Transporte de mistura bifásica óleo-água em unidade de bancada experimental

Luis Roberto Santini Mello[1], Deovaldo Moraes Jr[2] ; Aldo Ramos Santos[2]

[1]Aluno do Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica na Universidade Santa Cecília, Santos, BR
[2] Professores do Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica na Universidade Santa Cecília, Santos, BR

O *Core Annular Flow* (CAF), transporte de óleo em duto envolto por um anel de água, baseia-se no princípio natural da imiscibilidade de fluidos com diferentes densidades e viscosidades. A constante necessidade de se transportar óleo cru através de extensos oleodutos das zonas produtoras para as refinarias ou portos tem no CAF um importante aliado que pretende através da sua utilização reduzir os gastos com bombeamento se comparados aos utilizados atualmente. Este estudo teve como objetivo geral a construção de uma unidade experimental para estudar o escoamento bifásico óleo-água. Como objetivo específico visou determinar, em escala de bancada, as potências necessárias aos conjuntos moto-bomba e as perdas de carga em um escoamento bifásico óleo-água, com a formação de padrões CAF visíveis sem auxílio de instrumentos óticos auxiliares. Foram empregadas na unidade experimental: a) duas bombas regenerativas, acionadas por motores elétricos de 1 hp e 2 hp, com rotações controladas por inversores de frequência; b) injetor em acrílico destinado a formação do anel de água externo ao óleo; c) tubulação e curvas de PVC transparente de 1" de diâmetro; d) manômetros digitais e analógicos; e) piezômetro diferencial pressurizado; f) rotâmetro; g) placa de orifício com manômetro em "U"; h) caixa de acrílico de 30 litros, com anéis de *Rasching* de 1"; i) caixa de separação em acrílico transparente com capacidade para 270 litros; g) tanque de acrílico de 90 litros para água e outro de 70 litros para óleo. Foi obtido o padrão CAF a partir de vazões de água de 0,4 m³/h e de óleo de 0,59 m³/h, com redução de perda de carga de 24 vezes e economia na potência das bombas de 1,16 vezes.

Palavras chave
Escoamento bifásico, Escoamento anular, Perda de carga, Potência requerida.

Oil-water bifasic flow in a bench scale experimental unit

The Core Annular Flow (CAF), oil duct transportation surrounded by a ring of water, is based on the natural principle of non-miscibility of fluids with different densities and viscosities. The constant need of transporting crude oil through extensive pipelines either from producing areas to refineries or harbour, has in the CAF an important ally that intends to reduce, with its appliance, the pumping costs compared nowadays. This job had as general objective to build an experimental unit to study of the oil-water two-phase flow. As a specific objective aimed to determine, in bench scale, the needed power to the motor pump set and the head loss in oil-water two phase flows with the formation of CAF patterns, visible without the aid of optical instruments. At the experiment were used: a) two regenerative pumps, driven by 1 hp and 2 hp electric motors, controlled by frequency inverters; b) acrylic gadget responsible for the formation of external ring of water in the oil; c) 1" diameter pipe and curves of transparent PVC; d) digital and analog pressure gauges; e) differential pressure piezometer; f) flow meter; g) orifice plate with pressure gauge in "U"; h) 30 liters acrylic box, with 1" Rasching rings; i) separation box in transparent acrylic with a capacity of 270 liters; g) Acrylic tank of 90 liters for water and another of 70 liters for oil. The CAF was obtained

from water flow rates from 0.4 m³/h and oil from 0.59 m³/h, with a reduction of head loss of 24 times and power pump saves as low as 1.16 times.

Keyword
Biphasic flow, Core annular flow, Head loss, Required power.

Introdução

Descobertas recentes no litoral sudeste brasileiro, no sítio conhecido como pré-sal, aumentaram exponencialmente as reservas de hidrocarbonetos no Brasil. Muito se tem feito na área de prospecção, extração e refino, porém o transporte do óleo cru, através de grandes extensões ainda depende basicamente de oleodutos ou grandes embarcações, em escala muito menor o transporte ferroviário pode ser utilizado.

