REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS
INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

CARTA PATENTE Nº BR 102021024428-3

O INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL concede a presente PATENTE DE INVENÇÃO, que outorga ao seu titular a propriedade da invenção caracterizada neste título, em todo o território nacional, garantindo os direitos dela decorrentes, previstos na legislação em vigor.

(21) Número do Depósito: BR 102021024428-3

(22) Data do Depósito: 02/12/2021

(43) Data da Publicação Nacional: 13/06/2023

(51) Classificação Internacional: G01F 1/66.

(52) Classificação CPC: G01F 1/666; G01N 2291/02433.

(54) Título: MÉTODO E SISTEMA PARA MEDIÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DE UM ESCOAMENTO MULTIFÁSICO

(73) Titular: UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP, Outros. CGC/CPF: 46068425000133. Endereço: CIDADE UNIVERSITÁRIA ZEFERINO VAZ, DISTRITO DE BARÃO GERALDO, CAMPINAS, SP, BRASIL(BR), 13083970; PETRÓLEO BRASILEIRO S/A - PETROBRAS, Pessoa Jurídica. CGC/CPF: 33000167000101. Endereço: AV. REPÚBLICA DO CHILE, 65, Rio de Janeiro, RJ, BRASIL(BR), 20031-912, Brasileira

(72) Inventor: PEDRO HENRIQUE DE MELO CASADO MATOS; SAON CRISPIM VIEIRA; DANIELY AMORIM DAS NEVES; JULIANA RANGEL CENZI; ADRIANO TODOROVIC FABRO; MARCELO SOUZA DE CASTRO; CHARLIE VAN DER GEEST; DAIANE MIEKO ICERI; BERNARDO PEREIRA FORESTI; MARCOS PELLEGRINI RIBEIRO.

Prazo de Validade: 20 (vinte) anos contados a partir de 02/12/2021, observadas as condições legais

Expedida em: 02/09/2025

Assinado digitalmente por:
Alexandre Dantas Rodrigues
Diretor de Patentes, Programas de Computador e Topografias de Circuitos Integrados

MÉTODO E SISTEMA PARA MEDIÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DE UM ESCOAMENTO MULTIFÁSICO

Campo da invenção

[001] A presente invenção se refere a método e sistema para medir características de um escoamento multifásico a partir de sinais de vibração estrutural.

[002] A área tecnológica de aplicação da presente invenção é a área mecânica, mais precisamente as áreas de mecânica dos fluidos e vibrações, voltadas para a obtenção de características de um escoamento multifásico, como padrão de escoamento, frações das fases, velocidades, etc., de forma indireta, a partir de sensores não invasivos.

Fundamentos da invenção

[003] Escoamentos multifásicos estão presentes em diversas aplicações no ramo da engenharia, como por exemplo, usinas nucleares e produção de petróleo. É de suma importância o conhecimento *in situ* acerca dos diferentes padrões de escoamento que se desenvolvem no interior das tubulações para que se obtenha a devida segurança do sistema e a otimização dos processos envolvidos.

[004] Assim, técnicas de monitoramento têm sido desenvolvidas ao longo das últimas décadas, com base em diferentes princípios, aplicadas a uma grande variedade de sensores que são utilizados para medição e obtenção de características de escoamentos bifásicos em dutos e

tubulações.

[005] Algumas das técnicas utilizadas atualmente são baseadas em medidas por meio do emprego de sensores intrusivos, ou seja, sensores que são colocados no interior dos tubos, juntamente com o escoamento. Como exemplo, sensores elétricos podem ser empregados, sendo inseridos no escoamento para detecção da passagem de cada fase do escoamento multifásico por meio de diferenças das medidas de resistividade ou capacitância medidas pelo sensor, alteradas de acordo com a quantidade presente de cada fase no escoamento. Tal metodologia apresenta uma dificuldade de aplicação por seu sistema ser intrusivo ao escoamento, sendo de difícil aplicação principalmente em locais de elevada periculosidade, como no fundo de poços de petróleo ou devido ao contato com alimentos na indústria alimentícia. Além disso, em aplicações sob condições de elevadas temperaturas, como no caso de usinas termelétricas, não é possível inserir sensores elétricos no interior dos dutos.

[006] Outras técnicas utilizadas consistem na obtenção de fração de vazio (média temporal da fração da área da seção transversal do duto ocupado pelo gás, considerando um período característico do escoamento) com base em imagens adquiridas por câmeras de alta velocidade e alta definição. No entanto, esta técnica exige uma tubulação específica (transparente), que permita adequada visualização do escoamento, e também

acessibilidade ao local de medição.

[007] Ademais, outra técnica utilizada para medição de características de escoamentos bifásicos ou multifásicos, consiste na utilização de sensores ultrassônicos. Essa técnica exige a utilização de excitadores do tipo "*shaker*" ou qualquer outro dispositivo de injeção de energia que excite a tubulação em frequência de ultrassom, e consequentemente os sensores.

[008] Existem também medidores multifásicos industriais que se utilizam de técnicas complexas como micro-ondas, radiação, entre outras para medição e, desse modo, tais medidores são de uso restrito ou perigoso.

[009] Tendo isto em vista, a presente invenção apresenta uma solução para a quantificação das parcelas de fases líquida e gasosa (fração de fases) que compõem a mistura de um escoamento multifásico (composto por líquidos e gás) no interior de dutos, de maneira indireta, a partir da análise de medições da vibração estrutural, em decorrência da passagem do escoamento pela tubulação.

[010] Mais especificamente, a solução é alcançada por meio de um método e um sistema para medição de características de um escoamento multifásico. Os métodos e produtos são de uso simples, sendo que os dispositivos/sensores implementados podem ser fixados

por qualquer tipo de suporte apropriado, sem a necessidade de mecanismos de excitação externos, e partindo da análise dos sinais obtidos com os sensores de vibração instalados na tubulação. Assim, os sensores de vibração da presente invenção possibilitam a sua aplicação em locais de difícil acesso ou em aplicações em que sensores elétricos, por exemplo, não possam ser utilizados, e por serem externos, não são intrusivos ao escoamento.

[011] Ademais, as soluções propostas pela presente invenção podem ser aplicadas a áreas que envolvam o transporte de misturas de fluidos no interior de dutos, como por exemplo, na indústria petroquímica, alimentícia, química, nuclear, aeroespacial, dentre outras.

Estado da técnica:

[012] A busca pelo histórico da invenção em questão, levou a alguns documentos que revelam matérias dentro do campo tecnológico da presente invenção.

[013] Um documento que descreve matéria relacionada a tal tecnologia é o documento de patente US 6,412,352, que descreve um método e um aparelho não invasivo para medir a vazão mássica de um fluido multifásico. Todavia, o documento faz uso de apenas um sensor para estimar vazão mássica e fração de vazio. Além disso, a técnica utilizada requer a realização de calibrações *in situ* para cada aplicação, o que por vezes é inviável.

Diferentemente do referido documento, a presente invenção utiliza mais de um sensor para avaliar a curva de dispersão da estrutura e estimar a fração de vazio. Além disso, como a presente invenção não utiliza um único sensor de aceleração, não é necessário avaliar quais as regiões do espectro em frequência são influenciadas pela bomba/estrutura e filtrá-los. Por fim, a invenção proposta não necessita de uma calibração para diferentes linhas, como no documento de patente citado.

[014] O documento de patente US 5,415,048 revela um medidor de fluxo de fluido multifásico com base em acústica passiva e não intrusiva para uso em aplicações de campo em tubos. Todavia, a tecnologia faz uso de acelerômetro em conjunto com sensores de pressão. Além disso, é necessária calibração com diversas proporções de líquido e gás, sendo que as propriedades dos fluidos devem ser semelhantes às dos fluidos encontrados no cenário de aplicação. Em contrapartida, a invenção proposta dispensa o uso de sensores de pressão, cuja instalação poderia requerer a parada da produção, e utiliza apenas sensores de aceleração. Ademais, a presente invenção também dispensa calibração prévia seja utilizando tubulação ou meios específicos em proporções predeterminadas, como é o caso do documento de patente citado.

[015] O documento de patente US 5,218,871 revela um método para medir a vazão mássica de líquido saindo de

um bocal de alimentação bifásico (gás/líquido). Contudo, como apenas a vazão mássica de líquido é medida, o documento em questão é insensível a vazão de gás. Além disso, não são levados em conta outros fatores importantes para mensurar a fração de vazio, como disposição geométrica das fases do escoamento e do deslizamento entre elas. Ao contrário do documento citado, que mede apenas a vazão mássica de líquido, a presente invenção realiza a medição da fração de vazio do escoamento, ou seja, de maneira vantajosa, a presente invenção torna possível medir as parcelas que compõe a mistura das duas fases presentes no escoamento e não de apenas uma fase. Como a fração de vazio depende também da disposição geométrica em que as fases estão e, consequentemente, do deslizamento entre as fases, o que acarreta aceleração/desaceleração das fases na tubulação, medir apenas a vazão mássica de uma fase não tem relação direta com a fração de vazio.

[016] O documento de patente EP 2 182 333 se refere a um método para uma determinação não intrusiva das respectivas vazões dos constituintes em um fluido bifásico fluindo em um conduto. Não obstante, a obtenção das vazões de cada fase pela metodologia do documento é feita com base em modelos fenomenológicos, de maneira que a fração de vazio é obtida indiretamente. Ao contrário do que o referido documento de patente descreve, a presente invenção é capaz de obter a fração

de vazio da mistura sem utilizar-se de modelos fenomenológicos.

[017] O documento não-patentário "*Flow Measurement by Piezoelectric Accelerometers: Application in the Oil Industry*" descreve uma metodologia para analisar uma técnica de medição de vazão desenvolvida recentemente, baseada na vibração captada por um acelerômetro acoplado à superfície do duto para uso na indústria de petróleo. A metodologia aplicada consiste na realização de um estudo experimental para obtenção de dados em laboratório credenciado para calibração de medidores de vazão, estimando uma vazão para cada vibração medida, seguida de uma análise de incerteza. No entanto, o método do documento relacionado se refere à medição de vazão monofásica, portanto, não trata da estimação de fração volumétrica de gás (FVG), parâmetro do escoamento multifásico. Além disso, o documento citado não realiza estimativa da fração de vazio, como na presente invenção. Ademais, de forma vantajosa, o presente invento é capaz de estimar a FVG, parâmetro utilizado na otimização dos métodos de elevação artificial de petróleo e, portanto, na otimização da produção, ao contrário da abordagem utilizada pelo documento citado.

[018] O documento não-patentário "*Vibration response of a pipe subjected to two-phase flow: Analytical formulations and experiments*" trata da vibração induzida por fluxo bifásico em tubos. Uma ampla gama de condições

de escoamento bifásico, incluindo escoamentos em bolhas, disperso e "*slug*", foi testada em um tubo horizontal reto com braçadeira. A resposta à vibração de ambas as direções transversais para dois comprimentos de vão foi medida. A partir de resultados experimentais, uma discussão aprofundada sobre a natureza da excitação do escoamento e a influência dos parâmetros do escoamento é apresentada. Todavia, o documento relacionado não estima a fração de vazio, apenas apresenta uma análise entre a frequência de pico dos sinais de aceleração com a fração de vazio. Além do mais, as frequências de pico apresentadas dependem diretamente da fixação mecânica da tubulação. Diferentemente do que é descrito neste documento, a presente invenção propõe uma metodologia que estima a fração de vazio, por meio de um sistema que é de fácil instalação e manutenção, não necessita de calibração para diferentes linhas e é não-invasivo.

[019] Por fim, o documento não-patentário "*Two-Phase Mass Flow Measurement Using Noise Analysis*" trata de desenvolver um sensor de medição de vazão mássica não intrusivo e de baixo custo para condições de escoamento bifásico em aplicações geotérmicas. A ênfase do trabalho é a produção de um dispositivo que irá monitorar o escoamento bifásico nos sistemas de tubulação acima do solo. No entanto, o documento refere-se à utilização de um sensor em que o processamento do sinal consiste em filtrar o sinal no tempo e estimar apenas a vazão mássica

a partir do desvio padrão do sinal adquirido. A medição da vazão mássica do escoamento bifásico necessita de calibração prévia para cada tubulação, além disso, para altos valores de fração de vazio (>10%) a relação entre desvio padrão e vazão mássica diminui. Com uma abordagem distinta da proposta pelo documento citado, a presente invenção utiliza um sistema que compreende mais de um sensor de aceleração para estimar a curva de dispersão da estrutura e estimar a fração de vazio. Adicionalmente, a invenção proposta mede a fração de vazio do escoamento sem levar em conta a vazão mássica, enquanto que o documento não-patentário propõe uma metodologia para medir vazão mássica para escoamentos bifásicos com fração de vazio de até 10%.

Breve descrição da invenção:

[020] A presente invenção se refere a método e sistema para medir características de um escoamento multifásico a partir de sinais de vibração estrutural. Propõe-se uma solução para quantificação das parcelas de fases líquida e gasosa (fração de fases) que compõem a mistura de um escoamento multifásico (composto por líquido e gás) no interior de dutos ou tubos, de maneira indireta, a partir da análise de medições da vibração estrutural, em decorrência da passagem do referido escoamento pela tubulação. É ainda um objetivo da presente invenção, fornecer uma solução que pode ser utilizada em qualquer tipo de tubulação (rígida ou

flexível, nesse caso desde que localmente rígida) e em áreas de difícil acesso (como, por exemplo, debaixo d’água). Ademais, é também um objetivo da presente invenção fornecer uma solução simplificada que independe de mecanismos e dispositivos de excitação externa.

[021] A presente invenção compreende um método para medir características de um escoamento multifásico a partir de sinais de vibração estrutural caracterizado por compreender: a. obter, por meio de sensores fixados externamente à uma tubulação, sinais com base na vibração do escoamento interno da tubulação; b. processar, por meio de um dispositivo de processamento, os sinais obtidos; c. determinar um coeficiente de ajuste de curva de dispersão; e, consequentemente, d. determinar a fração de vazio da mistura.

[022] Ainda, a presente invenção compreende um sistema para medir características de um escoamento multifásico a partir de sinais de vibração estrutural caracterizado por compreender: a. pelo menos três sensores; e b. um dispositivo de processamento; c. em que os sensores são fixados externamente à uma tubulação e configurados para obter sinais com base na vibração do escoamento interno da tubulação; d. o dispositivo de processamento sendo configurado para processar os sinais obtidos e determinar um coeficiente de ajuste de curva de dispersão para determinar a fração de vazio da mistura.

