

2

Revisão Bibliográfica

Na literatura, embora não tão vasta quanto no caso de fluidos newtonianos, diversas investigações relacionadas ao comportamento térmico de escoamentos de fluidos não newtonianos podem ser encontradas. A maioria destes trabalhos trata de análises teóricas ou simulações numéricas, que contam com escassos dados experimentais para sua validação. Esta escassez de dados experimentais retrata notável lacuna na literatura, a qual, provavelmente, está vinculada à dificuldade em se monitorar com confiabilidade os diversos aspectos do escoamento de fluidos com comportamento tão complexo.

Para a geometria tubo circular, estudada no presente trabalho, as conclusões de estudos apresentados na literatura, quando se reportam ao caso de aquecimento de fluidos viscoplásticos em escoamento interno, não diferem muito entre si. Basicamente, na região de completo desenvolvimento os números de Nusselt convergem para o valor teórico indicado pela relação sugerida por Bird [4]. Já para o caso de escoamento de tais fluidos no interior do espaço anular e sob aquecimento, para diferentes condições de contorno e escoamento completamente desenvolvido, enquanto alguns autores destacam a influência de parâmetros reológicos no processo de aquecimento do fluido, outros argumentam que estes parâmetros não são relevantes em tal processo. As tendências à divergência ou concordância nas conclusões das pesquisas afins ao presente trabalho estão evidenciadas a seguir, para os casos de escoamento em tubo e espaço anular.

2.1

Escoamento em Tubo

Nouar *et al.* [23] apresentaram um estudo numérico sobre a convecção térmica em fluidos do tipo Herschel-Bulkley. A análise foi feita para convecção forçada em dutos cilíndricos, levando-se em consideração a influência da temperatura no índice de consistência K do fluido. Como resultado

apresentaram correlações para o número de Nusselt local em função de parâmetros adimensionais (índice *power-law*, razão entre os raios da região não cisalhada no fluido e o do tubo, razão entre perdas de carga nas hipóteses de propriedades físicas constantes e variáveis).

Soares *et al.* [34] analisaram a transferência de calor em tubos curtos, na região de entrada, para fluidos Herschel-Bulkley. Foi feita uma simulação numérica para regime laminar, sob condições de contorno de fluxo de calor e temperatura da parede constantes. Foi verificado que, nas duas condições de contorno estudadas, a tendência do número de Nusselt é similar, porém, os valores são mais altos para a condição de fluxo de calor constante.

Shin [31] investigou analiticamente o efeito da condutividade térmica na transferência do processo de transferência de calor de um fluido não newtoniano, num escoamento interno a um tubo de seção transversal circular. O autor considerou um fluxo de calor constante e estudou a região termicamente desenvolvida do escoamento. Foi verificado que, em um tubo, a taxa de cisalhamento apresentou um perfil parabólico e, conseqüentemente, a condutividade térmica do fluido também, pois esta é dependente da taxa de cisalhamento. Logo, com o aumento da condutividade térmica do fluido, próximo à parede do tubo a transferência de calor também aumenta.

Para fluidos pseudoplásticos escoando em tubos, Scirocco *et al.* [30], a partir de um trabalho experimental apresentaram uma correlação para Nusselt, onde é inserida a contribuição do fluxo de calor. Os dados experimentais mostraram que os resultados se agrupam de acordo com o nível do fluxo de calor, indicando que quanto maior o fluxo de calor uniformemente distribuído na parede, maiores serão os valores de Nu , para um mesmo número de Reynolds.

Vradis *et al.* [37] apresentaram resultados de simulação numérica da transferência de calor para plásticos de Bingham na região de entrada de tubos, constatando a influência do número de Bingham nas características do escoamento e na transferência de calor. Foi identificada uma fraca dependência do Nu com o número de Bingham na região de entrada. Por outro lado, o número de Brinkmann acentua o valor de Nusselt, ficando este aproximadamente uma ordem de grandeza mais elevado do que quando se negligencia o efeito da dissipação viscosa, em baixos números de Reynolds.

Um fator de correção para o Nu de fluidos pseudoplásticos (com relação ao Nu para fluidos newtonianos) escoando internamente a tubos, os quais estejam sob fluxo de calor uniforme na parede, foi confirmado por Joshi e Bergles [12]. Este fator já havia sido determinado por Mizuna *et al.* [20]. Tal fator de correção é função do índice de comportamento do fluido.

