Unisanta Science and Technology, **2015, 6, July**
Published Online 2015 Vol.4 N°1 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat)

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Escalonamento de dados de perda de carga em sistemas de bombeamento para polpas heterogêneas de quartzo

Luís Paulo Garcia[1] e Thiago César de Souza Pinto[2]

[1]Petróleo Brasileiro SA - Petrobras
Rua Marques do Herval, 90, Valongo, Santos.São Paulo – SP- Brasil
[2]Instituto Tecnológico Vale – ITV
Avenida Juscelino Kubitschek, 31 - Bauxita. CEP: 35400-000
Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil
E-mail*:* lpaulogarcia@yahoo.com.br
Received june, 2015

Resumo: Esse trabalho apresenta um estudo de comparação entre as perdas de carga medidas para diferentes diâmetros e os dados obtidos por cálculo de *scale up* conforme modelo de afinidades descrito por Wilson *et al.* (2006). Na metodologia apresentada por Wilson *et al.* (2006) há duas regras a serem consideradas para se proceder o *scale up* de dados no regime turbulento: a primeira é aplicada para se fazer o *scale up* da perda de carga e a segunda é utilizada para fazer o *scale up* da velocidade média. Utilizando-se o referido modelo para fluxo em regime turbulento pseudo-homogêneo, conseguiu-se escalonar para o diâmetro de 50,8 mm os dados obtidos experimentalmente por Souza Pinto (2012) para polpas de quartzo em regime heterogêneo no diâmetro de 25,4 mm. A comparação entre os dados calculados por escalonamento para o diâmetro de 50,8 mm e os dados obtidos experimentalmente por Souza Pinto (2012), para esse mesmo diâmetro, apresentou um desvio no escalonamento inferior a 15%.

Palavras chave: mineroduto, *scale-up,* quartzo.

Scale up of pressure data losses in pumping systems for heterogeneous Quartz slurries

Abstract: This paper presents a comparison study between the pressure losses measured for different diameters and the data obtained by calculation of scale-up by affinities laws as described by Wilson et al. (2006). In the methodology presented by the authors two rules should to be considered to make the scale-up of data in the turbulent flow: the first is applied to make the scale -up of pressure loss, and the second is used to scale up of the average velocity. Using the scale up model described by Wilson *et al.* (2006) for pseudo-homogeneous turbulent flow, managed to stagger to the diameter of 50.8 mm the data obtained experimentally by Souza Pinto (2012) for quartz slurries in heterogeneous flow in a diameter of 25.4 mm. The comparison of the data calculated by scaling to a diameter of 50.8 mm, and the data obtained experimentally by Souza Pinto (2012) for this same diameter, showed that the data deviation was less than 15%.

Keywords: slurry pipeline, scale up, quartz.

1. Introducão

Os projetos de sistemas de bombeamento de polpa de minério podem ser subsidiados por dados obtidos em ensaios realizados em laboratórios. Os estudos realizados em menor escala podem trazer informações valiosas para a especificação da tecnologia a ser empregada, evitando-se, assim, erros de projeto, tais como subdimensionamento de sistemas ou custos extras desnecessários com materiais e equipamentos superdimensionados.

Copyright © 2015 ISESC.

De acordo com Wasp *et al.* (1977) e Jacobs (1991), o comportamento de suspensões contendo partículas sólidas difere do comportamento de um fluido simples quando submetidos a bombeamento em tubos. A caracterização da natureza do fluxo para líquidos pode ser determinada a partir das propriedades físicas do líquido e do sistema de bombeamento, sendo que a operação permite alcançar uma completa faixa de velocidades (laminar, transição ou turbulento). Já para sistemas de polpas minerais, Brown e Heywood (1991) e Nayyar (1999) abordam a dificuldade em se caracterizar um sistema de bombeamento devido às alterações provocadas pelos sólidos e pelo comportamento da polpa quando submetida a diferentes condições de operação.