Breve descrição das figuras:

[023] A presente invenção passará a ser descrita a seguir com referência às concretizações típicas da mesma e também com referência aos desenhos apensos, nos quais:

[024] A Figura 1 mostra um diagrama esquemático de um aparato experimental de testes, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[025] A Figura 2 mostra uma curva de dispersão obtida para uma viga simples pelos modelos de Euller-Bernoulli e Timoshenko, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[026] A Figura 3 apresenta um esquema simplificado do sistema com pelo menos três sensores dispostos sobre uma tubulação em regime de escoamento multifásico, onde são obtidos os sinais do tempo, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[027] A Figura 4 apresenta o cálculo das Funções Resposta em Frequência (FRFs) a partir dos sinais temporais dos sensores, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[028] A Figura 5 mostra uma curva de dispersão experimental, uma curva ajustada, e os limites superior e inferior de intervalos de confiança, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[029] A Figura 6 mostra um mapa de padrão de escoamento e pontos experimentais considerados, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[030] A Figura 7 mostra um mapa de padrão de escoamento e uma parte dos pontos experimentais considerados, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[031] A Figura 8 mostra a densidade espectral de potência para cinco pontos experimentais e a função resposta em frequência para o caso sem escoamento, em que todos os casos são normalizados pela máxima amplitude, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[032] A Figura 9 mostra o espectro de frequência ao longo do tempo para o ponto experimental 7 (a), de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[033] A Figura 10 mostra o espectro de frequência ao longo do tempo para o ponto experimental 33 (b), de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[034] A Figura 11 mostra uma curva de dispersão experimental e uma curva ajustada para o ponto experimental 7 (a), em que os limites superior e inferior indicam caso com somente gás ou somente líquido, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[035] A Figura 12 mostra uma curva de dispersão experimental e uma curva ajustada para o ponto experimental 13 (b), em que os limites superior e inferior indicam caso com somente gás ou somente líquido, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[036] A Figura 13 mostra uma curva de dispersão experimental e uma curva ajustada para o ponto experimental 23 (c), em que os limites superior e inferior indicam caso com somente gás ou somente líquido, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[037] A Figura 14 mostra uma curva de dispersão experimental e uma curva ajustada para o ponto experimental 29 (d), em que os limites superior e inferior indicam caso com somente gás ou somente líquido, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[038] A Figura 15 mostra uma curva de dispersão experimental e uma curva ajustada para o ponto experimental 33 (e), em que os limites superior e inferior indicam caso com somente gás ou somente líquido, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[039] A Figura 16 apresenta curvas de dispersão analíticas considerando escoamento periódico e homogêneo analíticos, e curva experimental, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[040] A Figura 17 mostra o espectro em frequência do trecho de tubo e primeira frequência natural, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[041] A Figura 18 apresenta um coeficiente de determinação R^2 do ajuste de curva para todos os pontos

experimentais, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[042] A Figura 19 mostra a fração de vazio estimada pela curva de dispersão em função da velocidade de mistura em comparação com o modelo unificado do estado da técnica para o padrão de escoamento intermitente, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[043] A Figura 20 mostra a fração de vazio estimada pela curva de dispersão em função da velocidade de mistura em comparação com o modelo unificado do estado da técnica para o padrão de escoamento de bolhas dispersas, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[044] A Figura 21 apresenta a fração de vazio estimada pela curva de dispersão em função da velocidade superficial de gás para uma dada velocidade superficial de líquido em comparação com o modelo unificado do estado da técnica, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[045] A Figura 22 apresenta a fração de vazio estimada pela curva de dispersão em função da velocidade superficial de gás para uma dada velocidade superficial de líquido em comparação com o modelo unificado do estado da técnica, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[046] A Figura 23 apresenta a fração de vazio estimada pela curva de dispersão em função da velocidade

superficial de gás para uma dada velocidade superficial de líquido em comparação com o modelo unificado do estado da técnica, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[047] A Figura 24 apresenta a fração de vazio estimada pela curva de dispersão em função da velocidade superficial de gás para uma dada velocidade superficial de líquido em comparação com o modelo unificado do estado da técnica, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[048] A Figura 25 apresenta a fração de vazio estimada pela curva de dispersão em função da velocidade superficial de gás para uma dada velocidade superficial de líquido em comparação com o modelo unificado do estado da técnica, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

[049] A Figura 26 apresenta a diferença absoluta entre a fração de vazio estimada pelo método proposto e pelo modelo unificado de Tulsa, do estado da técnica, para os pontos experimentais, de acordo com um exemplo de aplicação da presente invenção.

Descrição detalhada da invenção:

[050] A seguinte descrição detalhada deve ser lida e interpretada com referência aos desenhos e esquemas apresentados em anexo, representando uma forma de realização preferida para a invenção, não sendo intencionado limitar o escopo do invento.

[051] Conforme previamente descrito, a invenção se insere na área de mecânica e se refere a método e sistema para medir características de um escoamento multifásico a partir de sinais de vibração estrutural.

[052] A presente invenção é voltada para métodos e sistemas que se destinam a analisar os efeitos do escoamento multifásico, preferencialmente (mas não exclusivamente) escoamento bifásico, na dinâmica estrutural de uma tubulação em termos de propagação de ondas. Tendo isto em vista, são fornecidos um método e um sistema para estimar a fração de vazio local, i.e., a razão entre o volume da fase gasosa e o volume total de fluido, a partir de sensores (acelerômetros) fixados na face externa da tubulação.

[053] A Figura 1 é um diagrama esquemático de uma modalidade exemplificativa de um aparato experimental para testar a presente invenção. Como pode ser observado na Figura 1, a resposta da estrutura ao escoamento é medida em diferentes pontos ao longo de uma seção de testes com o uso de sensores de aceleração, ou acelerômetros (T01, T02, V00). Para o escoamento são medidas as vazões de cada fase (gás e líquido), que são controladas remotamente a partir de um inversor de frequências ligado às bombas.

[054] O trecho de teste é instalado em um *loop*, como apresentado na Figura 1. Água é armazenada em um reservatório (10) e seu bombeamento se dá através de uma

bomba centrífuga (15). Para o gás, é utilizada uma válvula controladora de vazão (60) do tipo agulha, ligada a uma válvula reguladora de pressão (55) e a um compressor de ar (35) que injeta o gás na tubulação. Ao final do *loop* de testes, a água retorna ao reservatório (10) e o ar à atmosfera. O trecho de teste conta ainda com um trocador de calor (20) responsável pela transferência de energia térmica entre a água proveniente da bomba centrífuga (15) e a água de aquecimento que passa por um resfriador de água (45) do tipo "*chiller*" e por uma bomba (50) posicionada a jusante do referido resfriador (45). Adicionalmente, a seção apresenta válvulas de acionamento rápido (V1) para o rápido fechamento da seção de teste e abertura da válvula "*by-pass*" (25), para, dessa maneira, medir a fração das fases ("*hold-up*") pelo sistema de válvulas de fechamento rápido. Sensores de pressão (P) e temperatura (T) são dispostos em pontos da seção para medir estes parâmetros do escoamento.

[055] As vazões são medidas por meio de sensores do tipo *Coriolis* (30). Ao final da linha de testes, uma seção de visualização (40), composta por um tubo de acrílico, é instalada em que está posicionada uma câmera de alta velocidade com o objetivo de registrar qual o padrão de escoamento desenvolvido para o caso bifásico. Todos os dados são obtidos através de um conversor analógico-digital ligado a um computador de controle que

compreende um dispositivo de processamento, e as vazões também são controladas pelo computador.

[056] De acordo com uma configuração exemplificativa, como demostrado na Figura 1, pelo menos três acelerômetros, indicados por (T01, T02, V00), são dispostos externamente à tubulação e igualmente espaçados entre si. A principal função dos acelerômetros (T01, T02, V00) é obter os dados de aceleração da tubulação devido ao escoamento bifásico para que uma curva de dispersão possa ser determinada para o padrão de escoamento. Além das curvas de dispersão, também é previsto pela presente invenção que os espectros de potência dos sinais de aceleração obtidos pelos acelerômetros (T01, T02, V00) identifiquem as frequências naturais da estrutura e definam condições de contorno.

[057] A seguir será apresentada em detalhes, de acordo com uma configuração exemplificativa da presente invenção, a abordagem utilizada para estimar a fração de vazio que compõe uma mistura bifásica, a partir da medição da vibração estrutural realizada pelos acelerômetros (T01, T02, V00) em três pontos distintos equidistantes, dispostos externamente à tubulação, onde há um escoamento bifásico interno.

[058] Inicialmente, o comportamento das ondas que se propagam na estrutura deve ser avaliado, para que se possa definir o tipo de equacionamento estrutural a ser

seguido. A metodologia parte da equação para o modelo de viga de Euller-Bernoulli, como a seguir:

$$EI\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + (\rho_t A_t + \rho_m A_i)\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + 2\rho_m A_i U\frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} + \rho_m A_i U^2\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \qquad (1)$$

onde, w é o deslocamento da tubulação/duto em flexão, em uma posição x e em um dado instante de tempo t, EI é a rigidez flexural da tubulação, ρ_t e ρ_m são as massas específicas do material da tubulação e do fluido, respectivamente, A_t e A_i as áreas da seção transversal e interna, respectivamente e U é a velocidade do escoamento. Os termos $2\rho_m A_i U\frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x}$ e $\rho_m A_i U^2\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$ são os efeitos giroscópicos e centrífugos da equação, respectivamente, gerados devido ao escoamento interno de fluido.

[059] Considerando-se a equação (1) acima, assume-se movimento harmônico no tempo e no espaço de w e para que se possa obter a equação de dispersão analítica do sistema, dada por:

$$EIk^4 - (\rho_t A_t + \rho_m A_i)\omega^2 + 2\rho_m A_i U k\omega - \rho_m A_i U^2 k^2 = 0 \qquad (2)$$

onde k é o número de onda flexural e ω é a frequência angular.

[060] Em seguida, determina-se a importância dos termos giroscópico e centrífugo para definir a menor frequência ω admissível dentro das velocidades de

escoamento consideradas. Para isso, calcula-se a curva de dispersão, ou seja, o número de onda flexural k em função da frequência harmônica ω, com todos os termos da equação (1) e sem os termos giroscópico e centrífugo. A banda de frequência e velocidades de escoamento em que a diferença entre essas duas curvas é menor do que 6% é considerada a região de validade da metodologia implementada de acordo com uma configuração exemplificativa da presente invenção.

[061] Definida a velocidade de escoamento em que essa metodologia é válida, é necessário estimar a frequência máxima de validade da metodologia. A frequência máxima é obtida ao se comparar o comportamento dos modelos de viga de Euller-Bernoulli e Timoshenko, como demonstrado de maneira exemplificativa na Figura 2. Assim, são obtidas as curvas de dispersão a partir dos dois modelos, para a velocidade máxima de escoamento em que essa metodologia é válida, como obtida na etapa anterior.

[062] Mais especificamente, a respeito da velocidade máxima de escoamento, também chamada de velocidade de escoamento crítica, é previsto que a mesma pode ser determinada a partir da aplicação de uma análise modal, partindo da equação de movimento (1) e de condições de contorno. Esta velocidade máxima de escoamento representa a velocidade crítica, na qual a estrutura passa à vibrar de forma instável, podendo causar falhas. Sabe-se que a frequência natural do trecho tubular

diminui à medida que a velocidade de escoamento aumenta, até atingir o valor crítico no qual a frequência natural atinge um valor nulo e instabilidades no sistema ocorrem. A velocidade máxima de escoamento, ou crítica, é dada por:

$$v_c = \frac{\beta}{L}\sqrt{\frac{EI}{\rho_f A_i}} \quad (3)$$

onde β é uma constante que depende das condições de contorno do sistema, L é o comprimento do tubo e ρ_f é a massa específica do escoamento.

[063] Ainda, a relação aproximada entre a frequência natural com e sem escoamento é descrita pela equação:

$$\frac{f_0}{f_n} = \left(1 - \left(\frac{v}{v_c}\right)^2\right)^{1/2} \quad (4)$$

onde f_0 é a frequência natural da estrutura sujeita a escoamento com velocidade v e f_n é a frequência natural da estrutura sem escoamento.

[064] A velocidade crítica de escoamento para a qual a primeira frequência natural se torna nula é calculada a partir da equação (3) e para uma condição de contorno bi-apoiada em que o valor de β é igual a π. Este valor da velocidade crítica encontrado para condições experimentais do presente invento é de aproximadamente 115 m/s. Vale destacar que a velocidade de escoamento só tem influência significativa na dinâmica da tubulação,

quando atinge valores próximos à velocidade crítica. Ademais, os valores típicos de velocidade de escoamento encontrados em práticas de engenharia variam de 0 a 10 m/s em intervalos de 2 m/s, bem abaixo da velocidade crítica, o que corrobora a vasta aplicabilidade da metodologia aqui descrita.

[065] Ao confrontar as curvas de dispersão para Euller-Bernoulli e Timoshenko, para as mesmas condições de escoamento, considera-se que a frequência máxima para essa metodologia se dá quando as curvas de dispersão apresentam uma diferença de 2% na frequência.

[066] A partir da frequência máxima possível, válida pela análise de viga de Euller-Bernoulli, é possível obter o comprimento de onda λ equivalente a frequência máxima. Será apreciado por um técnico no assunto que o comprimento de onda se relacionada com o número de onda k da seguinte forma:

$$k = \frac{2\Pi}{\lambda} \quad (4).$$

[067] Com o valor máximo do comprimento de onda obtido, a distância mínima (d) entre dois sensores consecutivos dos pelo menos três sensores (T01, T02, V00) é estimada por meio da seguinte equação:

$$d = \frac{\Pi}{k_{máx}} \quad (5).$$

[068] Como o ruído e as condições do experimento podem causar pequenas diferenças na resposta do sistema

(sistemas estocásticos), é importante utilizar técnicas para sinais aleatórios que levem em consideração estimadores das respostas. A estimação da função resposta em frequência (FRF), via densidade espectral de potência (DEP), é uma técnica de extrema utilidade para este fim.

[069] Sendo assim, os dados obtidos pelos sensores de aceleração (T01, T02, V00) são analisados. Com base nos sinais medidos, a Função Resposta em Frequência (FRF) dos 3 sinais, dados por A_1, A_2 e A_3, que são as amplitudes de função resposta em frequência (FRF) dos sensores de aceleração (T01, T02, V00), é estimada utilizando-se o acelerômetro central (T02) como referência.

[070] Preferencialmente, de acordo com uma configuração exemplificativa da presente invenção, o acelerômetro central (T02) é utilizado como o acelerômetro de referência, visto que são necessários dois sinais, um atrasado ou adiantado em relação ao outro, para se obter a densidade espectral de potência (DEP) cruzada para o cálculo do estimador de função resposta em frequência (FRF). A consequência disso é que, para o acelerômetro central (T02), a amplitude da função resposta em frequência (FRF) será constante e igual a 1 e a fase será constante e igual a zero.

[071] A partir da relação entre as 3 respostas em frequência dos sinais de vibração, estima-se os números de onda experimental de flexão da tubulação k_{exp} em função

da frequência angular, através da relação:

$$k_{exp} = \text{acos}\left[\frac{(A_1+A_3)}{2A_2}\right]/d \quad (6)$$

onde, acos é o arco-coseno, d é a distância mínima entre dois sensores consecutivos e A_1, A_2 e A_3 são as amplitudes de função resposta em frequência (FRF) dos sensores de aceleração (T01, T02, V00).

[072] A seguir, aplica-se um método de ajuste da curva, a partir da estimativa da curva de dispersão com o método dos 3 pontos a partir das DEPs de cada acelerômetro. Será apreciado por um técnico no assunto que o método dos 3 pontos consiste em uma técnica, ou metodologia, de identificação de curvas de dispersão que correlaciona a fase do sinal medido em três pontos distintos no espaço (acelerômetros T01 T02 V00), de modo a obter as características de dispersão desse sinal.

[073] A curva ajustada obtida, portanto, tem o formato da equação a seguir:

$$y = ax^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

sendo o número de onda k relacionado ao eixo y e a frequência angular ω relativa ao eixo x, como mostrado na equação abaixo:

$$k = a\omega^{\frac{1}{2}} \quad (8).$$

[074] Assim, o coeficiente a da curva de ajuste é uma função da massa específica da mistura ρ_m, conforme

a equação abaixo:

$$a = \sqrt[4]{\frac{\rho_t A_t + \rho_m A_i}{EI}} \quad (9)$$

onde, ρ_t e ρ_m são as massas específicas do material da tubulação e da mistura de fluidos, respectivamente, EI a rigidez flexural do tubo, A_t e A_i as áreas da seção transversal e interna, respectivamente.

[075] Uma vez obtida a massa específica da mistura, a próxima etapa é determinar a fração de vazio da mistura, por meio da média ponderada da massa específica de cada fase, calculada como a seguir:

$$\rho_m = \alpha\rho_{gás} + (1-\alpha)\rho_{líquido} \quad (10)$$

onde, α equivale ao valor da fração de vazio.