Analisando as influências da geometria, viscosidade e índice de comportamento no número de Nusselt para fluidos escoando entre placas planas e no interior de tubos, em diferentes condições de contorno, Wichterle [38] relata uma concordância entre o fator de correção (a partir do Nu para fluido de comportamento newtoniano) determinado para o Nu do caso de fluidos não newtonianos, com uma correlação apresentada por Sieder e Tate [32], na qual também é considerada a variação da viscosidade do fluido, para um fluido que segue o comportamento *power law*, em regime laminar, completamente desenvolvido e sob convecção forçada em tubos.

Barletta [2] desprezou a condução axial e estudou o efeito da dissipação viscosa em escoamento interno a um tubo. Dentre as suas conclusões, o autor afirma que na região de completo desenvolvimento, na condição de contorno de convecção na parede do tubo, o Nu se iguala ao Nusselt do caso de fluxo de calor uniformemente distribuído na parede, na região completamente desenvolvida.

Na condição de contorno de temperatura uniforme na parede do tubo, na região de completo desenvolvimento, Khatyr *et al.* [13] concluíram, numa investigação analítica sobre a dissipação viscosa do plástico de Bingham, que a tensão de escoamento é relevante na transferência de calor.

2.2

Escoamento em Espaço Anular

Sobre a transferência de calor em espaços anulares, Soares E. [35] fez um estudo do comportamento de um fluido do tipo Herschel - Bulkley. O autor analisou os casos de fluxo de calor constante e temperatura constante na parede interna do anular, enquanto, em ambos os casos, a parede externa mantinha-se adiabática. O autor concluiu que a tendência da variação do número de Nusselt (Nu) com os adimensionais Peclet (Pe) e Reynolds (Re) para as duas condições de contorno estudadas são semelhantes. No caso de fluxo de calor constante na parede interna, o número de Nusselt apresentou-se mais sensível ao número de Peclet do que no caso de temperatura constante na parede interna. O efeito observado foi um aumento do Nu à medida que Pe cresce. Nesta mesma condição de contorno não foi observada significativa variação de Nu com Re . Quanto aos parâmetros reológicos τ_0 , a tensão de escoamento do fluido e n , o índice de comportamento, foi verificado que ambos causam um aumento no número de Nusselt à medida que seus valores se afastam daqueles de comportamento Newtoniano. Para o caso de temperatura constante na parede interna do anular ocorreu esta

mesma tendência, entretanto, com menor sensibilidade do Nu . Também foi observada a influência da razão de raios, onde foi concluído que aumentando-se a diferença entre os raios interno e externo do anular, reduz-se o gradiente de velocidade na parede, causando uma diminuição do coeficiente de troca de calor convectivo.

Recentemente, Soares *et al.*[36], analisando a transferência de calor em fluidos viscoplásticos, ao escoarem em espaços anulares, verificaram que os parâmetros reológicos não interferem na transferência de calor. Os autores mostram uma correlação que determina o número de Nusselt para a parede interna do anular que depende somente da geometria.

Num estudo analítico, feito por Nascimento *et al.* [22] para quatro condições de contorno diferentes para troca de calor ao longo do escoamento em espaço anular, para diferentes razões de raios e números de Bingham (tensão de escoamento adimensional), foi observado que a reologia do fluido influenciou o número de Nusselt. Os autores se basearam num fluido de comportamento do tipo plástico de Bingham, e constataram um aumento do Nu quando o número de Bingham cresce, na região de entrada. Já para a região completamente desenvolvida, este efeito praticamente se extinguiu. Quando o número de Bingham aumentou, a região de plug flow também aumentou, fazendo com que os gradientes de velocidade próximos às paredes se tornem mais elevados, intensificando assim a troca de calor, resultando em maiores Nu 's. Para a condição de contorno de terceira espécie, isto é, temperatura uniforme numa parede enquanto a outra é mantida adiabática, à medida que a razão de raios diminuiu, o Nu da parede interna foi ficando mais alto do que na externa, devido aos gradientes de velocidade na parede interna serem maiores. Observaram também que, aumentando-se as razões de raios, o número de Nusselt nas duas paredes tendem a se aproximar, porque há uma melhor distribuição do fluido na seção, proporcionando melhor simetria.

Naimi *et al.*[21] estudaram a transferência de calor num fluido Herschel-Bulkley, porém, para um escoamento Couette-Taylor-Poiseuille. A partir dos dados experimentais propuseram uma correlação para determinar o coeficiente de troca de calor convectivo local, através do número de Nusselt, escrito em função dos números de Prandtl e Taylor. Neste trabalho foi utilizada uma correlação anteriormente apresentada por Joshi e Bergles [12], que consideraram termodependente o índice de consistência K do fluido.