1.1 Classificação de polpas minerais quanto ao fluxo

Polpas minerais podem ser classificadas quanto ao comportamento como homogênea ou heterogênea. A primeira classe apresenta suspensões com partículas finas, em que o líquido carreador e os sólidos são considerados como um fluido pseudo-homogêneo. As partículas conseguem ser suspensas com a operação normal de bombeamento e a velocidade de sedimentação, neste tipo de polpa mineral, inexiste ou é muito baixa, somente havendo sedimentação no tubo com a interrupção da operação.

Os efeitos inerciais são menores e há um aumento na viscosidade da polpa em relação ao líquido puro, que geralmente apresenta comportamento não-Newtoniano. Wilson *et al.* (1992) afirmaram que não existe uma faixa granulométrica bem definida para classificar a polpa como pseudo-homogênea, mas usualmente adota-se como base partículas com diâmetros menores que 100 µm. A segunda classe pode ser caracterizada por polpas que apresentam comportamento em que as partículas sólidas sedimentam, apresentando um fluxo heterogêneo, em que os sólidos são mal distribuídos ao longo da seção transversal do tubo, mesmo em altas velocidades de transporte, e os efeitos inerciais das partículas são mais pronunciados (WASP *et al.*, 1977; WILSON *et al.*, 1992).

Os sólidos produzem uma perda de carga adicional por atrito com as paredes, e de acordo com Jacobs *et al.* (1991), são encontradas partículas com diâmetro superior a 150 µm.

O comportamento destes dois tipos de polpas minerais diferem entre elas. Enquanto polpas pseudo-homogêneas permitem uma variação na velocidade de transporte, do regime laminar ao turbulento, polpas heterogêneas necessitam de uma velocidade mínima para que não ocorra deposição de partículas na base da tubulação. Não obstante isso, quando polpas heterogêneas escoam acima de uma determinada velocidade os sólidos se movem como uma suspensão homogênea. Essa velocidade é conhecida como velocidade de transição de fluxo heterogêneo para fluxo pseudo-homogêneo (BROWN E HEYWOOD, 1991; DORON *et al.*, 1987). A Figura 1 ilustra o comportamento apresentado por polpas pseudo-homogêneas e por polpas heterogêneas.

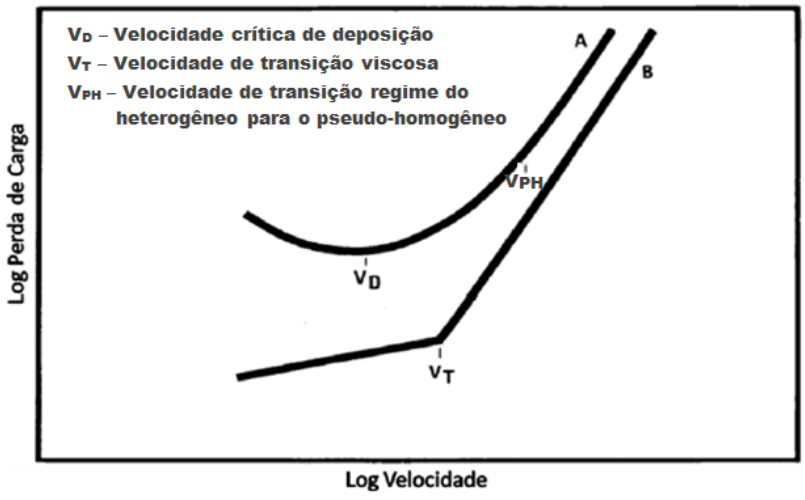


Figura 1: Comportamento da perda de carga em função da velocidade para escoamento heterogêneo (A) e homogêneo (B). Fonte: Wasp *et al.*, 1977. Adaptado pelo autor.

Copyright © 2015 ISESC

1.2 Correlações básicas de fluxo e processo de *scale up*

Na metodologia mostrado por Wilson *et al.* (2006) há duas regras a serem consideradas para se proceder o *scale up* de dados no regime turbulento: a primeira é aplicada para se fazer o *scale up* da perda de carga e a segunda é utilizada para fazer o *scale up* da velocidade da mistura.