[076] Ademais, de acordo com uma configuração exemplificativa da presente invenção, as Figuras 3 a 5 mostram um exemplo de aplicação da metodologia adotada, desde a obtenção dos sinais temporais pelos sensores até a determinação da fração de vazio.

[077] A Figura 3 mostra os pelo menos três sensores de aceleração (acelerômetros) posicionados externamente à tubulação, em que os sinais temporais de aceleração são assim obtidos com base na vibração do duto causada pelo escoamento interno da tubulação.

[078] Os sinais obtidos por ao menos três acelerômetros (T01, T02, V00) são processados por um dispositivo de processamento para se obter as Densidades

Espectrais de Potência (DEPs) e as Funções Resposta em Frequência (FRFs) para cada um dos sinais, como demonstrado na Figura 4.

[079] No próximo passo, utiliza-se o método dos três pontos a partir das DEPs de cada acelerômetro (T01, T02, V00) para se obter uma curva de dispersão, como demonstrada de maneira exemplificativa na Figura 5. Essa curva de ajuste é utilizada na função de ajuste de curva de mínimos quadrados não-lineares. As saídas da função são o coeficiente de ajuste a, e a qualidade de ajuste dada por um parâmetro denominado *"R-square"*.

[080] Por fim, como descrito anteriormente, com base no coeficiente de ajuste obtido, a fração de vazio α é determinada.

[081] A presente invenção dispensa o uso de excitadores externos do tipo "*shaker*", martelo de impacto, ou qualquer outro dispositivo de injeção de energia. Portanto, a estrutura é excitada pelo próprio escoamento, de forma que, para estimar as curvas de dispersão, é possível utilizar somente os pelo menos três acelerômetros, sendo um deles de referência. A diferença de fase entre os acelerômetros de medição e o acelerômetro de referência é suficiente para estimar a curva de dispersão, a partir do método dos três pontos para ajuste de curva. A utilização da excitação pelo próprio escoamento é justificada pelo fato de que a turbulência excita a estrutura em uma larga banda de

frequência.

[082] O dispositivo de processamento a que se refere a invenção diz respeito a um ou mais processadores capazes de processarem os sinais obtidos dos sensores e que fazem parte de um dispositivo de computação, que pode ser entendido como um ou mais computadores. O dispositivo de processamento pode incluir um microprocessador, microcontrolador, módulo de processamento, circuito integrado, ou qualquer outro dispositivo computacional relacionado.

[083] Ainda, é previsto pela presente invenção, que os sensores podem ser acoplados à tubulação por meio de um suporte apropriado, colados, ou inseridos a partir de ímãs que facilitam sua inserção na superfície e flexibilidade de aplicação em tubulações submersas.

Exemplo de concretização: Resultados Experimentais para Escoamento Bifásico

[084] Testes experimentais para aplicação da metodologia descrita acima na presente invenção para obter a fração de vazio foram conduzidos utilizando pontos experimentais ar-água e os resultados são apresentados abaixo.

[085] Para os testes realizados, as propriedades de material e geométricas da tubulação se encontram na tabela 1, na qual E é o módulo de elasticidade, ρ é a massa específica, d_i o diâmetro interno e h a espessura da parede.

E (GPa)	ρ (kg/m^3)	d_i (mm)	h (mm)
209,55	7270,4	50,8	3,5

Tabela 1

[086] Foram escolhidas condições de operação apropriadas para desenvolver diferentes padrões de escoamento bifásico liquido-gás, utilizando água para o liquido e ar para o gás. Os dados experimentais de aceleração e o método de três pontos são utilizados para obter a curva de dispersão para diferentes padrões de escoamento.

[087] Para o escoamento bifásico, são medidos 33 pontos, variando tanto a velocidade superficial de líquido quanto a de gás. São utilizadas as velocidades para obter diferentes padrões de escoamento. Para o caso bifásico, o mapa de padrão de escoamento de Barnea, Luninski e Taitel, apresentado na Figura 6, é utilizado para classificar os padrões observados e as velocidades superficiais de gás e de líquido para cada ponto experimental. A Figura 6 também mostra os padrões observados durante a etapa experimental, em que v_{sl} é a velocidade superficial do líquido e v_{sg} é a velocidade superficial do gás.

[088] Além disso, são apresentados abaixo os resultados de testes conduzidos para escoamento bifásico. Particularmente, são apresentadas a respostas em frequência, através da DEP, e as curvas de dispersão para alguns pontos experimentais. Ao final, são

apresentados os resultados para estimação da fração de vazio para todos os pontos experimentais. As estimativas são comparadas com o modelo de fração de vazio do estado da técnica conhecido como Modelo Unificado. Vale destacar que para os testes realizados a estrutura da seção de testes é excitada pelo próprio escoamento, de forma que, para estimar as curvas de dispersão, se fez uso somente dos três acelerômetros (T01, T02, V00), sendo um deles de referência (T02). A diferença de fase entre os acelerômetros de medição (T01, V00) e o acelerômetro de referência (T02) é suficiente para estimar a curva de dispersão, a partir do método dos três pontos, descrito anteriormente. A utilização da excitação pelo próprio escoamento é justificada pelo fato de que a turbulência excita a estrutura em uma larga banda de frequências. Para a análise, são selecionados cinco pontos experimentais, para os quais dois é observado o padrão intermitente (pontos 7 e 13), um é observada a transição entre intermitente e bolhas dispersas (ponto 23), e dois é observado o padrão bolhas dispersas (pontos 29 e 33). Os pontos analisados estão apresentados no mapa de padrão de escoamentos na Figura 7, onde v_{sl} é a velocidade superficial do líquido e v_{sg} é a velocidade superficial do gás.

[089] Primeiramente, é apresentada a DEP de cinco pontos experimentais na Figura 8. Também é apresentada a FRF do tubo preenchido com água, mas sem escoamento,

para comparação. As DEPs são normalizadas pelo valor máximo de pico, para cada ponto experimental, com a finalidade de facilitar a visualização. Observa-se uma forte influência do padrão de escoamento na resposta em frequência. Para os pontos experimentais 7 e 13 observou-se o padrão intermitente, tanto pela Figura 7 (pontos identificados com um círculo) quanto por observação direta obtida pela câmera de alta velocidade. O ponto 23 está na linha de transição entre os padrões intermitente e bolhas dispersas e os pontos 29 e 33 são bolhas dispersas (identificados com um triângulo na Figura 7).

[090] Fica evidente que, para os padrões bolhas dispersas, pontos 29 e 33, o pico de frequência de ressonância coincide com o pico para a tubulação sem escoamento preenchida por água. Dessa forma, pode-se concluir que, pela maior massa de água inerente aos padrões bolhas dispersas, a frequência natural da estrutura é próxima à frequência natural da tubulação preenchida com água.

[091] Para os padrões intermitentes (pontos 7 e 13), observam-se dois fenômenos interessantes. Primeiro, observa-se o aumento da primeira frequência natural, devido a massa específica reduzida da mistura no tubo, causada pela presença das bolhas alongadas e dos pistões de líquido airados por pequenas bolhas. Segundo, observa-se o surgimento de um segundo pico de frequência para os pontos 7, 13 e 29. O surgimento do segundo pico

é justificado pela alternância entre bolhas de gás e pistão de líquido, nos padrões intermitentes. Durante o período em que a bolha de gás passa pelos sensores, a estrutura assume um valor de frequência natural diferente para o período em que passa o pistão de líquido, uma vez que a massa adicionada difere de uma situação para a outra. Como as DEPs são estimadas a partir de uma média de amostras de um mesmo sinal temporal, o resultado final é uma DEP média da bolha alongada e do pistão de líquido. Dividindo o sinal no tempo em pequenos trechos, de forma a isolar a região da bolha e do pistão e estimando a DEP para cada trecho, pode-se observar a variação da frequência natural ao longo do tempo. São utilizados 10 blocos de 0, 85 segundos cada. A Figura 9 apresenta esse resultado para o ponto experimental 7.

[092] Nota-se que dependendo do trecho do sinal temporal, a frequência de pico se aproxima de 18 Hz (bolha alongada) ou de 14 Hz (pistão de líquido). Se comparado com o padrão bolhas dispersas do ponto 33 (Figura 10), percebe-se que o pico de frequência se mantém constante ao longo de todo o sinal.

[093] Para o ponto 23, que se encontra na transição entre o regime intermitente e o bolhas dispersas, a DEP possui uma frequência de pico ligeiramente maior que a frequência das bolhas dispersas, pelo fato de que ainda há bolhas curtas presentes no escoamento, porém não

possui segundo pico.

[094] As curvas de dispersão são estimadas a partir do método dos três pontos. A curva ajustada, como anteriormente demonstrada de maneira exemplificativa na Figura 5, é agora mostrada para cada caso e adicionada aos resultados como a linha laranja nas Figuras 11 a 15. As curvas representando os limites inferior (monofásico gás) e superior (monofásico líquido) também são adicionadas aos resultados como linhas pretas tracejadas.

[095] Primeiramente, é avaliada a curva de dispersão considerando escoamento periódico, para o ponto experimental 8, com velocidade superficial do gás (v_{sg}) = 0,70 m/s e velocidade superficial do líquido (v_{sl}) = 1,33 m/s e os comprimentos do pistão e da bolha de Taylor de 0,70 m e 0,63 m, respectivamente. A curva é comparada com as curvas experimental e analítica considerando escoamento homogêneo. Pode-se observar na Figura 16 que as curvas analíticas para o escoamento periódico e homogêneo coincidem, e que a largura do "*band-gap*" (região em que as ondas não se propagam devido às interferências destrutivas que ocorrem em algumas bandas de frequência) é curta devido ao reduzido valor da razão entre a densidade linear de massa do fluido e da estrutura. Essa mesma comparação foi realizada para os demais pontos experimentais em que se foi observado o padrão intermitente. Deste modo, pode-se utilizar o

modelo homogêneo para o ajuste da curva experimental.

[096] Em seguida, são avaliadas as curvas de dispersão considerando escoamento homogêneo. É possível notar nas Figuras 14 e 15 que, para os casos em que o padrão observado é o de bolhas dispersas, as curvas ajustadas se aproximam do limite superior, indicando uma maior massa de líquido presente no tubo. Já nas Figuras 11 a 13, a curva ajustada está entre os limites, indicando a presença de gás e água.

Exemplo de concretização: Resultados Experimentais para Estimação da Fração de Vazio

[097] Abaixo são demonstrados os resultados obtidos para se estimar a fração de vazio a partir da curva de dispersão estimada.

[098] O coeficiente constante do ajuste é determinado e aplicado à relação da equação (11) abaixo para obter a massa específica da mistura, a partir da qual determina-se a fração de vazio:

$$E = \frac{(2\pi f_n)\rho A_t L^4}{I(\lambda L)^4} \qquad (11)$$

onde E é o módulo de elasticidade da tubulação, f_n é a primeira frequência de pico, ρ é a massa específica do tubo, A_t é a área de seção transversal, L o comprimento, I o segundo momento de área e λ o autovalor correspondente a condição de contorno, que para o presente caso possui o valor de 4,73.

[099] É utilizada uma tubulação de 0,622 m de comprimento, 50,8 mm de diâmetro interno e 3,5 mm de espessura. A massa específica do material é determinada com a utilização de uma balança de precisão e com o cálculo do volume. O valor encontrado para a massa específica é de 7270,4 kg/m^3. O ensaio dinâmico é realizado sobre uma espuma para simular as condições de contorno de ambas as extremidades livres. A seção de tubo é excitada através de um martelo de impacto, e a resposta é medida através de um único acelerômetro. O sinal de aceleração e de forçamento são processados através da DEP e da determinação do estimador de resposta em frequência. O espectro em frequência do trecho de tubo está apresentado na Figura 17.

[100] A partir da frequência de pico de 950,6 Hz e da relação da equação (11), estimou-se o módulo de elasticidade com o valor de 209,52 GPa.

[101] Para verificar a qualidade do ajuste de curvas, são calculados o coeficiente de determinação R^2 para todos os pontos, estes estão apresentados na Figura 18, por ponto experimental. Todos os ajustes retornaram um coeficiente de determinação maior que 0,96 indicando uma boa qualidade de ajuste.

[102] A metodologia é aplicada para todos os pontos experimentais e os resultados estão apresentados nas Figuras 19 a 24. As frações de vazio obtidas pelo Modelo Unificado de Tulsa são utilizadas como forma de

comparação, muito embora também possa apresentar erros na estimativa da fração de vazio. As barras de erro na estimativa experimental são calculadas a partir da incerteza de medição estimada. Os resultados são divididos entre três figuras para diferentes casos de velocidade superficial de líquido em função da velocidade superficial de gás.

[103] As Figuras 19 e 20 apresentam os resultados em termos da velocidade de mistura, visto que os ensaios experimentais correspondentes aos pontos 1, 29, 30, 31, 32 e 33 foram realizados para diferentes combinações de velocidade superficial de gás e de líquido, como visto na Figura 6. De maneira geral, observa-se uma boa concordância, dentro da incerteza de medição, entre as estimativas experimentais, obtidas com o método proposto, e as estimativas analíticas, obtidas através do Modelo Unificado de Tulsa.

[104] Dentre os padrões intermitentes, Figuras 21 a 25, os casos em que se tem a melhor aproximação são para os que as velocidades superficiais de líquido são vsl = 1,93 m/s, vsl = 1,32 m/s e vsl = 2,71 m/s. Para o caso em que vsl = 0,67 m/s, a fração de vazio estimada pelo Modelo Unificado fica consistentemente maior do que o estimado experimentalmente. Isso pode indicar algum viés de estimação tanto do modelo analítico ou do método proposto e precisa ser investigado com mais detalhes. Esses são casos bem definidos dentro de padrões intermitentes.

[105] Para casos de estimação com padrão do tipo bolhas dispersas, o método de estimação proposto retorna consistentemente frações de vazio próximo de zero. Isso se deve à pequena variação de massa, e consequentes pequenos valores de fração de vazio, devido às bolhas dispersas. Esse resultado está associado principalmente à baixa sensibilidade do duto de aço com relação a pequenas variações de fração de vazio, conforme averiguado em demais testes experimentais. É importante frisar que, apesar do Modelo Unificado de Tulsa ser utilizado como valor de referência, os resultados obtidos ainda precisam ser comparados com outra técnica experimental de medida direta da fração de vazio, dado que o modelo pode apresentar erros com relação aos valores reais *in situ*.

[106] O erro absoluto entre a fração de vazio estimada e a analítica é apresentado na Figura 26. Para 94% dos pontos experimentais, obteve-se um erro absoluto menor que 0,15.

[107] Vale destacar que para o presente trabalho, foi utilizada uma tubulação de aço com rigidez de 46.305, 35 Nm^2 e densidade linear de massa de 4,34 kg/m.

[108] Estudos experimentais adicionais demonstram que quanto maior a razão entre a densidade linear de massa do fluido e a densidade linear da estrutura, mais sensível esta é às variações de fração de vazio e menor influência terá o ruído na estimação. Ou seja, é possível

especular que se a técnica proposta fosse aplicada em uma tubulação de PVC, possivelmente as estimativas experimentais fossem substancialmente melhores. Além do mais, a abordagem proposta não depende de parâmetros globais da estrutura, como a primeira frequência natural, que é muito sensível às condições de contorno e pode sofrer alterações substanciais, mesmo durante a operação do duto.