Em razão da grande semelhança entre o trabalho desenvolvido na extração do petróleo dos poços profundos e o bombeamento do mesmo através de oleodutos, muitas destas técnicas são comuns em ambas as aplicações e remonta ao início do século passado a primeira patente de *Isaacs e Speed* (1904) que se tem notícia a utilizar a água como fluido auxiliar no escoamento de produtos altamente viscosos através de tubulações. *Joseph, Chen e Renardy* (1997), caracterizaram os diversos padrões de escoamento apresentados durante seu experimento, tanto para tubulações horizontais como para as verticais, decorrentes das variações de velocidade e pressão dos fluidos, conforme apresentado na Figura 1.

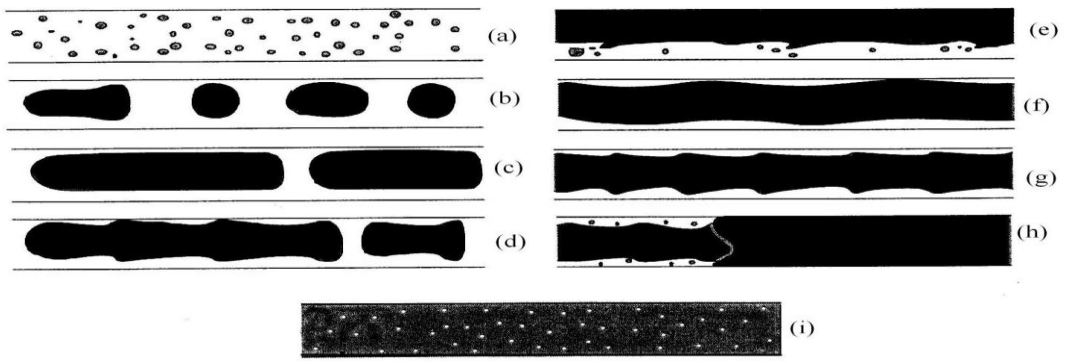

Figura 1 – Padrão de escoamento típico para tubos horizontais óleo/água (*JOSEPH, CHEN e RENARDY*, 1997); a) Dispersão ou emulsão de óleo em água; b) Gotas alargadas ou esféricas de um fluido em outro; c) Intermitente; d) Intermitente; e) Estratificado; f) Anular ondulado; g) *Wavy Core Annular Flow, Core-Flow ou Bamboo Waves*; h) *Wavy Core Annular Flow* com dispersão de bolhas; i) Dispersão de água em óleo.

A técnica conhecida como *Core Annular Flow* (CAF), porém só veio a ser utilizada comercialmente na década de 1970, pela *Shell*, em um oleoduto em *Bakersville, Califórnia, USA,* com 150 mm de diâmetro e 38 km de extensão. Funcionou por 12 anos, com vazões de até 24.000 barris/dia. O CAF baseia-se no princípio natural da imiscibilidade da água com outros fluidos mais viscosos e com densidades mais baixas. O fluido menos viscoso deve formar uma película anular em torno do fluido mais viscoso, de modo a "lubrificar" o seu escoamento pela tubulação que os suporta. Desta forma, a perda de carga devido ao atrito do fluido menos denso com as paredes do tubo é reduzida drasticamente necessitando de conjuntos moto/bomba menos potentes para percorrer igual distância com a mesma vazão final.

Com a utilização do CAF, elimina-se a necessidade de constantes reaquecimentos dos fluidos ao longo do percurso ou a sua diluição com solventes, processos hoje utilizados para diminuir a viscosidade do óleo cru transportado através de oleodutos. O grande entrave existente a uma maior disseminação do CAF, em oleodutos longos, está na manutenção dos padrões de escoamento ao longo da topografia existente no percurso do mesmo. A necessidade de

controle acurado destes padrões é de vital importância para o êxito da operação. *(Bannwart, et al.,* 2004).

