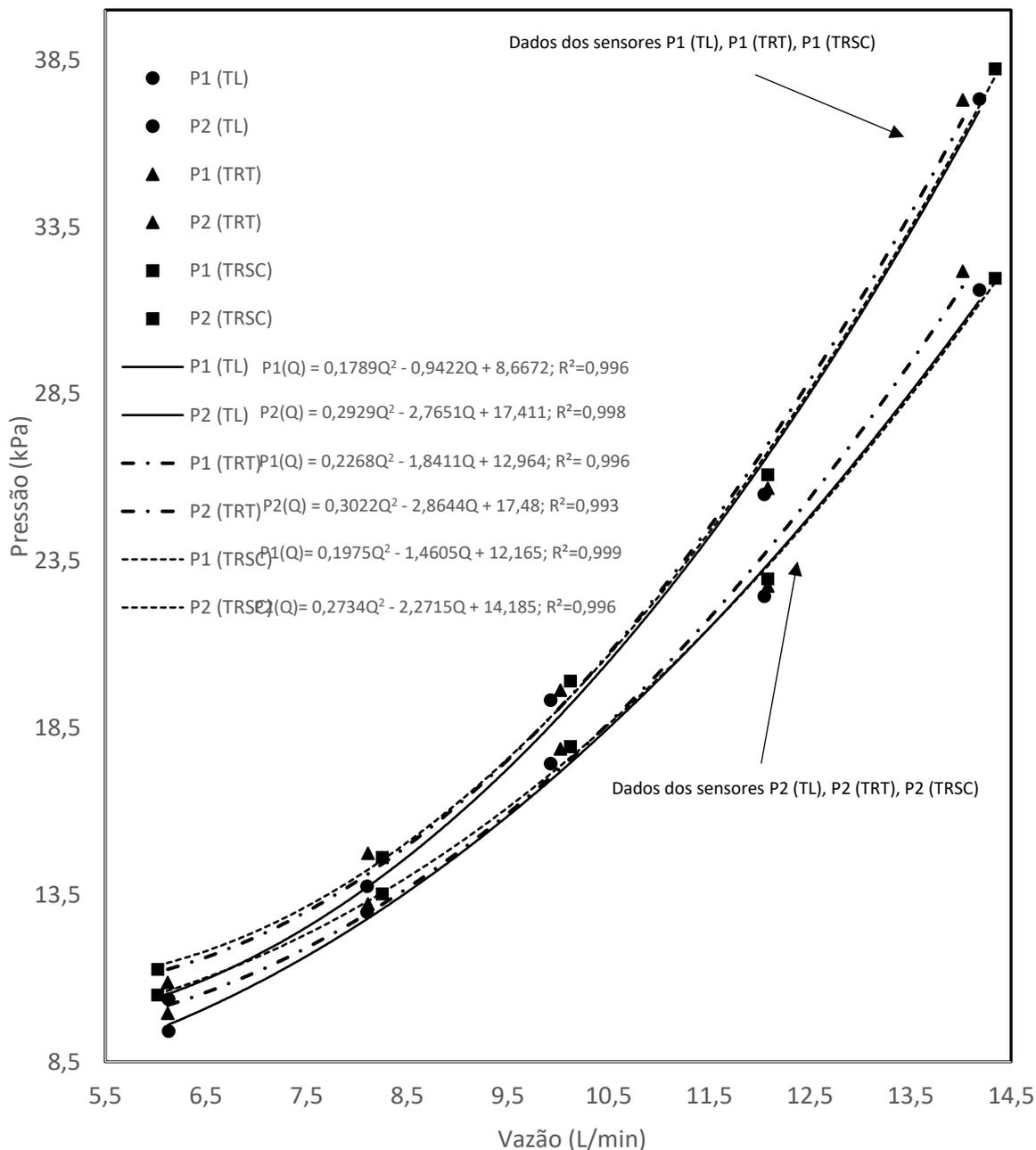
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados experimentais da diferença de pressão ($\Delta p = P1 - P2$) em função da vazão (Q), obtidos na bancada experimental, para diferentes superfícies da tubulação de testes, tubo liso, e riblets triangulares e semicirculares.

O gráfico 1 mostra o comportamento das pressões medidas pelos sensores p1 e p2 ao variar a vazão. Considerando diferentes estados de superfícies internas da tubulação: lisa P1 (TL) e P2 (TL), com riblets triangulares P1 (TRT) e P2 (TRT) e com riblets semicirculares P1 (TRSC) e P2 (TRSC). As três superfícies internas demonstraram um aumento significativo e não linear dos valores de pressão ao aumentar a vazão, evidenciando uma relação direta das forças resistivas e a velocidade do escoamento do fluido. Quando o sistema aumenta a vazão do fluido, percebe-se que a diferença entre as pressões em todas as superfícies analisadas cresce. O aumento da velocidade média do

escoamento gera uma intensificação do gradiente de pressão ao longo da tubulação, indicando maior resistência do escoamento e conseqüentemente uma maior perda de carga no sistema.