Vantagens e Modificações:

[109] Os métodos, sistemas e dispositivos da presente invenção adotam uma abordagem simplificada, baseada em ondas, que depende somente das propriedades locais de geometria e material da tubulação e pode ser utilizada para estimar a fração de vazio em qualquer parte de uma tubulação, sem a necessidade de conhecer o seu comprimento e as condições de contorno previamente. Além disso, há somente a necessidade do uso de pelo menos três acelerômetros, sensores não intrusivos e que são de fácil aplicação, remoção e realocação na estrutura.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para medir características de um escoamento multifásico a partir de sinais de vibração estrutural **caracterizado** por compreender:

a. obter, por meio de sensores de aceleração (V01, V02, T00) fixados externamente à uma tubulação, sinais com base na vibração do escoamento interno da tubulação;

b. processar, por meio de um dispositivo de processamento, os sinais obtidos; e

c. determinar um coeficiente de ajuste de curva de dispersão de onda;

d. determinar quantidade de fração de vazio da mistura através do uso do coeficiente obtido em c);

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que processar os sinais obtidos (b) compreende ainda obter as Densidades Espectrais de Potência (DEPs) e as Funções Resposta em Frequência (FRFs) para cada um dos sinais obtidos.

3. Método, de acordo com a reivindicação 1 ou 2, **caracterizado** pelo fato de que compreende ainda determinar uma curva de dispersão de ondas com as DEPs a partir de cada sensor de aceleração (T01, T02, V00).

4. Método, de acordo com as reivindicações 1 a 3, **caracterizado** por compreender ainda:

obter uma frequência máxima de vibração;

determinar o comprimento de onda de flexão a partir da frequência máxima; e

calcular uma distância mínima (d) de posicionamento entre dois sensores (T01, T02, V00) consecutivos com base no comprimento de onda determinado e através do número de onda máximo da seguinte forma:

$$d = \frac{\Pi}{k_{máx}}$$

onde,
d é a distância mínima; e
$k_{máx}$ é o número de onda máximo.

5. Método, de acordo com as reivindicações 1 a 4, **caracterizado** pelo fato de que o coeficiente de ajuste de curva de dispersão (c) é utilizado para determinar a massa específica da mistura conforme a seguinte equação:

$$a = \sqrt[4]{\frac{\rho_t A_t + \rho_m A_i}{EI}}$$

onde,

a é o coeficiente de ajuste;

ρ_t é a massa específica do material da tubulação;

ρ_m é a massa específica da mistura;

EI é a rigidez flexural do tubo;

A_t é a área da seção transversal da tubulação; e

A_i é a área da seção interna da tubulação.

6. Método, de acordo com as reivindicações de 1 a 5, **caracterizado** pelo fato de que a fração de vazio da mistura (d) é obtida a partir da massa específica da mistura por meio da seguinte relação:

$$\rho_m = \alpha\rho_{gás} + (1-\alpha)\rho_{líquido}$$

onde,

α equivale ao valor da fração de vazio;

ρ_m é a massa específica da mistura;

$\rho_{gás}$ é a massa específica do gás; e

$\rho_{líquido}$ é a massa específica do líquido.

7. Sistema para medir características de um escoamento multifásico a partir de sinais de vibração estrutural **caracterizado** por compreender:

a. pelo menos três sensores de aceleração (T01, T02, V00); e

b. um dispositivo de processamento;

c. em que os sensores (T01, T02, V00) são fixados externamente à uma tubulação e configurados para obter sinais com base na vibração do escoamento interno da tubulação;

d. o dispositivo de processamento sendo configurado para processar os sinais obtidos e determinar um coeficiente de ajuste de curva de dispersão para determinar a fração de vazio da mistura;

8. Sistema para medir características de um escoamento multifásico a partir de sinais de vibração estrutural, de acordo com a reinvindicação 7, **caracterizado** por os sensores de aceleração (a) identifiquem as frequências naturais da estrutura e definirem as condições de contorno.;

9. Sistema para medir características de um

escoamento multifásico a partir de sinais de vibração estrutural, de acordo com a reinvindicação 7, **caracterizado** por o dispositivo de processamento (b) obter as Densidades Espectrais de Potência (DEPs) e as Funções Resposta em Frequência (FRFs) para cada um dos sinais;

10. Sistema para medir características de um escoamento multifásico a partir de sinais de vibração estrutural, de acordo com a reivindicação 7, **caracterizado** por os sensores de aceleração (c) serem acoplados à tubulação por meio de suporte apropriado, adesivo, ou fixação magnética, permitindo aplicação flexível, inclusive em tubulações submersas.

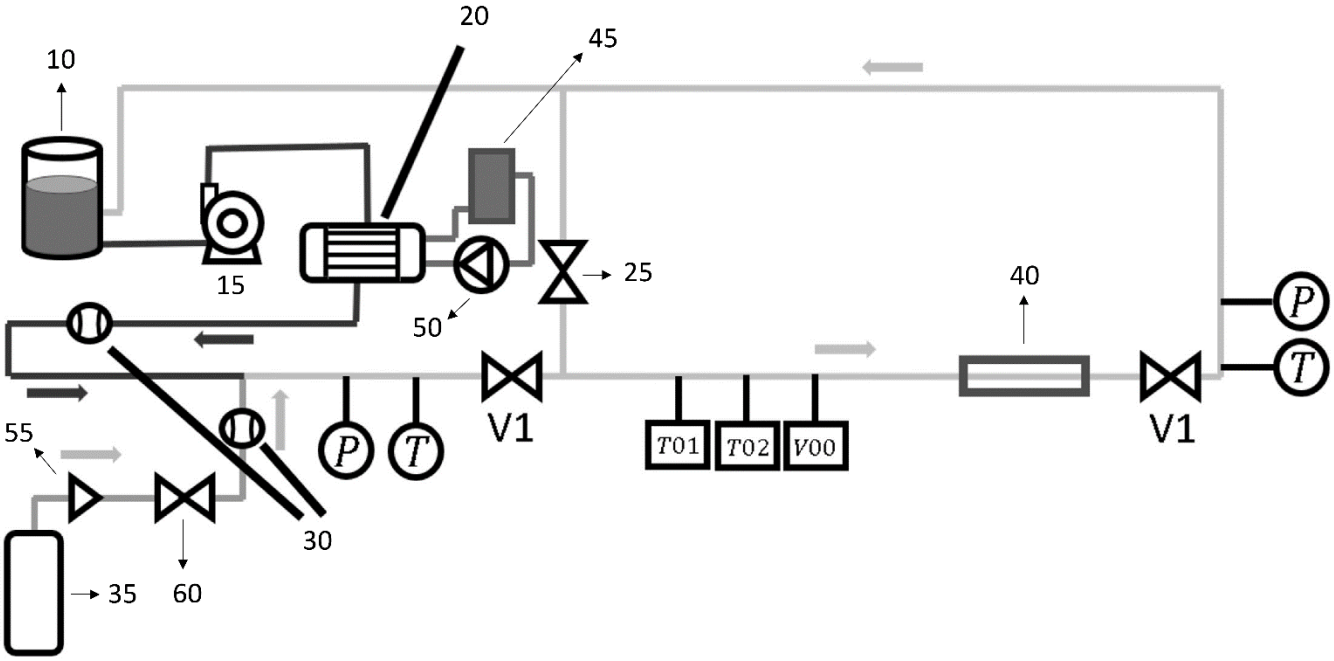


FIGURA 1

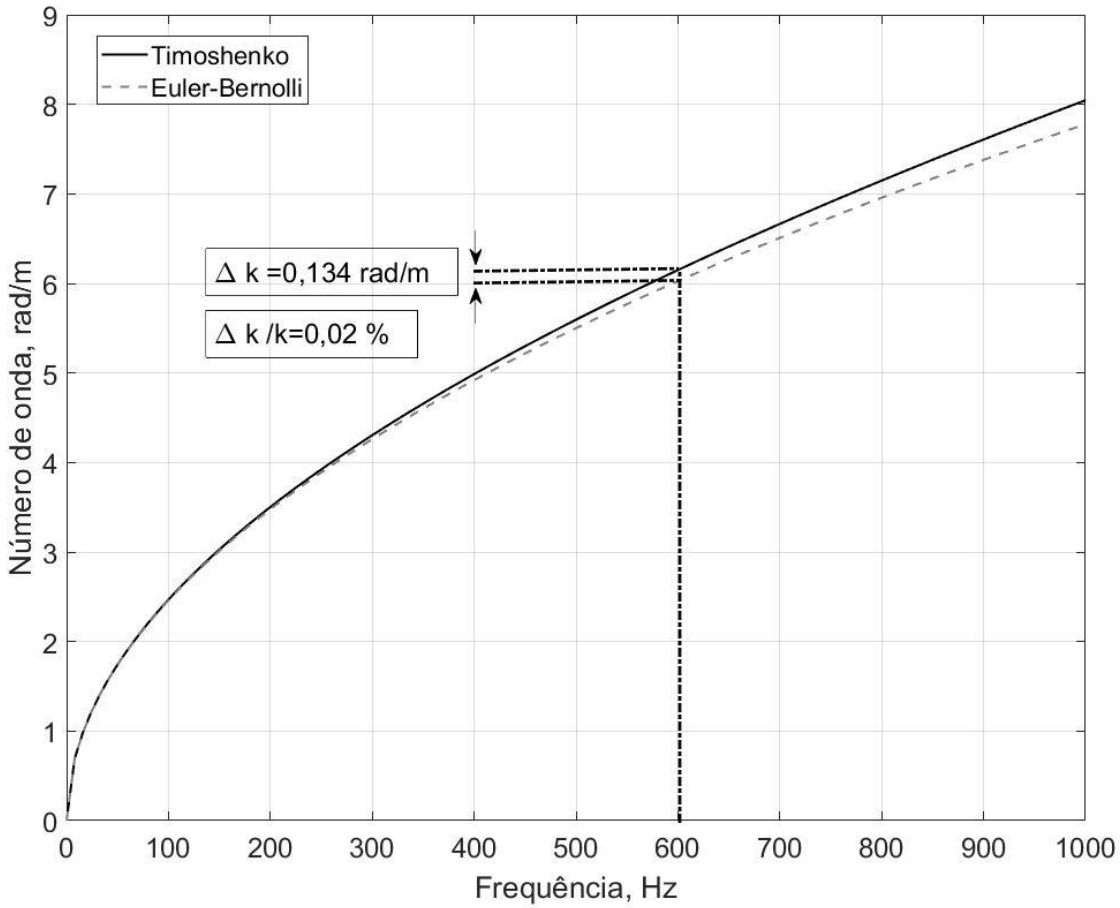

Timoshenko
Euler-Bernolli
Δ k =0,134 rad/m
Δ k /k=0,02 %
Número de onda, rad/m
Frequência, Hz
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000

FIGURA 2

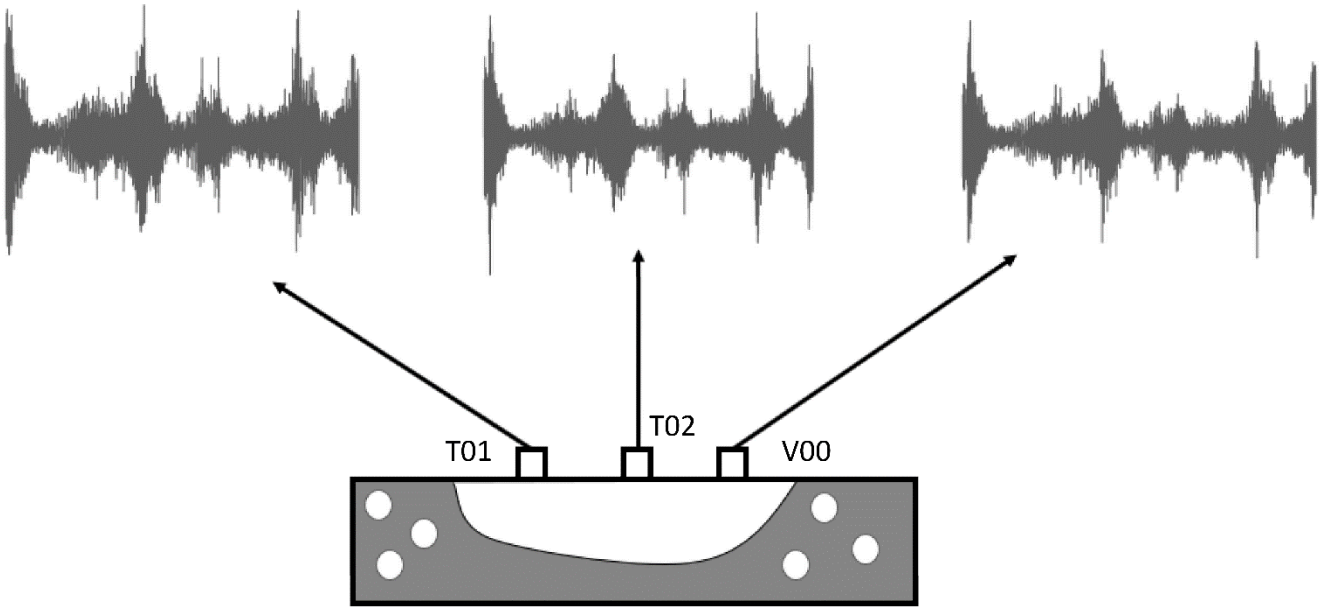


FIGURA 3

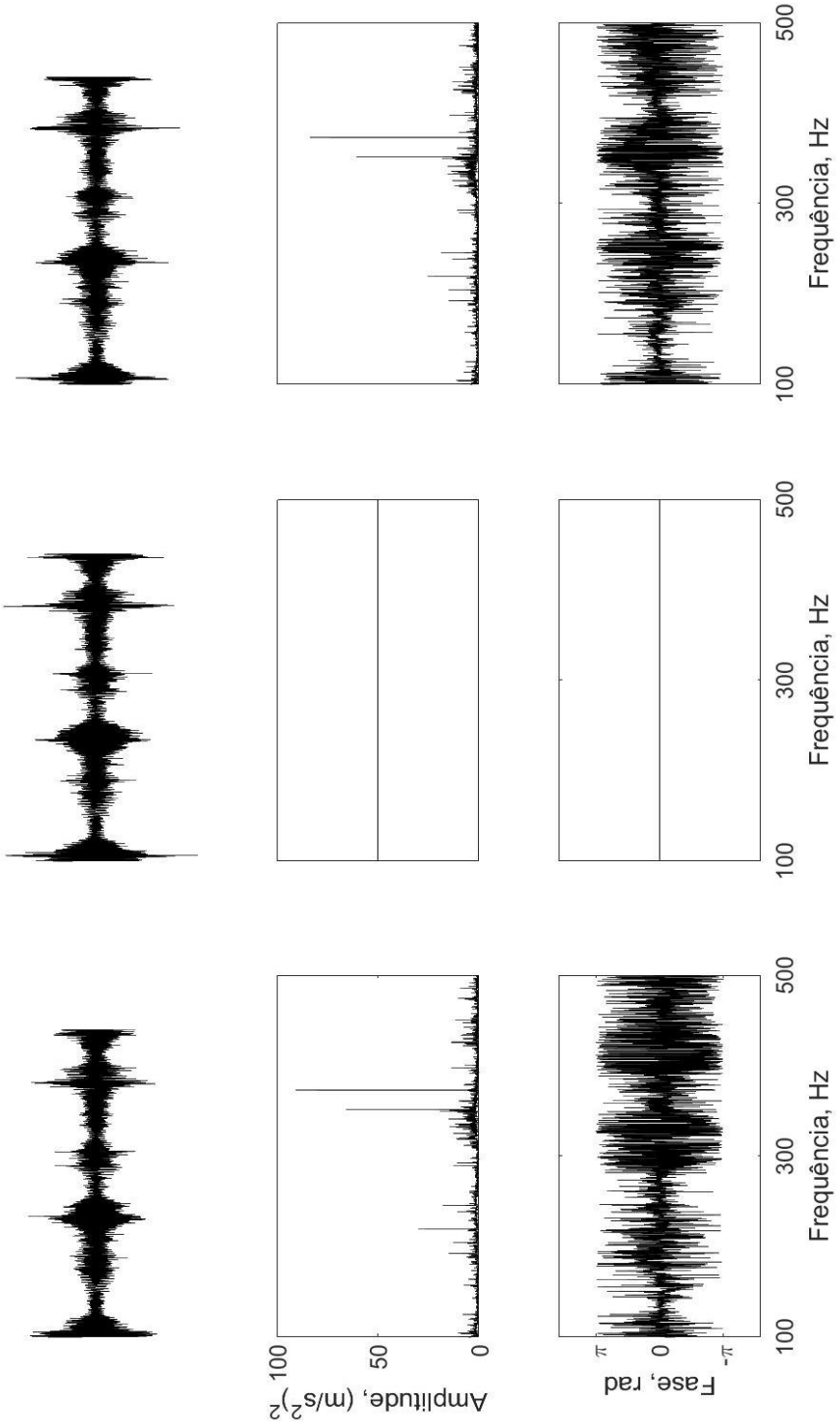

Amplitude, (m/s²)²
100
50
0
Fase, rad
π
0
-π
100
300
500
Frequência, Hz
100
300
500
Frequência, Hz
100
300
500
Frequência, Hz