Materiais

Para a realização dos ensaios, foi montada em escala de bancada conforme Figura 2 e respectivo esquema na Figura 3, experimento composto de 2 bombas regenerativas (bomba turbina), assim denominada devido ao seu rotor desenvolver energia de pressão pela recirculação do fluido em uma série de palhetas giratórias (*Macintyre,* 2010), acionadas por motores elétricos de 1 hp e 2hp, respectivamente para água e óleo, cujas rotações foram controladas por inversores de frequência; 10 metros de tubulação e 5 curvas de 90º de PVC transparente de 1" de diâmetro; injetor de acrílico destinado à formação do anel externo de água ao fluxo do óleo; caixas de acrílico transparente para água (90 litros), óleo (70 litros), separação óleo/água (270 litros) e pré-separação (30 litros), esta preenchida com anéis de *Rasching* de 1" em polipropileno, cuja função foi de quebrar o jato da mistura óleo/água e evitar o aumento da emulsão dos mesmos; rotâmetro para medição da vazão de água de 2 a 20 Lpm (litros por minuto); manômetros digitais e analógicos; piezômetro diferencial pressurizado, para obtenção das perdas de carga do sistema; água fornecida pela *SABESP* e óleo lubrificante *Lubrax Gear ISO* 680, com densidade medida a 20°C relativa à água a 4°C (20/4°C) igual a 0,917, viscosidade a 40°C igual a 673 cSt, equivalente a um petróleo cru de 20,8°API. Os motores foram montados em balanço, com seus eixos apoiados sobre rolamentos de maneira a que se pudesse determinar a potência necessária, através de uma haste perpendicular (alavanca) na qual foi acoplado um dinamômetro. Conhecendo-se *n,* a rotação do motor em rps (rotações por segundo), obtida através de tacômetro, *F* a força em N (Newtons) exercida no dinamômetro, *d* a distância entre o centro do eixo do motor e o dinamômetro (alavanca) em m (metros), é possível determinar-se *P* a potência utilizada em W (Watts), usando-se a Equação 1 (*Moraes;Moraes,* 2011).

$$P = 2.\pi.n.F.d \qquad (1)$$

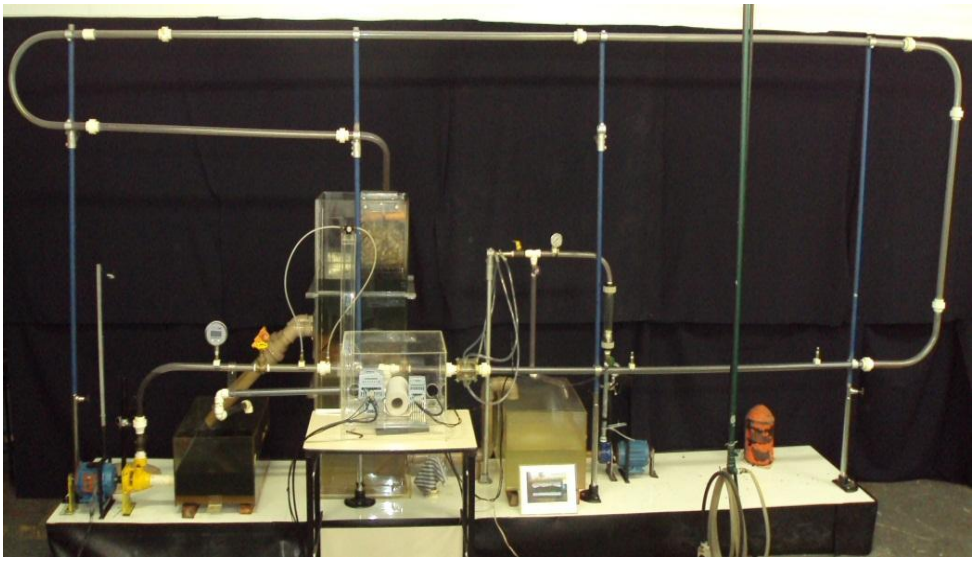

Figura 2 – Foto do Experimento

Métodos

Os ensaios realizados visaram determinar as potências necessárias aos conjuntos moto bombas, para a obtenção de padrões CAF no transporte de óleo/água através do modelo de bancada construído, utilizando-se da menor vazão de água que proporcionasse padrões CAF visíveis sem o auxílio de equipamentos óticos auxiliares. Numa etapa preliminar, após a