Em outro estudo Nouar *et al.* [24] apresentaram resultados de trabalho numérico e experimental da transferência de calor para um fluido de Herschel-Bulkley (Carbopol 940) escoando em um espaço anular. Nesta

pesquisa o cilindro interno girava enquanto o externo mantinha-se fixo. Mantendo a parte externa submetida a um fluxo de calor uniforme e a parede interna adiabática, os autores avaliaram o efeito do comportamento reológico do fluido, bem como da rotação do cilindro no campo de escoamento e no coeficiente convectivo de troca de calor. Foram supostas constantes as propriedades físicas do fluido e o escoamento completamente desenvolvido. Os autores concluíram que o índice de consistência K do fluido modifica o coeficiente de troca de calor, pois, se K diminui, próximo à parede aquecida, há uma reorganização do escoamento. Mas, experimentalmente, tal influência não foi muito marcante, pois o fluido utilizado no trabalho foi levemente termodependente. Observou-se que quando a região de *plug flow* estava próxima à parede externa do anular, a temperatura desta parede aumentou consideravelmente, reduzindo assim o coeficiente de troca de calor.

Sayed-Ahmed [29] analisou a transferência de calor em regime laminar para um fluido não newtoniano cujo comportamento é representado pelo modelo Robertson-Stiff. A geometria é um espaço anular, sendo o tubo interno girante com velocidade angular constante. O escoamento analisado foi laminar, completamente desenvolvido, sob convecção forçada. Observou-se que quando a parede externa do anular é adiabática e a interna está a temperatura uniforme, para fluidos newtonianos o número de Nusselt é constante dentro de uma dada faixa de número de Reynolds. Nestas mesmas condições, se o fluido for não newtoniano, o Nusselt diminui e o seu valor torna-se constante dentro de uma faixa mais larga de números de Reynolds. Além disso, para esta condição de contorno a diminuição do índice de comportamento do fluido aumenta o valor do número de Nusselt.

Khellaf *et al.* [14] também investigou, numericamente, a transferência de calor em espaço anular, mas para um fluido de comportamento segundo o modelo Carreau. Neste trabalho, o tubo interno é girante e está aquecido. O tubo externo está em repouso e resfriado, com as extremidades isoladas. São tubos curtos em posição vertical. Observou-se que os efeitos do comportamento *shear-thinning* do fluido acarretam a diminuição do fator de atrito no cilindro girante e o aumento da taxa de transferência de calor através do espaço anular, independentemente do regime de escoamento.

Nouar *et al.* [25] realizaram uma análise experimental e numérica da transferência de calor num espaço anular, cujo fluido circulante (não newtoniano) estava submetido à convecção livre e forçada. Neste caso ambas as paredes do anular estavam expostas a um fluxo de calor uniforme. O fluido utilizado foi o descrito pelo modelo *power-law* e foram levadas em consideração as variações das propriedades reológicas do fluido com a

temperatura. Neste estudo observaram que no caso da convecção forçada, na região de entrada térmica, o aumento do número de Nusselt devido à diminuição do índice de consistência K na região próxima às paredes tornou-se mais relevante para o fluido mais *shear thinning*. Quando o índice de consistência não varia e, sendo o caso de convecção mista, observaram que a convecção forçada é o mecanismo dominante na transferência de calor até uma determinada posição axial do anular. Após esta posição "crítica" (que depende do K do fluido), a convecção natural dominou. Já quando o índice de consistência variou, em convecção mista, a região do anular dominada pela convecção forçada foi menor do que no caso anterior.

Manglik [18] e [19] publicaram investigações sobre a influência da excentricidade e do índice de comportamento do fluido escoando em espaço anular, para diferentes razões de raios e nas condições de contorno de fluxo de calor uniforme numa parede, enquanto a outra está isolada. Também analisaram para o caso de temperatura constante numa parede enquanto a outra é mantida adiabática. Em decorrência das possíveis assimetrias do perfil de velocidades no anular, o autor verificou que os gradientes de temperatura são afetados, implicando o enfraquecimento dos coeficientes convectivos. Na região de folga maior os perfis de temperatura radial são mais aguçados, enquanto que na folga menor o perfil de temperatura tende a ser mais uniforme e aproxima-se da temperatura do tubo interno quando a excentricidade é muito grande. Porém, embora sejam altos os gradientes de temperatura radial na região de maior folga, quanto maior a excentricidade, menos intensos vão ficando estes gradientes, contribuindo para uma maior diminuição dos coeficientes convectivos.