FIGURA 4

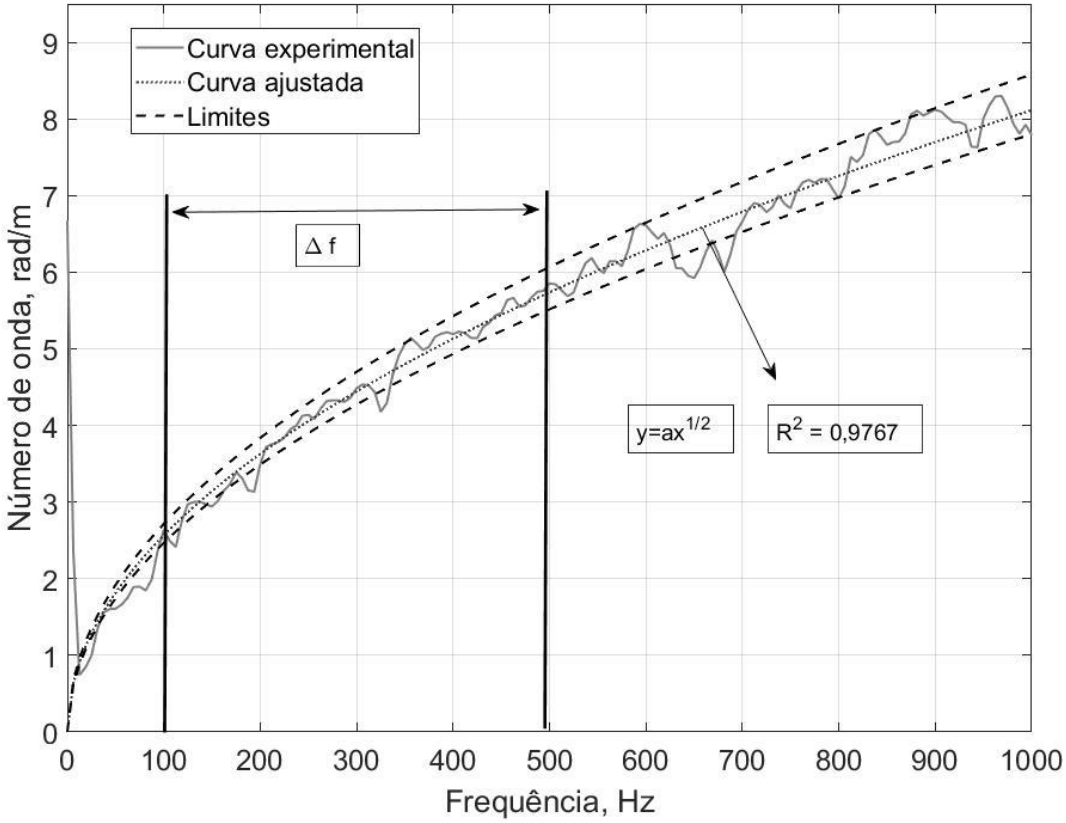

Curva experimental
Curva ajustada
Limites
Δ f
y=ax^1/2
R^2 = 0,9767
Número de onda, rad/m
Frequência, Hz
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000

FIGURA 5

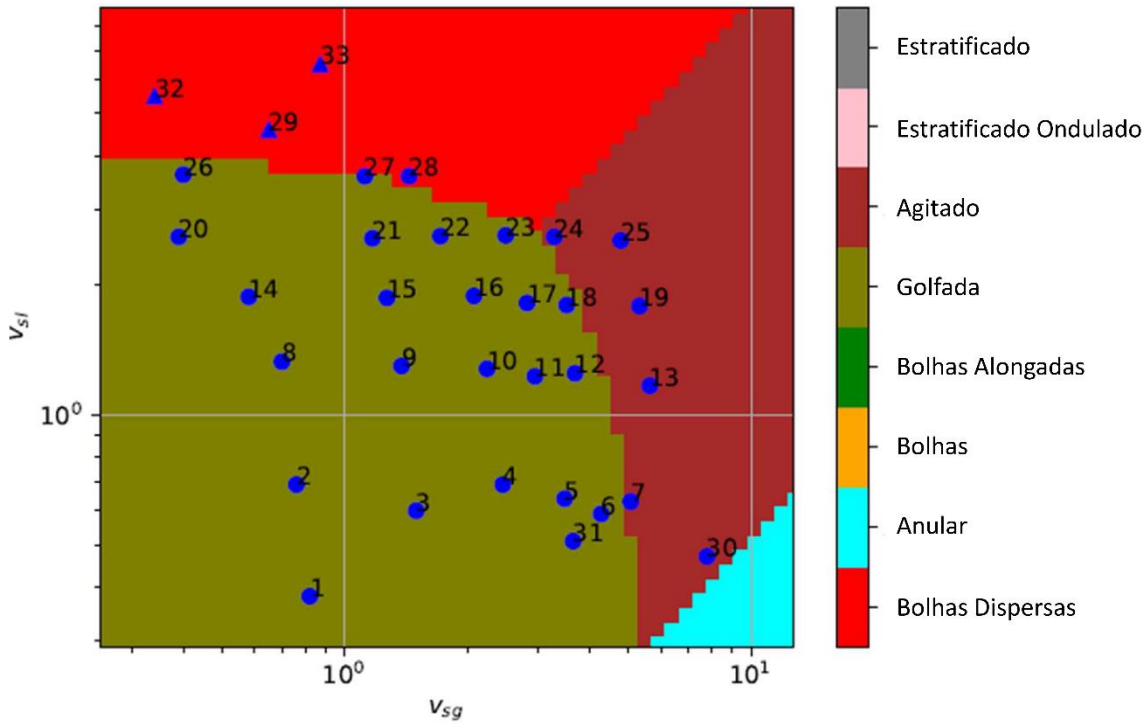


FIGURA 6

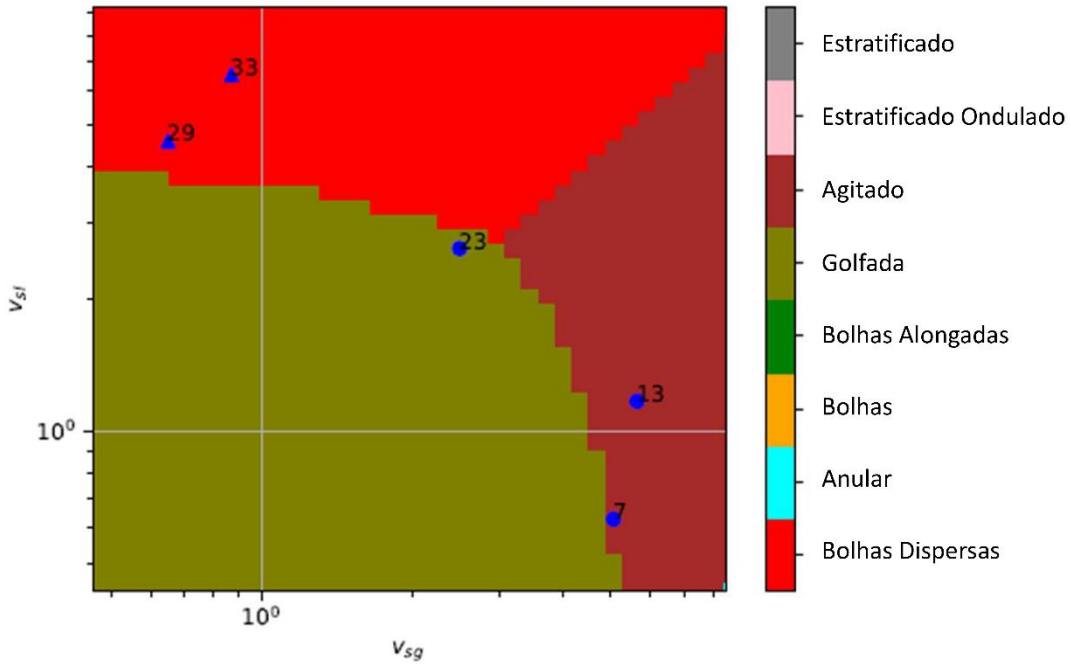


FIGURA 7

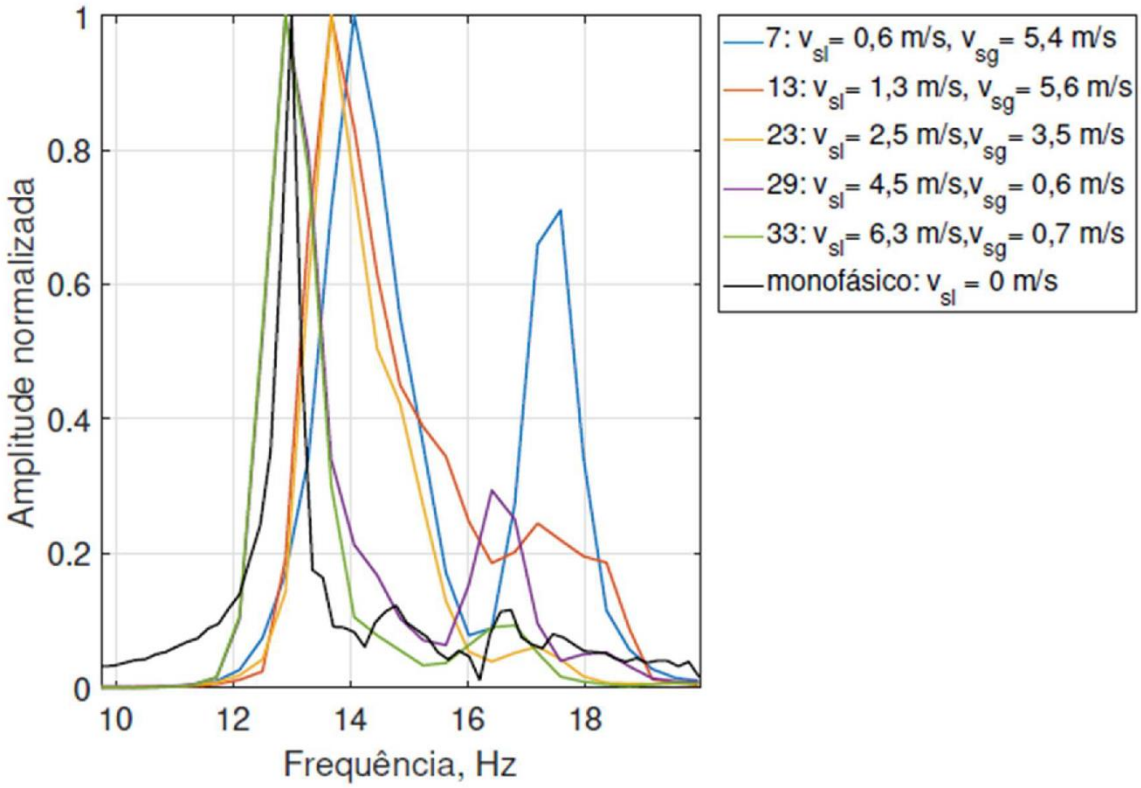

Amplitude normalizada
Frequência, Hz
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
10
12
14
16
18
7: v_sl= 0,6 m/s, v_sg= 5,4 m/s
13: v_sl= 1,3 m/s, v_sg= 5,6 m/s
23: v_sl= 2,5 m/s,v_sg= 3,5 m/s
29: v_sl= 4,5 m/s,v_sg= 0,6 m/s
33: v_sl= 6,3 m/s,v_sg= 0,7 m/s
monofásico: v_sl = 0 m/s

FIGURA 8

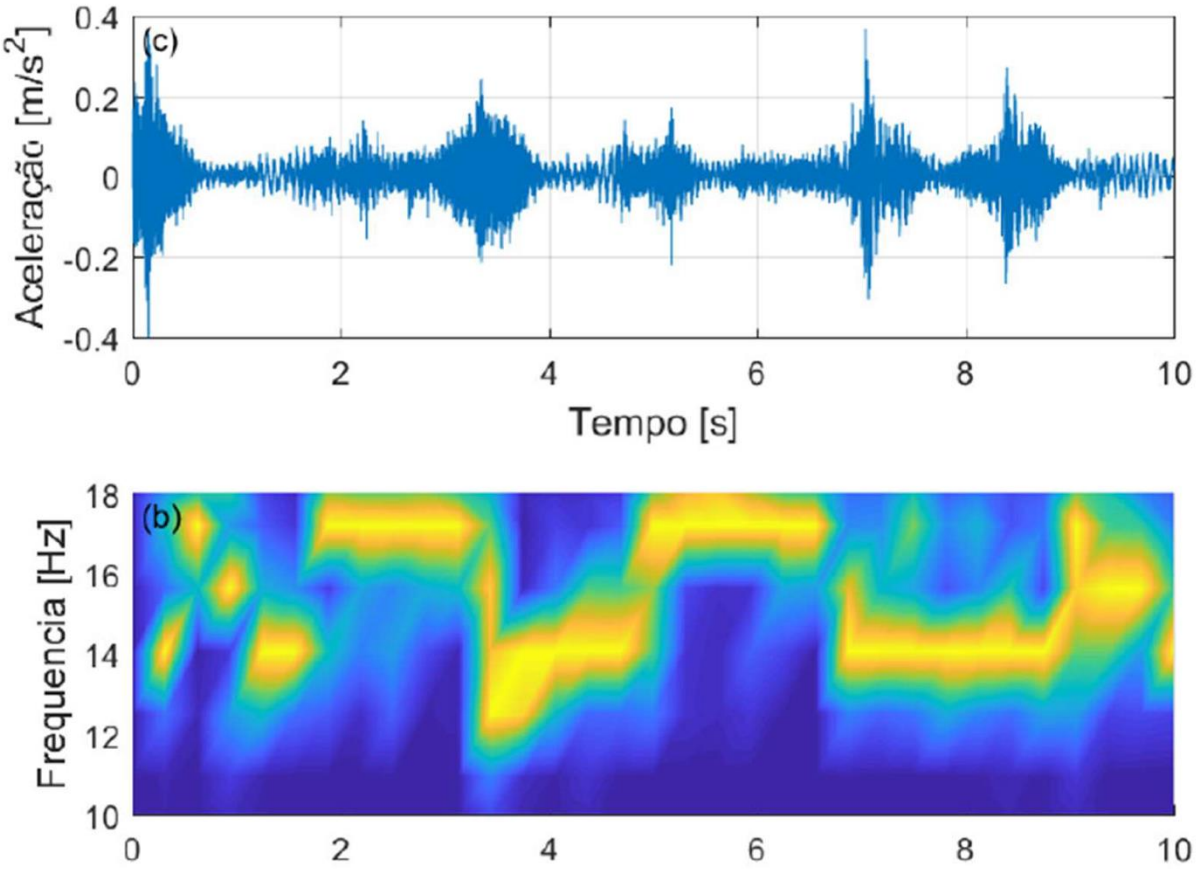

(c)
Aceleração [m/s^2]
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
0
2
4
6
8
10
Tempo [s]
(b)
Frequencia [Hz]
18
16
14
12
10
0
2
4
6
8
10