De acordo com essa metodologia deve-se inicialmente calcular a perda de carga para o diâmetro em estudo (D_2) na condição em que a tensão de cisalhamento ($(\tau_o)_2$) para esse diâmetro é igual à tensão ($(\tau_o)_1$) determinada experimentalmente para o diâmetro (D_1).

Assim, considera-se que:

$$(\tau_o)_1 = (\tau_o)_2 \quad (1)$$

Como:

$$\tau_o = {}^{D}/_{4} * \left(-{}^{\Delta P}/_{\Delta x}\right) \quad (2)$$

em que: τ_o é a tensão de cisalhamento, D é o diâmetro interno do duto e $\Delta P/\Delta x$ é o gradiente de pressão no duto.

A igualdade mostrada na Equação 1, resulta em:

$${}^{D_1}/_{4} * \left(-{}^{\Delta P}/_{\Delta x}\right)_1 = {}^{D_2}/_{4} * \left(-{}^{\Delta P}/_{\Delta x}\right)_2 \quad (3)$$

A segunda regra, a ser seguida, considera que para se fazer o *scale up* da velocidade média da mistura, no regime turbulento, deve-se utilizar a Equação 4, mostrada abaixo:

$$(V_m)_2 = (V_m)_1 + 2{,}5 * \dot{U} * ln\left({}^{D_2}/_{D_1}\right) \quad (4)$$

Para resolver a Equação 4 é preciso calcular a velocidade de cisalhamento dada pela Equação 5:

$$\dot{U} = \sqrt{{}^{\tau_o}/_{\rho_m}} \quad (5)$$

em que: $\dot{U}$ é a velocidade de cisalhamento, τ_o é a tensão de cisalhamento e ρ_m é a massa específica da mistura.

Neste trabalho foi avaliada a utilização das equações propostas por Wilson *et al.* (2006) referentes a fluxo em regime turbulento pseudo-homogêneo para realizar o *scale up* de dados medidos em fluxo heterogêneo para polpas de quartzo.

2. Materiais e Metodos

Nesse trabalho foram utilizados os dados obtidos experimentalmente por Souza Pinto (2012). A Figura 2 apresenta uma ilustração da unidade experimental de bombeamento de polpas minerais utilizada por Souza Pinto (2012) e a Tabela 1 detalha os nomes dos componentes da unidade experimental.