montagem, foi feita a calibração e aferição dos equipamentos de medição de vazão e de perda de carga do sistema, para tanto foram utilizadas balanças de precisão, cronômetros, além de manômetros com coluna em "U" com mercúrio. Os recipientes usados para a coleta dos fluidos tiveram sua tara registrada previamente. A primeira etapa serviu para verificar a potência necessária à bomba para seu funcionamento no sistema desenvolvido utilizando somente óleo qual a perda de carga havida. Para efeito comparativo também se utilizou da água no mesmo circuito. A segunda etapa foi marcada pela definição da menor vazão da bomba da água e a definição das vazões de óleo que apresentavam padrões CAF em toda a extensão do experimento nos moldes propostos. Finalmente foram verificadas as potências necessárias às bombas nas condições dos padrões CAF obtidos. As medições de perda de carga foram anotadas em todas as condições observadas.

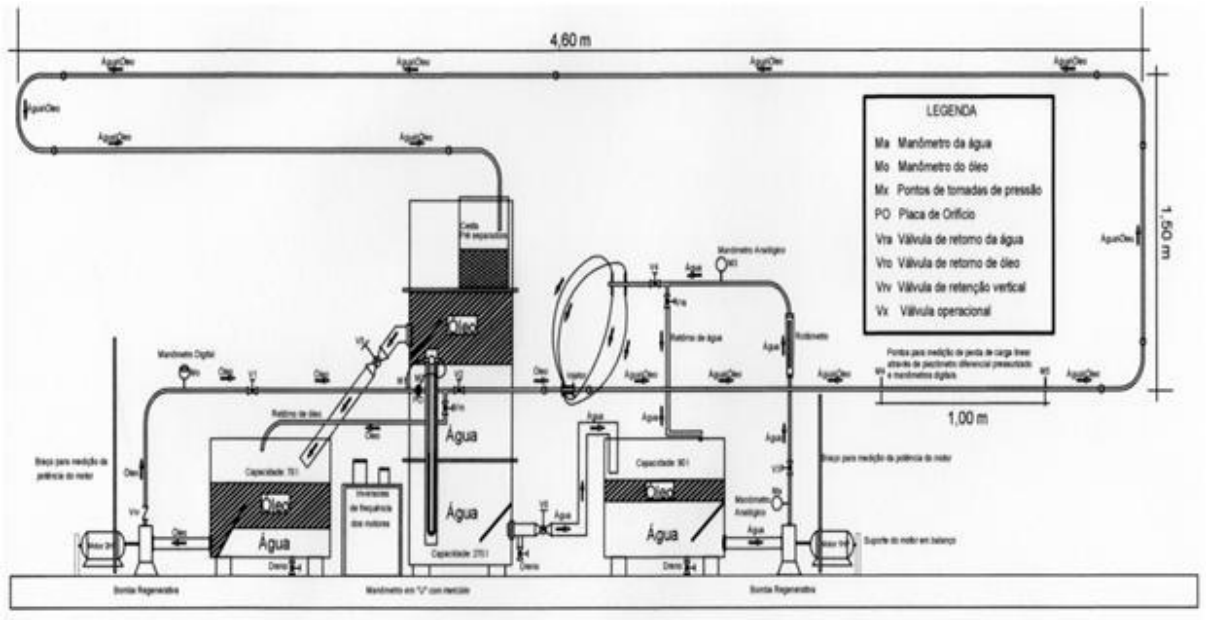

Figura 3 – Esquema do experimento de escoamento bifásico água/óleo – *Core Annular Flow*

Resultados

Os ensaios obtidos levaram em consideração a menor vazão de água (35 Hz) e vazões de óleo que resultaram em padrões CAF visíveis sem auxílio de instrumentos óticos auxiliares (40, 45, 50 e 60 Hz) conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Dados obtidos na formação de padrões CAF.