FIGURA 9

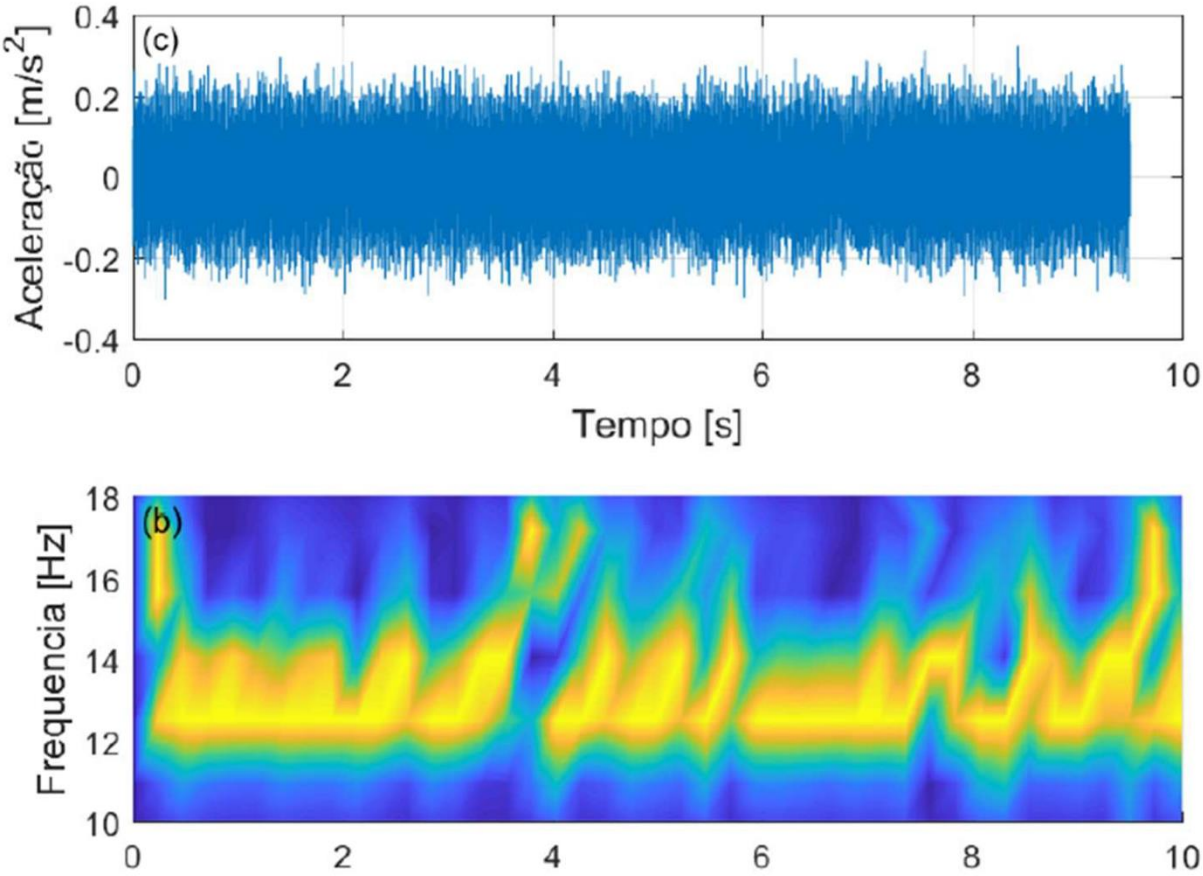
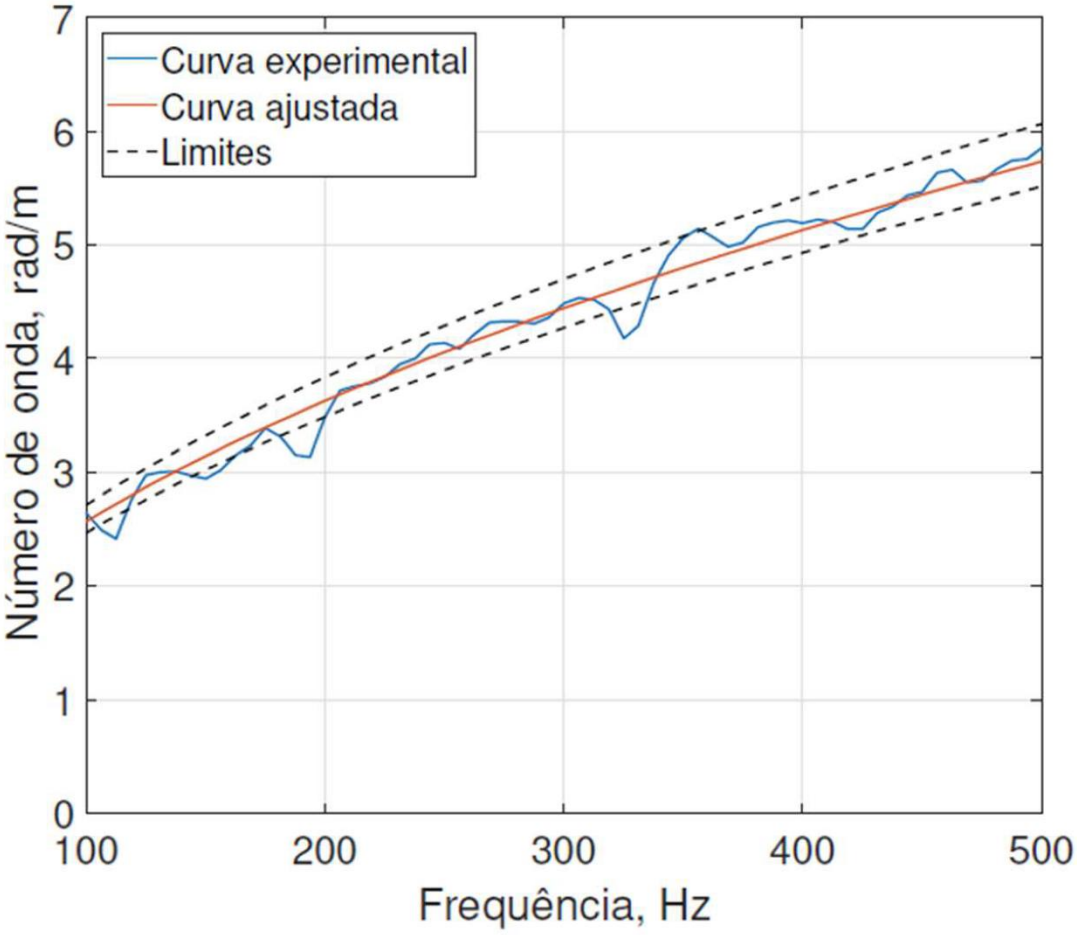
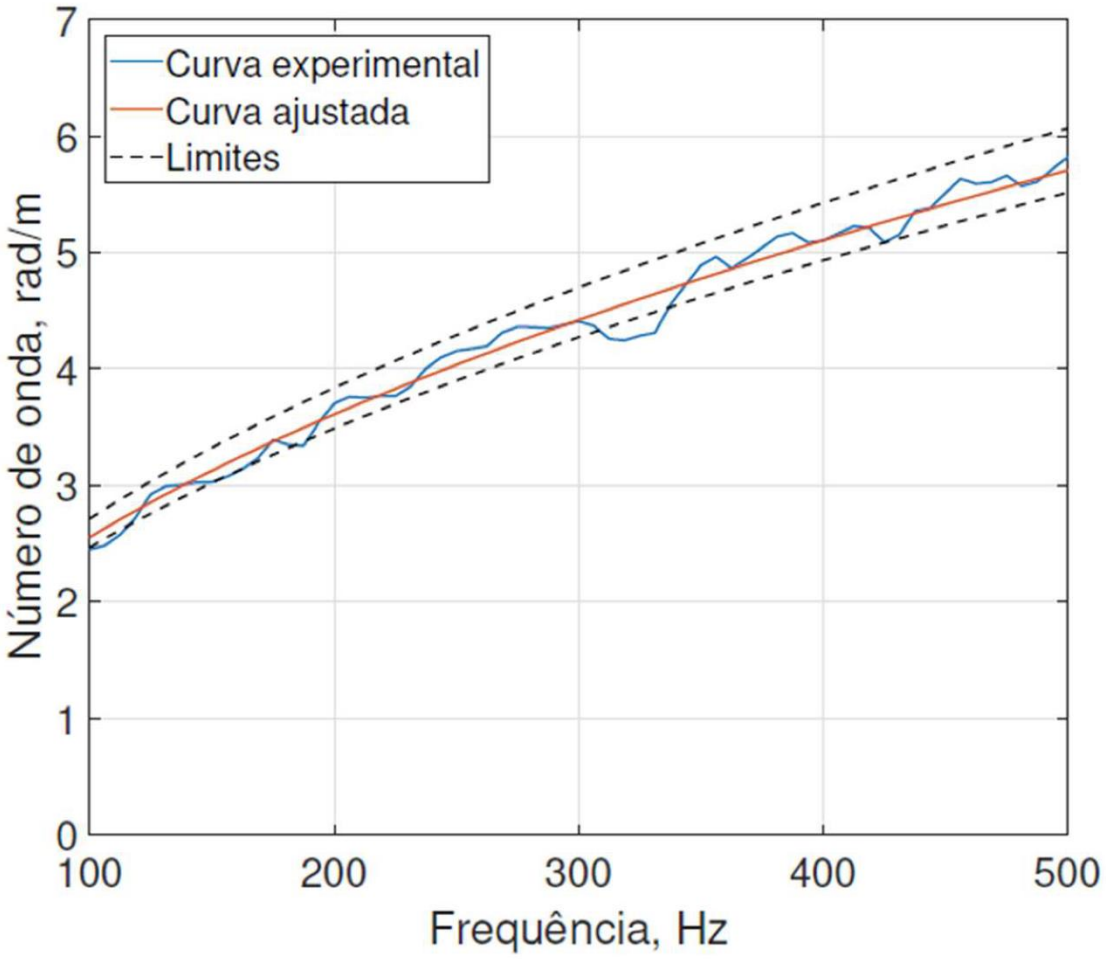

(c)
Aceleração [m/s^2]
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
0
2
4
6
8
10
Tempo [s]
(b)
Frequencia [Hz]
18
16
14
12
10
0
2
4
6
8
10

FIGURA 10



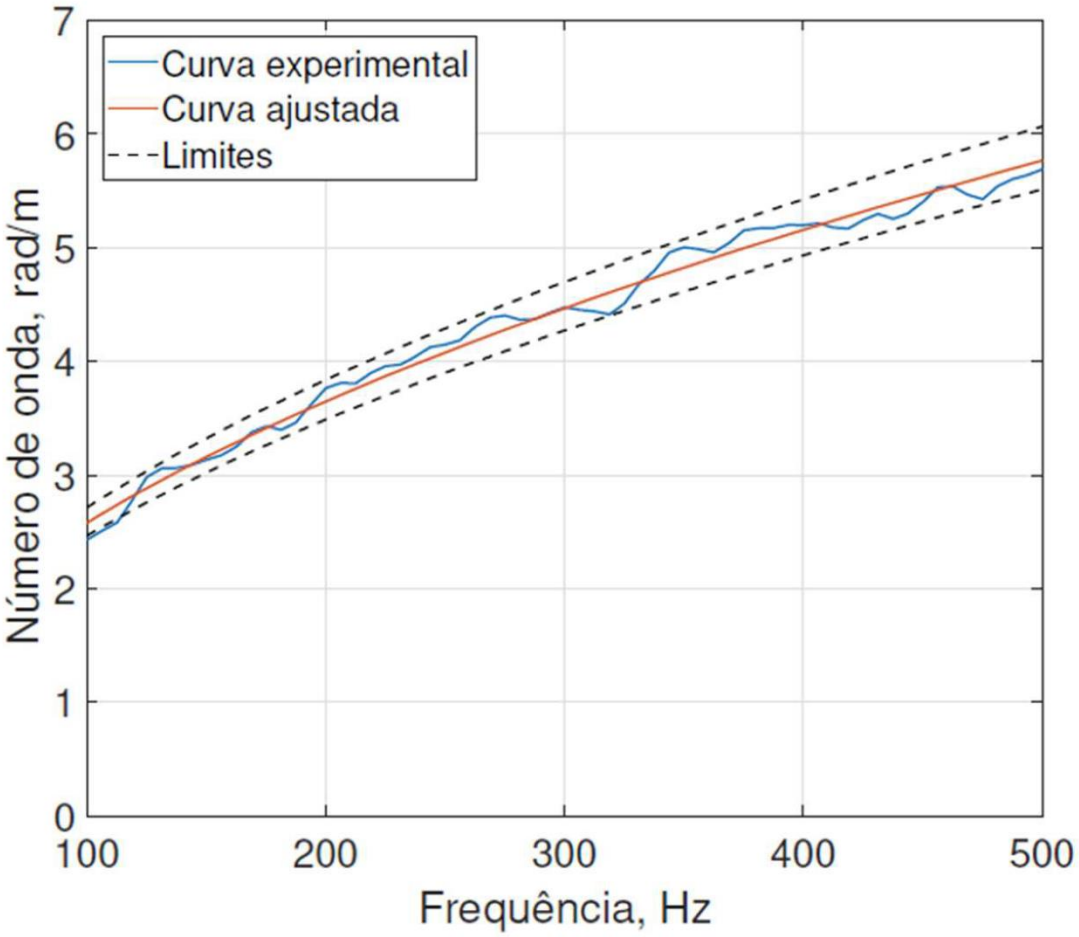
(a) 7, intermitente:
$v_{sl} = 0,6m/s,\ v_{sg} = 5,4m/s$