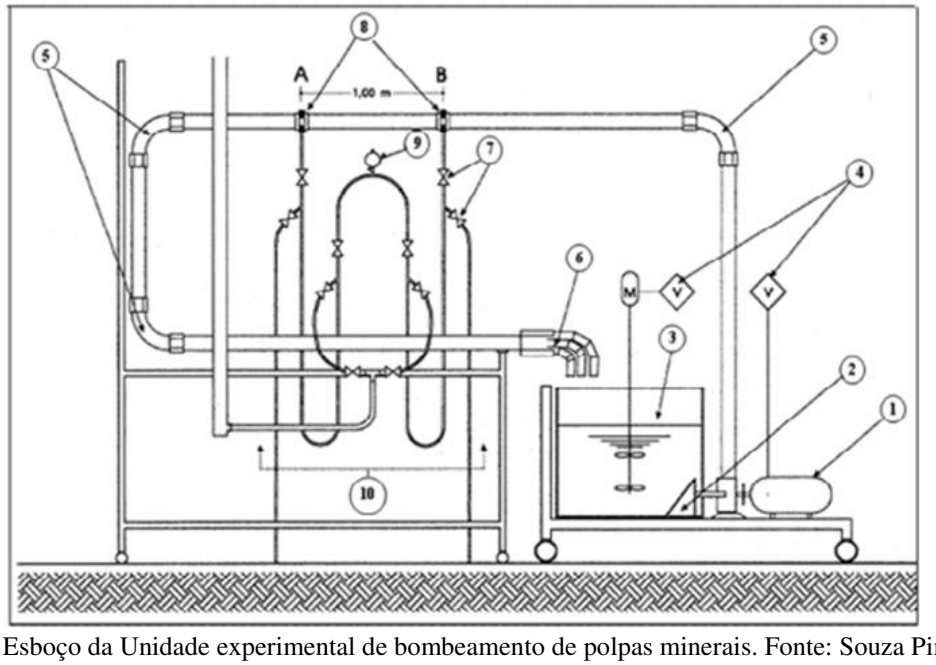


Figura 2 – Esboço da Unidade experimental de bombeamento de polpas minerais. Fonte: Souza Pinto, 2012.

Copyright © 2015 ISESC
Unisanta Science and Technology **(22-28) p.p. ISSN 2317-1316**

Tabela 1 – Componentes da unidade experimental.

Item	Descrição	Item	Descrição
01	Bomba Centrífuga	06	Calha distribuidora
02	Dispositivo quebra-bolha	07	Válvulas do manômetro em U
03	Tanque de alimentação com agitação	08	Anéis piezométricos
04	Inversores de freqüência	09	Sistema de pressurização do manômetro
05	Tubulação e conexões	10	Tubos de saída para limpeza do manômetro

Fonte: Souza Pinto, 2012.

Utilizando a unidade experimental mostrada na Figura 2, Souza Pinto (2012) mediu a perda de carga nos diâmetros internos de tubulação de 25,4 mm e de 50,8 mm em diferentes vazões para polpas minerais de quartzo com concentrações volumétricas (Cv) de 0% (100 % água - ρ_m = 1.000 kg/m³), 14% (ρ_m =1.226 kg/m³), 20% (ρ_m=1.326 kg/m³) e 27% (ρ_m =1.444 kg/m³) com os diâmetros de partícula Sauter (d_S) de 132 µm e 265 µm, como mostrado na Tabela 2.

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos nos experimentos realizados por Souza Pinto (2012).

Tabela 2 – Características das polpas de Quartzo estudadas por Souza Pinto (2012).

Diâmetro de partícula Sauter	Intervalo granulométrico	Concentração Volumétrica	Massa específica
µm	µm	%	kg/m³
132	-149+105	14	1.226
		20	1.326
		27	1.444
265	-297+210	14	1.226
		20	1.326
		27	1.444

Fonte: Souza Pinto, 2012. Adaptado pelo autor.