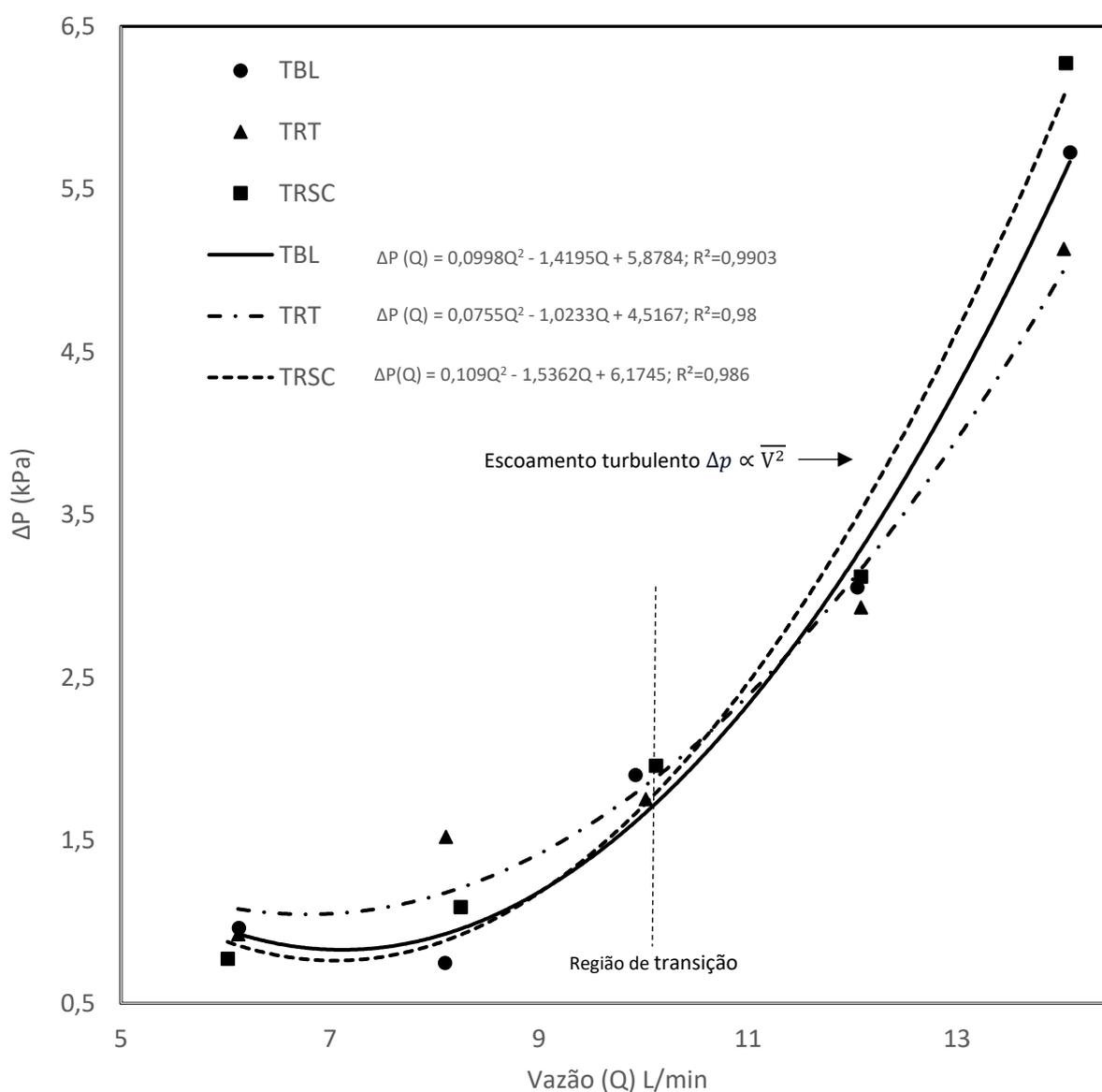
Gráfico 1: Pressão medida pelos sensores P1 e P2 em função da vazão para diferentes superfícies: Tubulação Lisa (TL), Tubulação com Riblets Triangulares (TRT) e Tubulação com Riblets Semicirculares (TRSC)



Fonte: dos autores (2024)

O gráfico 2 demonstra em comportamento quadrático e crescente da perda de carga com o acréscimo da vazão, este resultado é previsto teoricamente, e coerente com os resultados experimentais de G.H.L. Hagen, afirmando que a perda de pressão em escoamentos turbulentos é proporcional ao quadrado da velocidade. Para vazões entre de 5 a 6 L/min os fluxos são menos turbulentos e com menor impacto das forças viscosas. Porém, à medida vazão aumenta para 10, 12 e 14 L/min, o regime se torna cada vez mais turbulento, aumentando os efeitos da rugosidade da parede e das forças viscosas no fluido.