FIGURA 11



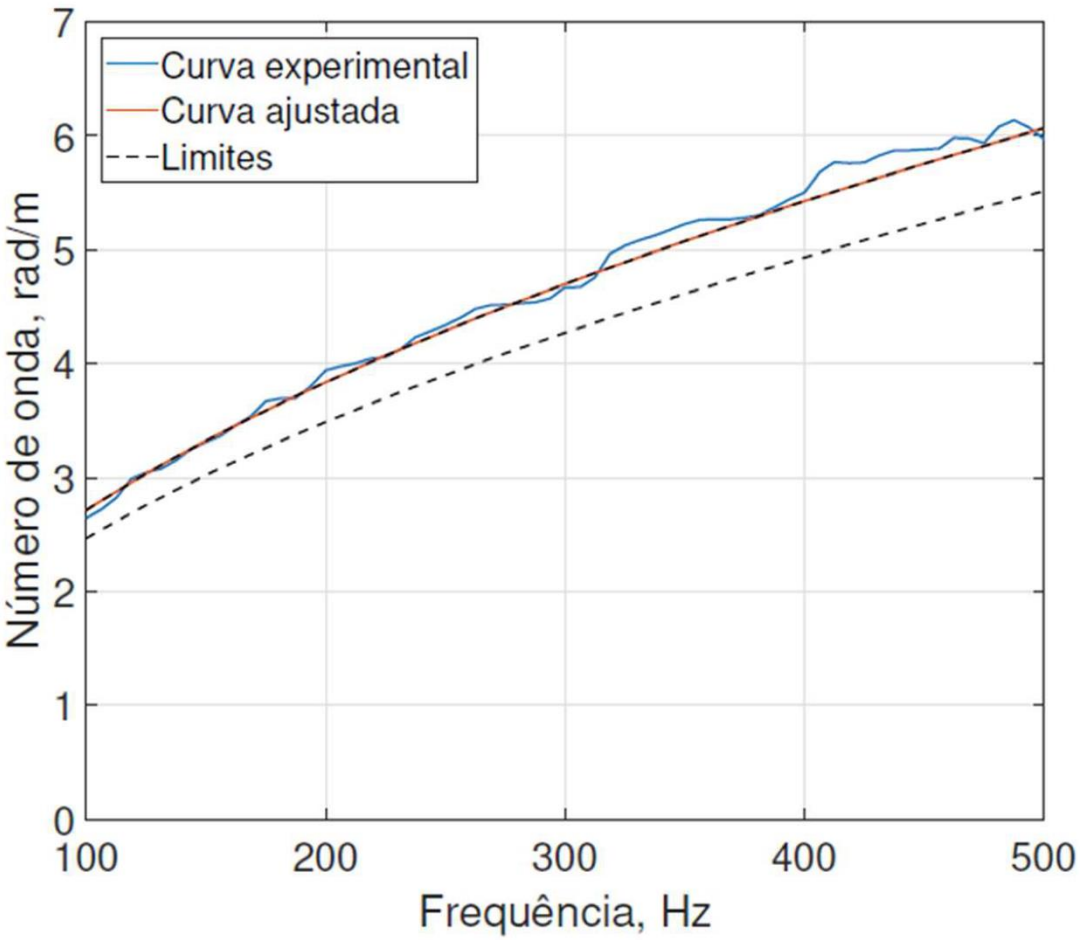
(b) 13, intermitente:
$v_{sl} = 1,3m/s,\ v_{sg} = 5,6m/s$

FIGURA 12



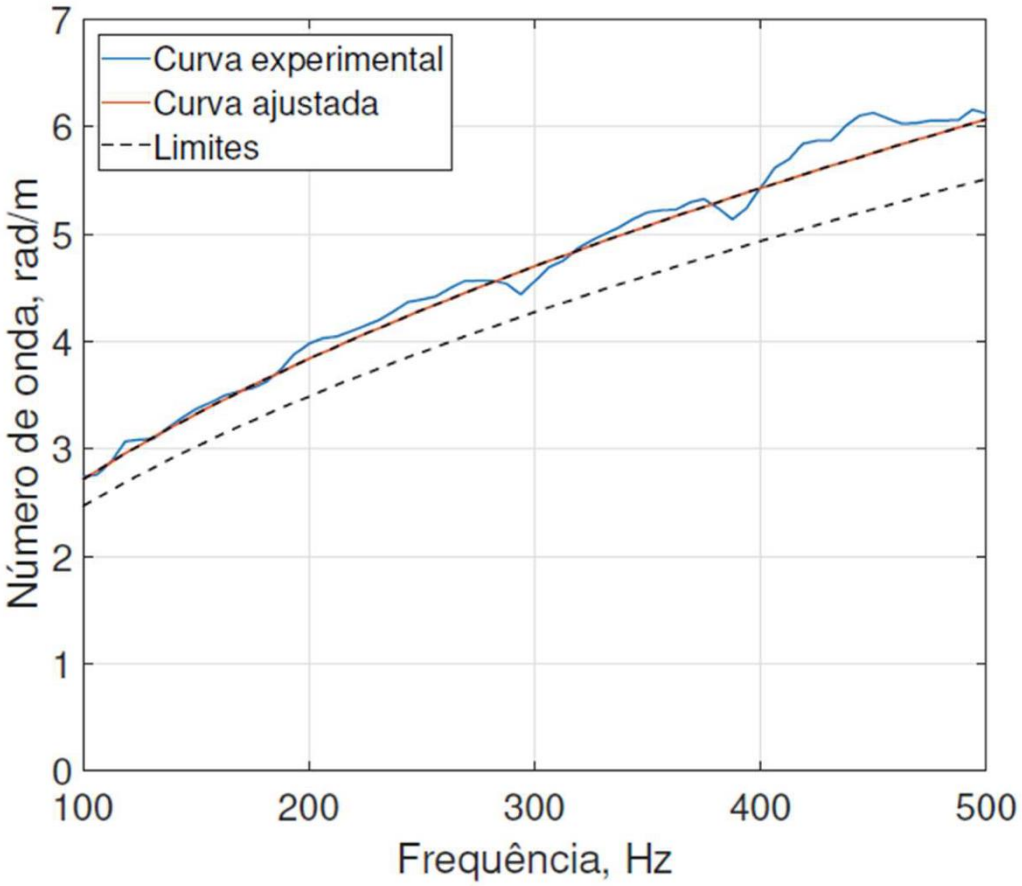
(c) 23, transição:
$v_{sl} = 2,5m/s,\ v_{sg} = 3,5m/s$

FIGURA 13



(d) 29, bolhas dispersas:
$v_{sl} = 4,5m/s,\ v_{sg} = 0,6m/s$

FIGURA 14



(e) 33, bolhas dispersas:
$v_{sl} = 6,3m/s,\ v_{sg} = 0,7m/s$

FIGURA 15

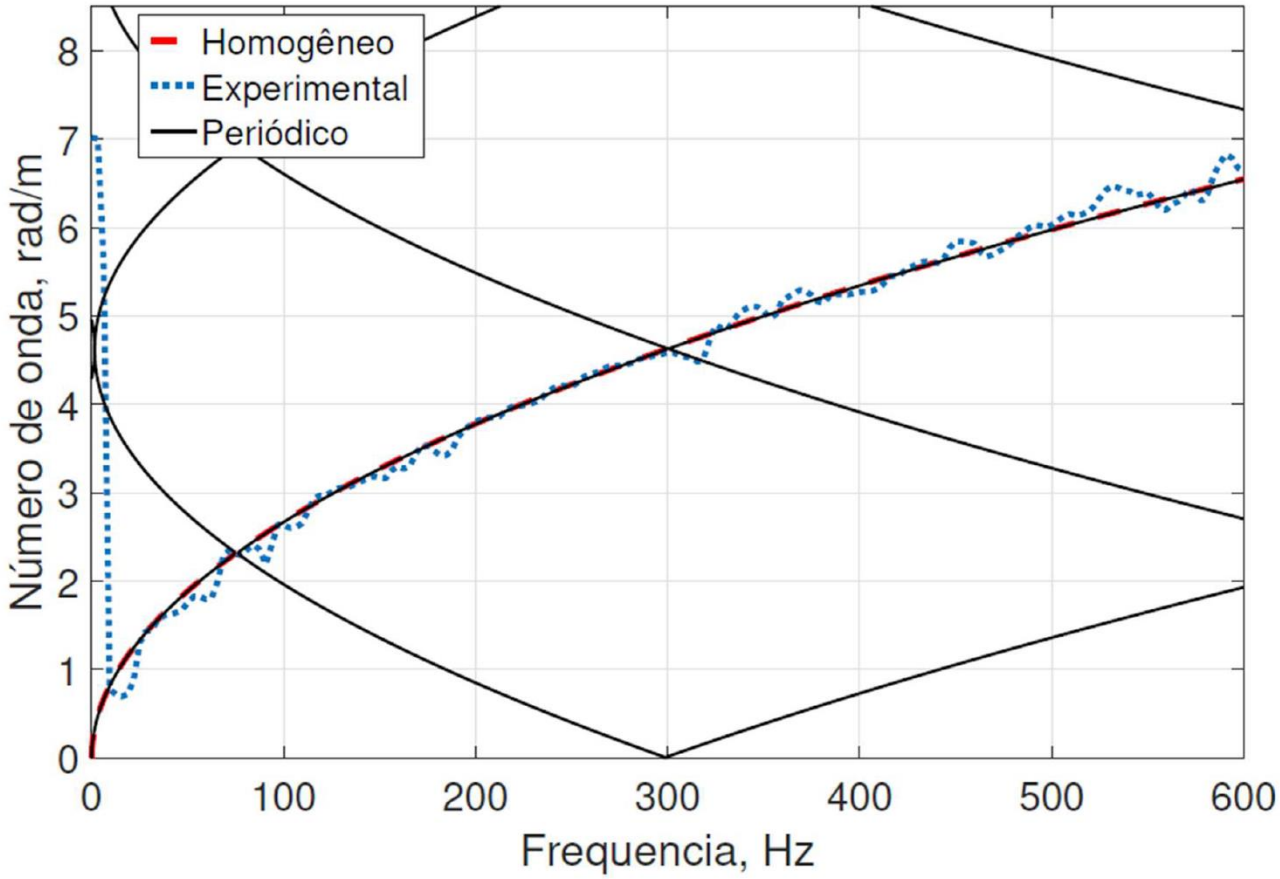

Homogêneo
Experimental
Periódico
Número de onda, rad/m
Frequencia, Hz
0
1
2
3
4
5
6
7
8
0
100
200
300
400
500
600