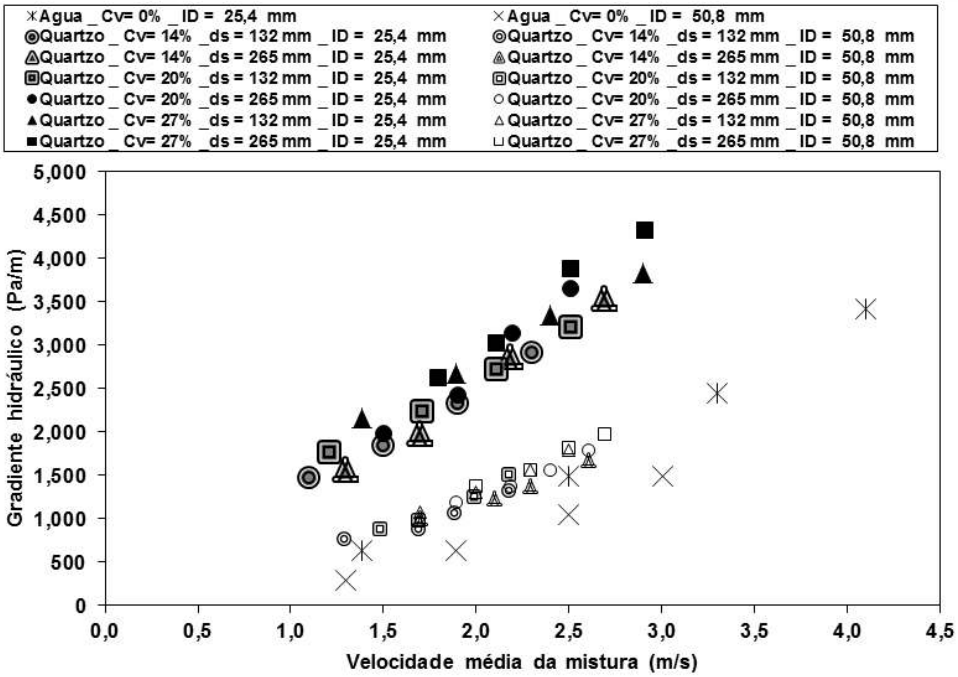


Figura 3 – Dados de perda de carga em diferentes velocidades obtidas por Souza Pinto (2012) para polpas de quartzo em dutos com diâmetros internos (ID) de 25,4 mm e 50,8 mm. (adaptado pelo autor).

Copyright © 2015 ISESC

A partir dos dados obtidos por Souza Pinto (2012) foram calculados os valores da tensão de cisalhamento (τ_o) e da velocidade de cisalhamento ($\dot{U}$) para o diâmetro de tubulação de 25,4 mm.

Utilizando-se esses resultados e as equações 3 e 4 os dados obtidos para o diâmetro 25,4 mm foram escalonados para o diâmetro de 50,8 mm.

Esse procedimento foi realizado para todas as polpas estudadas por Souza Pinto (2012).

Posteriormente os resultados obtidos através do escalonamento foram comparados com dados experimentais obtidos para o diâmetro de 50,8 mm.

3. Resultados e Discussões

As Figuras 4.a, 4.b, 4.c, 4.d, 4.e e 4.f apresentam os dados obtidos experimentalmente por Souza Pinto (2012) para a perda de carga em diferentes velocidades para os diâmetros de 25,4 e 50,8 mm.