Gráfico 2: Comparação da perda de carga dos riblets triangulares (TRT), semicirculares (TRSC) e a tubulação lisa (TL) em função da vazão



Fonte: dos autores (2024)

Além disso, os vórtices e flutuações aleatórias tornam-se frequentes ao aumentar o fluxo turbulento, gerando desorganizações nos campos de velocidade das camadas do fluido mais próxima da superfície da tubulação. O gradiente de forças cisalhantes é intensificado devido as forças viscosas e a rugosidade da parede da tubulação. Esses fenômenos dissipam a energia que seria usada para transportar o fluido, logo a energia mecânica se converte em diferentes formas como ruído e energia térmica de modo que há um aumento expressivo na perda de carga quando se aumenta a vazão.

Comparando os resultados obtidos na superfície interna com riblets semicirculares aderidos nas seções L1, L2, L3 e L4, com a superfície lisa, os riblets semicirculares apresentam maior perda de carga ao aumentar a vazão. Para 8 L/min houve um aumento de 40,9%, para 14 L/min 9,56%, indicando que a estrutura não tem efeitos positivos para mitigar essa perda de energia. Prioritariamente, esse desempenho pode ser relacionado devido ao tamanho dos riblets, que possuem apenas 10 mm de comprimento, dispostos em 4 seções da tubulação, portanto, aumentar o tamanho e quantidade poderia trazer resultados mais promissores.

Outro fator que pode contribuir para esses resultados é que ao aumentar o perfil turbulento do escoamento, os riblets podem estar interagindo com vórtices secundários, aumentando a resistência do fluido. A geometria semicircular pode não ter ficado bem definida durante as impressões 3D de filamento, devido a limitações no processo de fabricação ou na precisão da impressora, contribuindo para uma maior rugosidade superficial. Outra hipótese que pode contribuir para esses resultados, são os vales e arestas pouco definidas, que não estão promovendo a canalização dos vórtices nem a concentração das forças cisalhantes nas pontas dos riblets, consequentemente gerando maior dispersão e troca de momento na subcamada viscosa.

Os riblets triangulares aplicados nas posições L1, L2, L3, L4 demonstraram indícios significativos de uma redução na perda de carga com o acréscimo da vazão. Para a vazão de 6 L/min houve uma redução na perda de carga de 4%, com 12 L/min houve uma redução de 7,81% e 14L/min houve uma redução de 10,35% na perda de carga. A geometria triangular dos riblets estão linearizando o fluxo de água nos vales, e não permitindo que os vórtices interajam com as camadas mais afastadas da subcamada viscosa, assim diminuído os efeitos da tensão cisalhante na parede havendo fluxo nas pontas dos perfis.

As perdas de carga ocasionadas pelos riblets seguem uma tendência similar a curva do tubo liso, esses resultados indicam que apesar que a mitigação da perda de carga ser visível, ainda é limitada devido a diferença pequena. Fatores como altura e espaçamento dos riblets podem ser ajustados para maximizar os resultados. É importante destacar a necessidade de mais experimentos e melhorias na bancada experimental para averiguar a real eficiências das estruturas.

Comparando os resultados (TRT) e (TRSC), percebe-se uma distinção na eficiência entre riblets triangulares e semicirculares. O triangular indicou ter uma maior eficiência, e o semicircular um aumento progressivo na perda de carga. No entanto, a diferença entre a geometria dos riblets não é tão significativa, o que limita conclusões definitivas sobre a eficiência das estruturas, e não podem ser generalizadas para outras condições de operação sem estudos complementares.

Como comportamento do escoamento turbulento é altamente sensível, variável e complexo, fatores como espaçamento e altura das ranhuras, as propriedades do fluido utilizado, podem influenciar significativamente nos resultados. Assim, os resultados apresentados devem ser analisados com

cautela mesmo apresentando indícios animadores. As variações da perda de carga entre as geometrias dos riblets podem ser influenciadas por fatores experimentais, como precisão de impressão 3D, padronização dos riblets e eventuais imperfeições. Para chegar a uma conclusão final do comportamento das estruturas seria necessários novos testes diversificados, incluindo novos formatos de riblets e diferentes dimensões de tubulação.