Frequência (Hz)		**Pressão Descarga Bomba Óleo**	**Vazão Água Rotâmetro**		**Vazão Água Aferida**		**Vazão Óleo Calculada**	
Óleo	Água	kgf/cm²	l/min	m³/h	l/min	m³/h	l/min	m³/h
40	35	0,59	6,50	0,39	6,70	0,402	9,93	0,596
45	35	0,60	7,00	0,42	7,22	0,433	10,45	0,627
50	35	0,60	7,00	0,42	7,22	0,433	13,65	0,819
60	35	0,30	6,50	0,39	6,70	0,402	30,34	1,820

Os resultados obtidos com as medições efetuadas para a obtenção das perdas de carga linear na tubulação do experimento, para as diversas condições empregadas, foram relacionados na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados referentes à perda de carga no sistema.

	Pressão (ΔP/m)		Inversor	Vazão		
	mca	kgf/cm²	Hz	l/min	m³/h	**Instrumento utilizado**
Água	0,022	0,0022	60	6,70	0,402	Piezômetro com água pressurizada
	0,80	0,08	40	9,93	0,596	Manômetros digitais
	0,90	0,09	45	10,45	0,627	Manômetros digitais
Óleo	1,00	0,10	50	13,65	0,819	Manômetros digitais
	1,20	0,12	60	30,34	1,820	Manômetros digitais
CAF	0,035	0,0035	50/35	20,87	2,252	Piezômetro com água pressurizada
	0,050	0,0050	60/35	37,04	2,222	Piezômetro com água pressurizada

Para efeito comparativo, foram relacionados na Tabela 3 os dados obtidos referentes às potências necessárias ao bombeamento do óleo sozinho e do óleo e da água em regime de formação de padrões CAF visíveis sem auxílio de equipamentos óticos.

Tabela 3 – Potência necessária às bombas.

Inversor da bomba de óleo		60 Hz	50 Hz	45 Hz	40 Hz
Óleo	RPM	3.498	2.929	2.641	2.347
	W	10.312,89	8.578,16	7.867,78	6.958,65
Óleo +	RPM	3.498	2.929	2.641	2.347
Água	W	8.703,34	7.756,66	6.819,03	6.585,95
Redução da potência de:		16%	10%	13%	5%

Conclusão

Muito embora a redução obtida, de 1,16 vezes na potência do motor, necessária para o bombeamento do escoamento bifásico em relação ao óleo sozinho (para mesma vazão), justificasse por si só a continuidade dos estudos, o experimento demanda que sejam considerados os efeitos devido aos materiais da tubulação, do comprimento, do diâmetro da mesma e mesmo do tipo das bombas empregadas, visto que no caso estudado estes fatores terem tido pouca influência no resultado obtido.

A relação entre a perda de carga com óleo na vazão de 1,82 m³/h (30,34 l/min) e a perda de carga no sistema CAF, na mesma vazão de óleo foi de 1,2 mca (metros de coluna de água) para 0,05 mca, indicando uma redução desta importante variável em 24 vezes.

Referências Bibliográficas

BANNWART, A., RODRIGUEZ, O. e CARVALHO, C., *Flow patterns in heavy crude oil-water flow*. **Journal of Energy Resources Technology, ASME**, Vol. 126, pp.184-189, 2004.

ISAACS, J. , SPEED, J. *Method of piping fluids*. **US Patent** 759374, 1904.

JOSEPH, R., CHEN, K., RENARDY, Y., *Core-Annular flows*. **Annu. Rev. Fluid Mechanics**, Vol. 29, pp 65-90, 1997.

MACINTYRE, A., Bombas e instalações de bombeamento. 2ª.Ed. -Rio de Janeiro, LTC, 2010.

MORAES JR., D., MORAES, M.S., Laboratório de Operações Unitárias I - Santos, Ed. Autores, 2011.