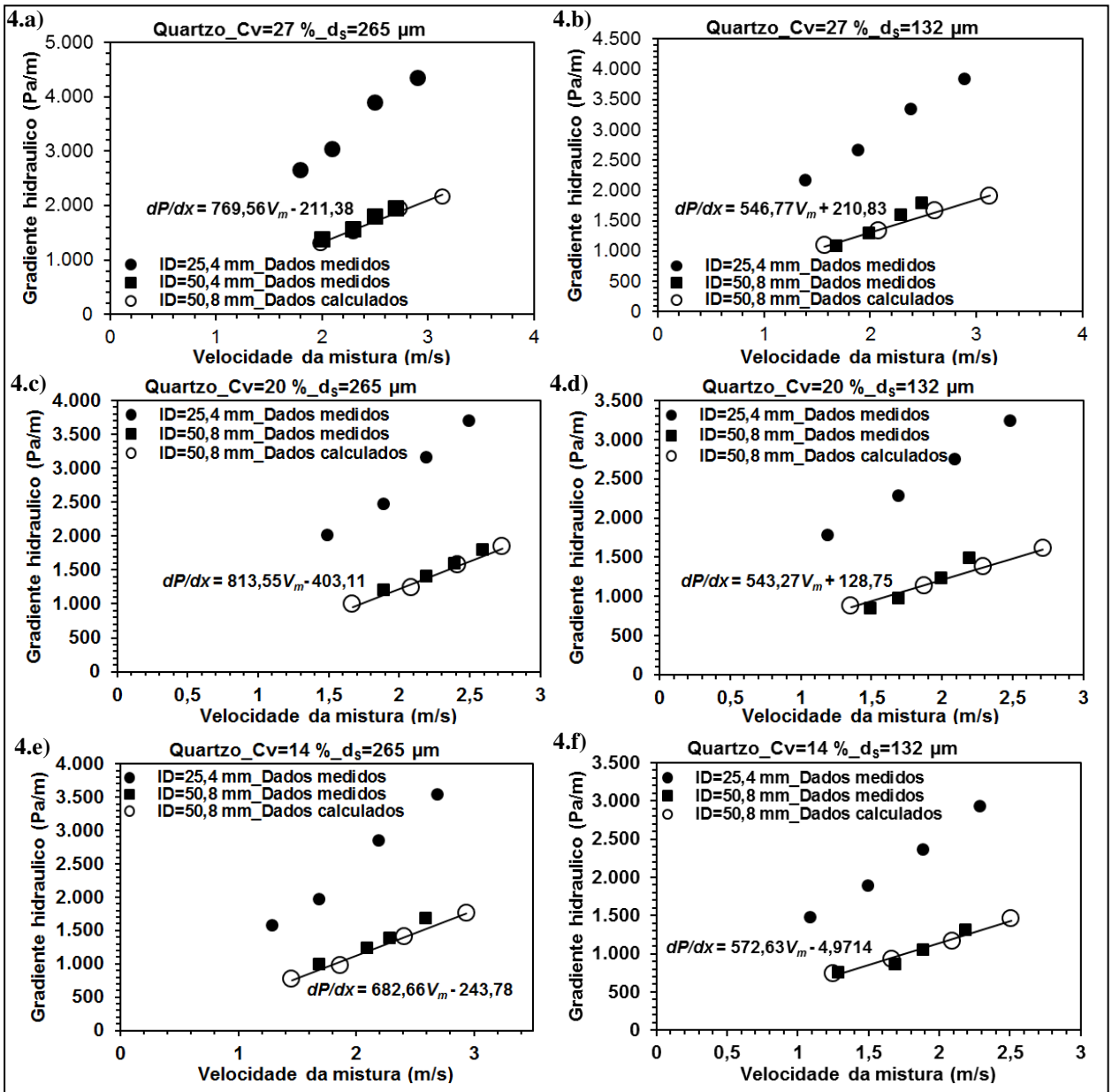


Figura 4 - Dados obtidos experimentalmente por Souza Pinto (2012) para a perda de carga em diferentes velocidades para os diâmetros de 25,4 e 50,8 mm e dados calculados para o diâmetro de 50,8 mm a partir do escalonamento dos dados obtidos experimentalmente para o diâmetro 25,4 mm.

Copyright © 2015 ISESC

Nessas figuras também são mostrados os dados calculados para o diâmetro de 50,8 mm a partir do escalonamento dos dados obtidos experimentalmente para o diâmetro 25,4 mm. Adicionalmente foram inseridas nessas figuras as equações das linhas de tendência dos dados obtidos por escalonamento para o diâmetro de 50,8 mm. A partir dessas equações é possível se estimar a perda de carga para diferentes velocidades numa tubulação com esse diâmetro.

Utilizando as equações das linhas de tendência calculou-se a perda de carga para as velocidades usadas nos experimentos realizados por Souza Pinto (2012) para o diâmetro de 50,8 mm. Dessa forma foi possível comparar dados calculados a partir das equações das linhas de tendência do escalonamento com os dados experimentais, ambos para o diâmetro de 50,8 mm. Essa comparação é mostrada na Figura 5.

Nessa figura pode-se perceber que a maior parte dos erros resultantes do uso das equações das linhas de tendência do escalonamento fica menor que ±10% e que todos os pontos calculados apresentam um erro inferior a ±15%.