5 CONCLUSÃO

Os resultados indicaram que os riblets triangulares para vazões de 12 L/min apresentaram uma redução de 7,8% na perda de carga, e para vazões superiores a 14 L/min, uma redução de até 10,35% em comparação com a superfície lisa da tubulação de testes. Entretanto, a geometria semicircular não demonstrou ser propícia para mitigar a perda de carga, já que para vazões acima de 8 L/min houve um aumento de 40,9% nas perdas. Esse resultado pode estar relacionado à pouca padronização dos riblets, ao tamanho limitado das estruturas e à interação com vórtices, gerando uma maior troca de momento entre as camadas de fluido no segundo perfil. Conclui-se que a geometria triangular dos riblets apresenta maior eficiência na redução da perda de carga em comparação com os riblets semicirculares e com os tubos lisos. Para trabalhos futuros, sugere-se explorar novas geometrias, tamanhos e espaçamentos, bem como avaliar o desempenho em tubulações com maior diâmetro e comprimento.

Além disso, a análise da aplicação prática dessas superfícies na indústria de transporte de fluidos requer investigações adicionais, incluindo testes em condições industriais reais e a viabilidade econômica das modificações nas tubulações. Este estudo apresenta algumas limitações, como o tamanho reduzido dos riblets e o controle limitado da precisão geométrica durante o processo de fabricação, fatores que podem ter influenciado os resultados. Trabalhos futuros devem buscar superar essas limitações por meio de técnicas mais avançadas de fabricação e modelagem computacional. Além disso, o impacto das condições de fluxo, como velocidades mais altas, fluidos de maior viscosidade e interações entre vórtices em condições mais complexas, deve ser mais bem explorado.

6 REFERENCIAS

BENYUS, Janine M. **Biomimética: inovação inspirada pela natureza**. 1. ed. São Paulo: Cultrix, 2003.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

SILVA TELLES, José. **Tubulações industriais: cálculo**. 2. ed. São Paulo: Editora Técnica, 2023.

VILANOVA, Luciano Caldeira. **Mecânica dos fluidos**. 3. ed. Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011.

WHITE, Frank M. **Mecânica dos fluidos**. 6. ed. Tradução de Mario Moro Fecchio e Nelson Manzaneres Filho. Revisão técnica de José Carlos Cesar Amorim. Porto Alegre: AMGH, 2011.

BHUSHAN, Bharat; DEAN, Brian. Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 368, n. 1929, p. 4775–4806, 2010. DOI: 10.1098/rsta.2010.0201.

HAMILTON, B. W.; TUTUNEA-FATAN, O. R.; BORDATCHEV, E. V. Drag reduction by fish-scale inspired transverse asymmetric triangular riblets: modelling, preliminary experimental analysis and potential for fouling control. *Biomimetics*, v. 8, n. 3, p. 324, 2023.

LAHIOUEL, Y.; HADDAD, A. K.; CHAOUI, K. Evaluation of head losses in fluid transportation networks. *Sciences & Technologie B*, n. 23, p. 89–94, 2005.

LEE, Chongyoup; LEE, Sangyeop. Flow visualization of vortex formation and suppression using riblets. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 441, p. 153-166, 2001.

LI, Entian; HU, Xiang; YAO, Pei. Drag reduction of rectangular riblets in a positive pressure gradients duct flow. *U.P.B. Scientific Bulletin, Series D*, v. 81, n. 1, p. 191-206, 2019.

LI, Wen; WEAVER, James C.; LAUDER, George V. Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function. *The Journal of Experimental Biology*, v. 217, p. 1656-1666, 2014.

MARTINEZ, C. B.; LOPES, K. G. O.; COELHO, M. M. L. P. Impacto da evolução da perda de carga na geração de PCHs. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, 2008.

MOTA, P. J. Anatomy and functional morphology of dermal collagen fibers in sharks. *Copeia*, v. 1977, n. 3, p. 454–464, 1977.

REIF, W.-E. Morphogenesis and function of the squamation in sharks. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie - Abhandlungen*, v. 164, n. 1/2, p. 172–183, 1982. DOI: 10.1127/njgpa/164/1982/172.

WALSH, M. J. Riblets as a viscous drag reduction technique. *AIAA Journal*, v. 21, n. 4, p. 485-486, 1983.

WILLEMSSENS, Eric. Estudo de redução de arraste no escoamento turbulento de água em duto quadrado ranhurado. Relatório PIBIC. Orientador: Luis Fernando A. Azevedo. **Departamento de Engenharia Mecânica**, PUC-Rio, 2013.

BECHERT, D. W.; BRUSE, M.; HAGE, W.; VAN DER HOEVEN, J. G. T.; HOPPE, G. Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 338, p. 59-87, 1997. DOI: 10.1017/S0022112096004673