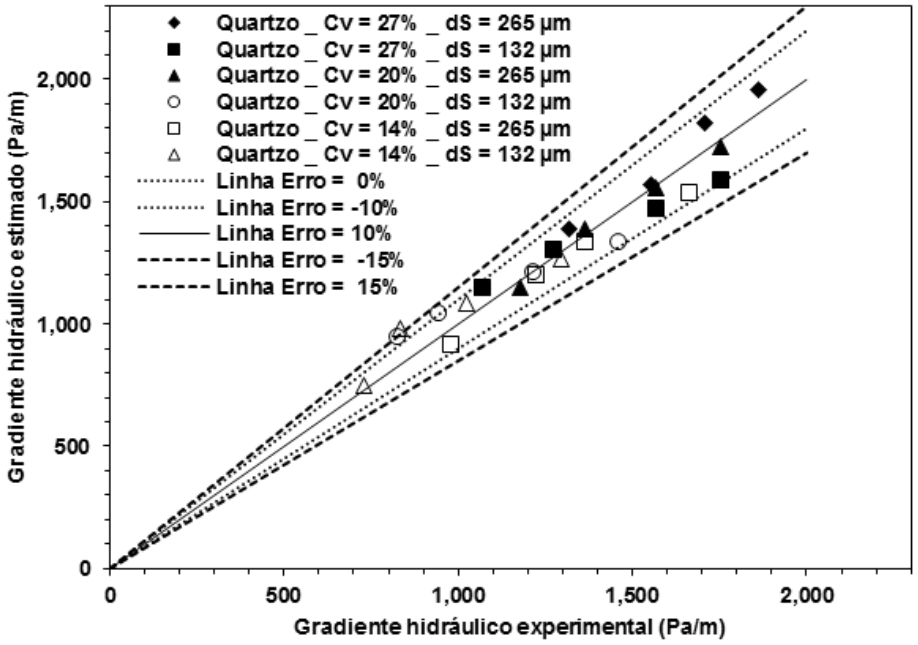


Figura 5 - Comparação entre os dados experimentais de perda de carga obtidos para o diâmetro de 50,8 mm e os dados calculados através das equações das linhas de tendência do escalonamento para o diâmetro de 50,8 mm.

4. Conclusão

Nesse trabalho, utilizando-se o modelo de *scale up* descrito por Wilson *et al.* (2006) para fluxo em regime turbulento pseudo-homogêneo, conseguiu-se escalonar para o diâmetro de 50,8 mm os dados obtidos experimentalmente Souza Pinto (2012) para polpas de quartzo em regime heterogêneo no diâmetro de 25,4 mm. A comparação entre os dados calculados por escalonamento para o diâmetro de 50,8 mm e os dados obtidos experimentalmente por Souza Pinto (2012), para esse mesmo diâmetro, mostrou que o erro no escalonamento ficou inferior a 15%.

Referências

WILSON, K.C.; ADDIE, G.R.; SELLGREN A.; CLIFT, R. **Slurry Transport Using Centrifugal Pumps**, 3 ed., New York, Springer Science+Business media Inc, 2006**.**

SOUZA PINTO, T. C. **Modelagem da velocidade crítica de transporte de polpas minerais contendo partículas grossas/** T.C. Souza Pinto. Ed Ver. São Paulo, 2012. 190p.

JACOBS, B.E.A. **Design of slurry transport systems**. Elsevier Science Publishers, BHR Group, 1991, 312p.

Copyright © 2015 ISESC

WASP, E. J.; KENNY, J. P.; GANDHI, R. L. Series on Bulk Materials Handling Vol. 1 (1975/77) No. 4; **Solid-Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation** – 3.ed., Trans Tech Publications. 1977, 224p. JACOBS, B.E.A. **Design of slurry transport systems**. Elsevier Science Publishers, BHR Group, 1991, 312p.

BROWN, N.P.; HEYWOOD, N.I. **Slurry Handling: Design of solid-liquid systems**; New York, Elsevier Handling and Processing of Solids Series, Elsevier Science Publishers, 1991, 680p.

NAYYAR, M.L. **Piping Handbook**, 7 ed, New York, McGraw-Hill,1999.

WILSON, K.C.; CLIFT, R.; ADDIE, G.R.; MAFFET, J. Effect of Broad Particle Grading on Slurry Stratification Ratio and Scale-up. **Powder Technology**, V. 61; p. 165-172, 1992.

DORON, P.; GRANICA, D.; BARNEA, D. Slurry Flow in Horizontal Pipes– Experimental and Modeling. **International Journal Multiphase Flow**, Vol. 13, n. 4, p. 535-547, 1987.

Copyright © 2015 ISESC