FIGURA 16

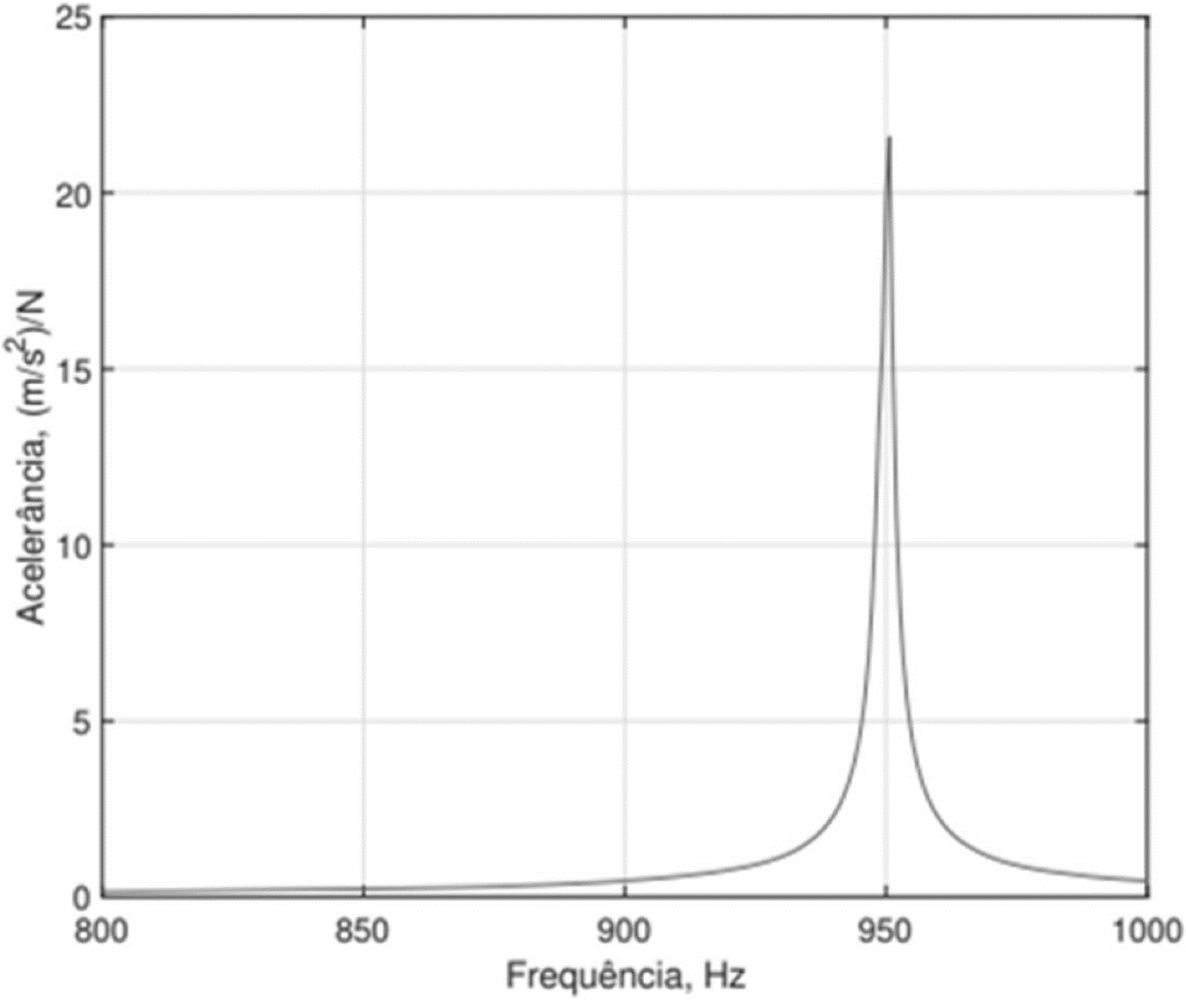

25
20
15
10
5
0
Acelerância, (m/s²)/N
800
850
900
950
1000
Frequência, Hz

FIGURA 17

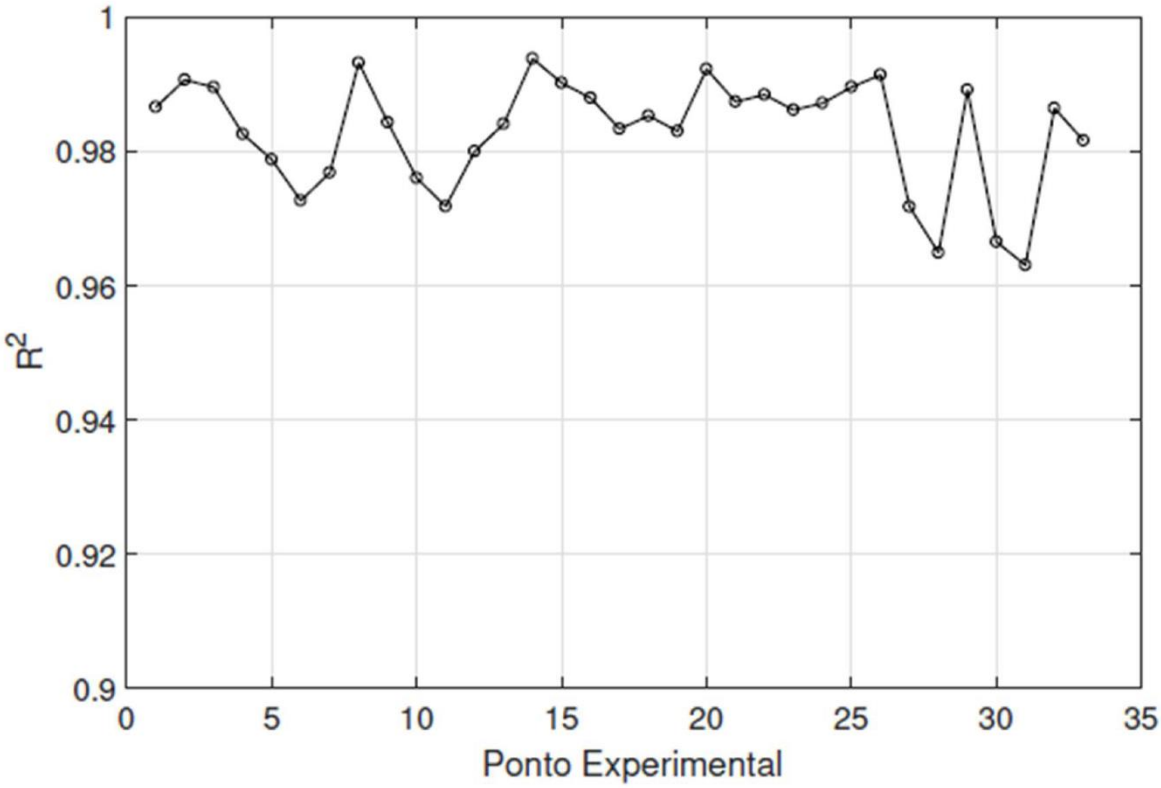
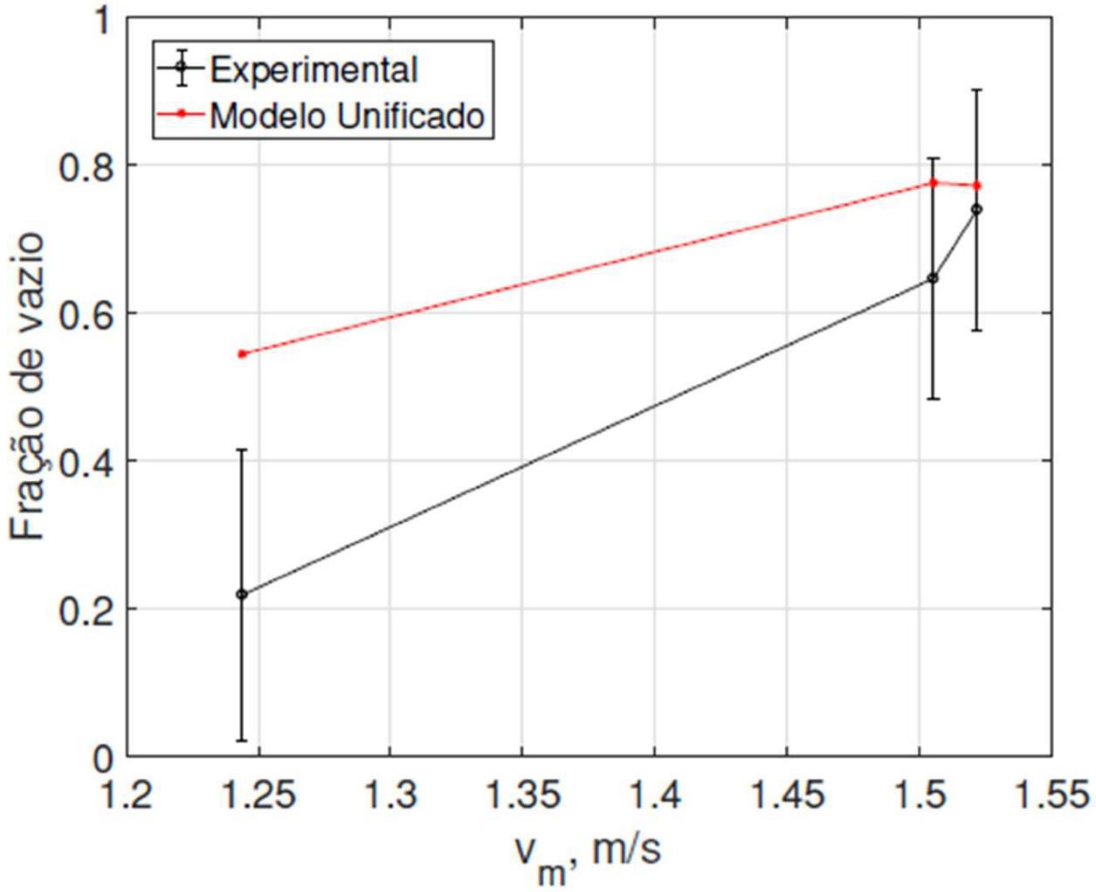
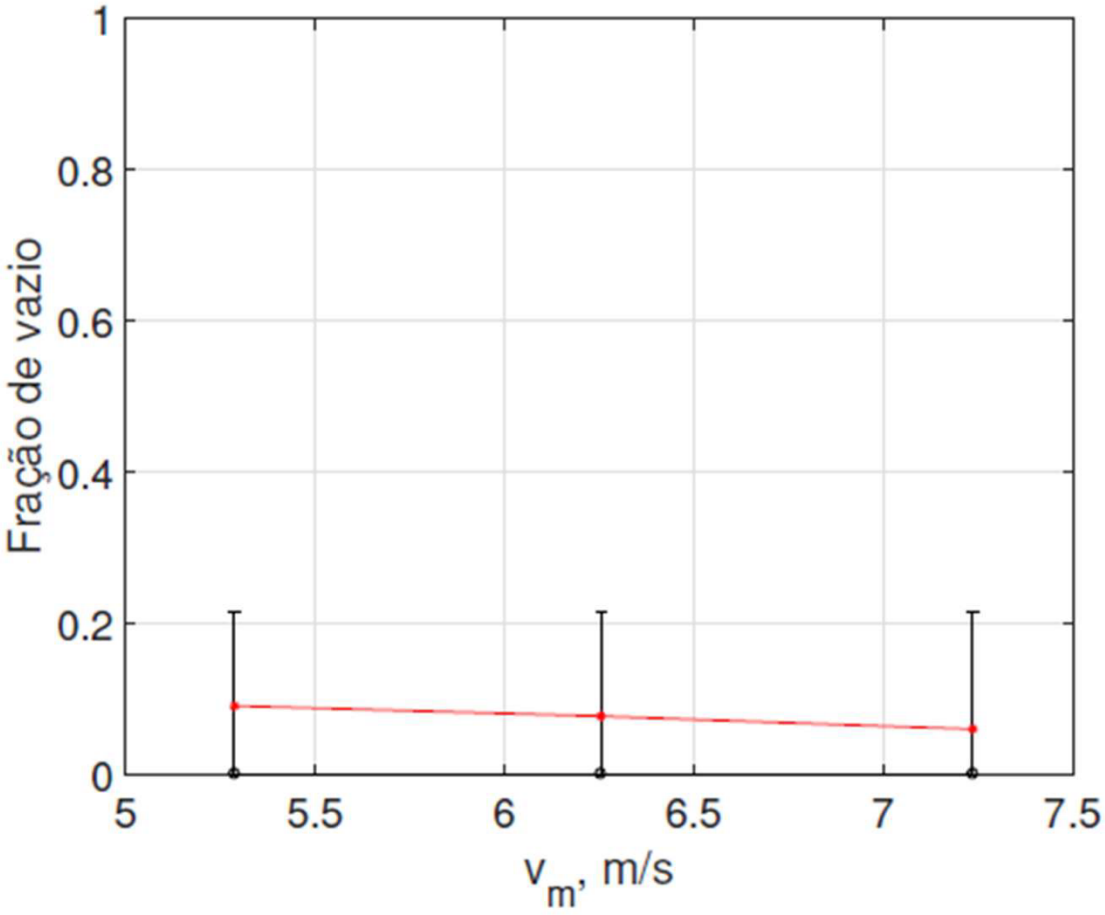


FIGURA 18



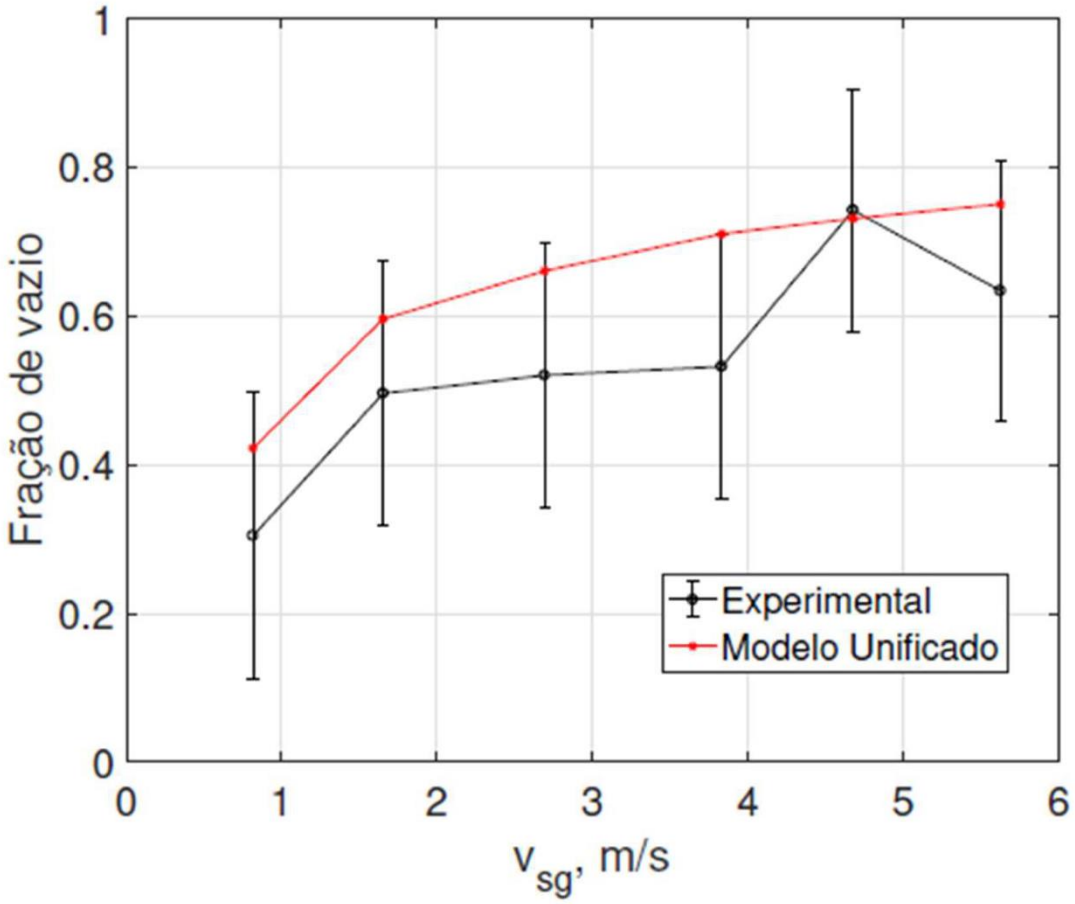
(a) Intermitente

FIGURA 19



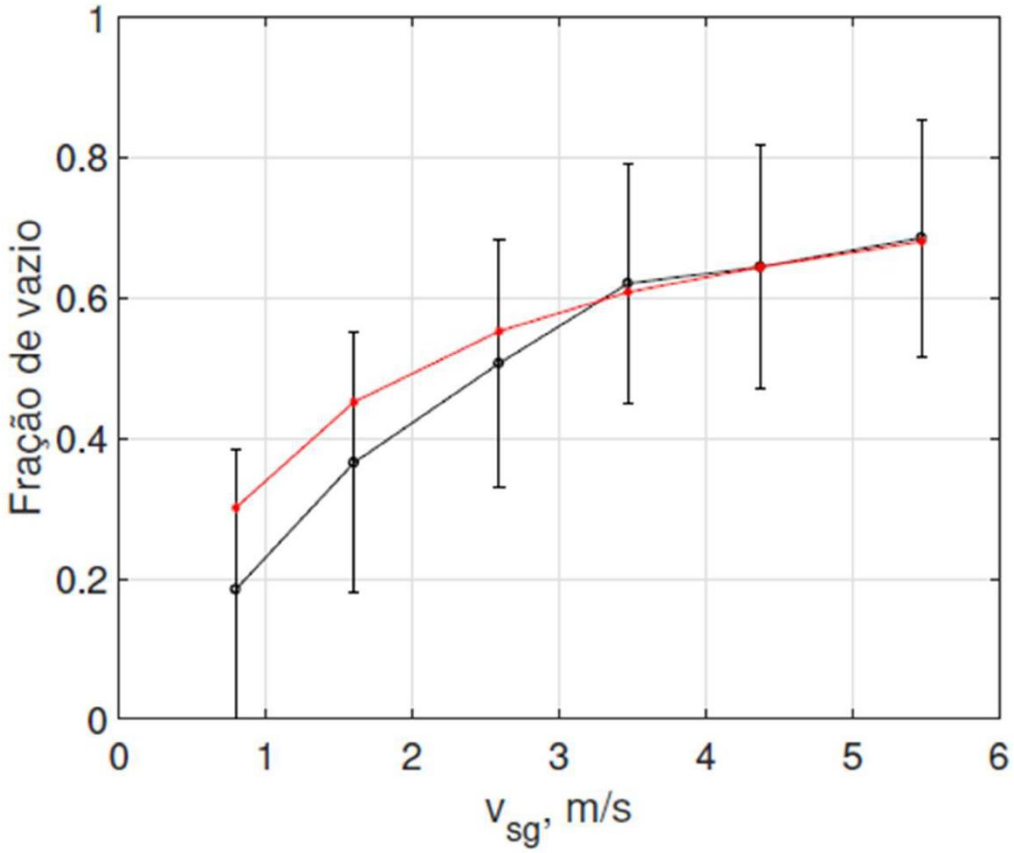
(b) Bolhas dispersas

FIGURA 20



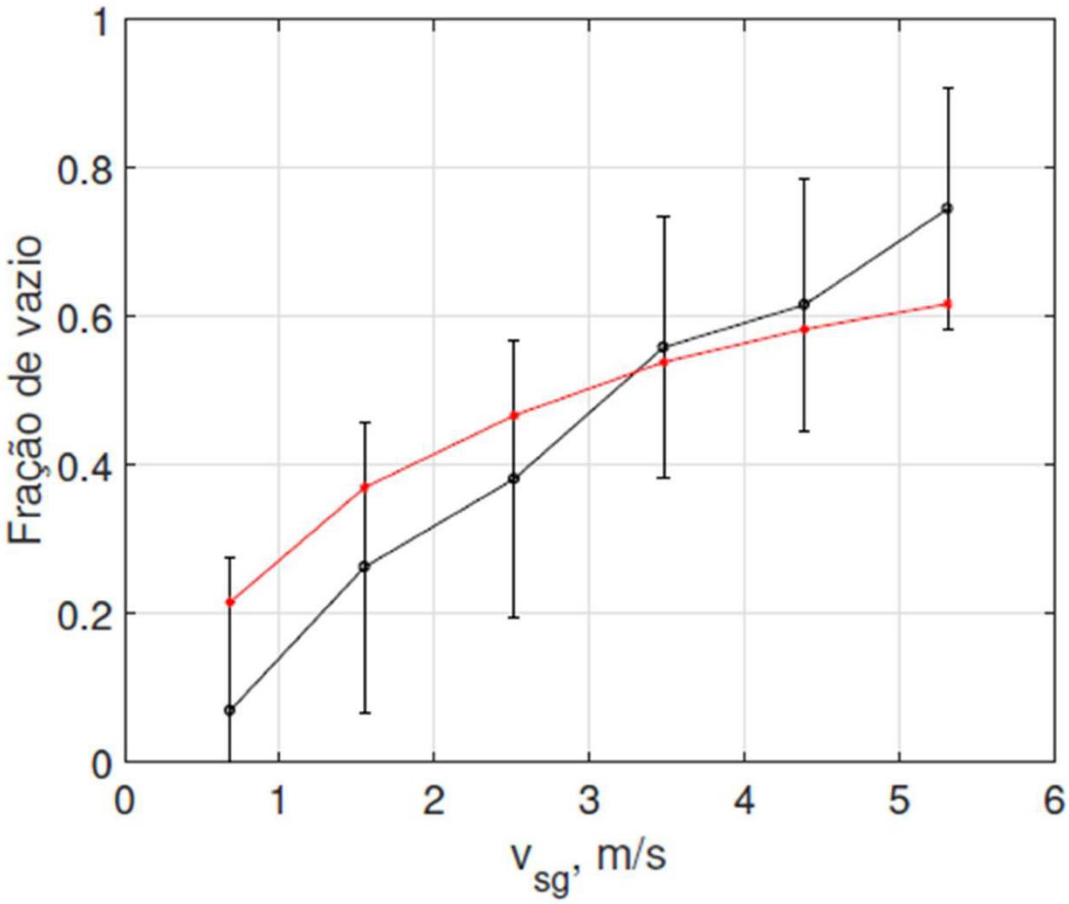
(a) Intermitente: $v_{sl} = 0,67m/s$

FIGURA 21



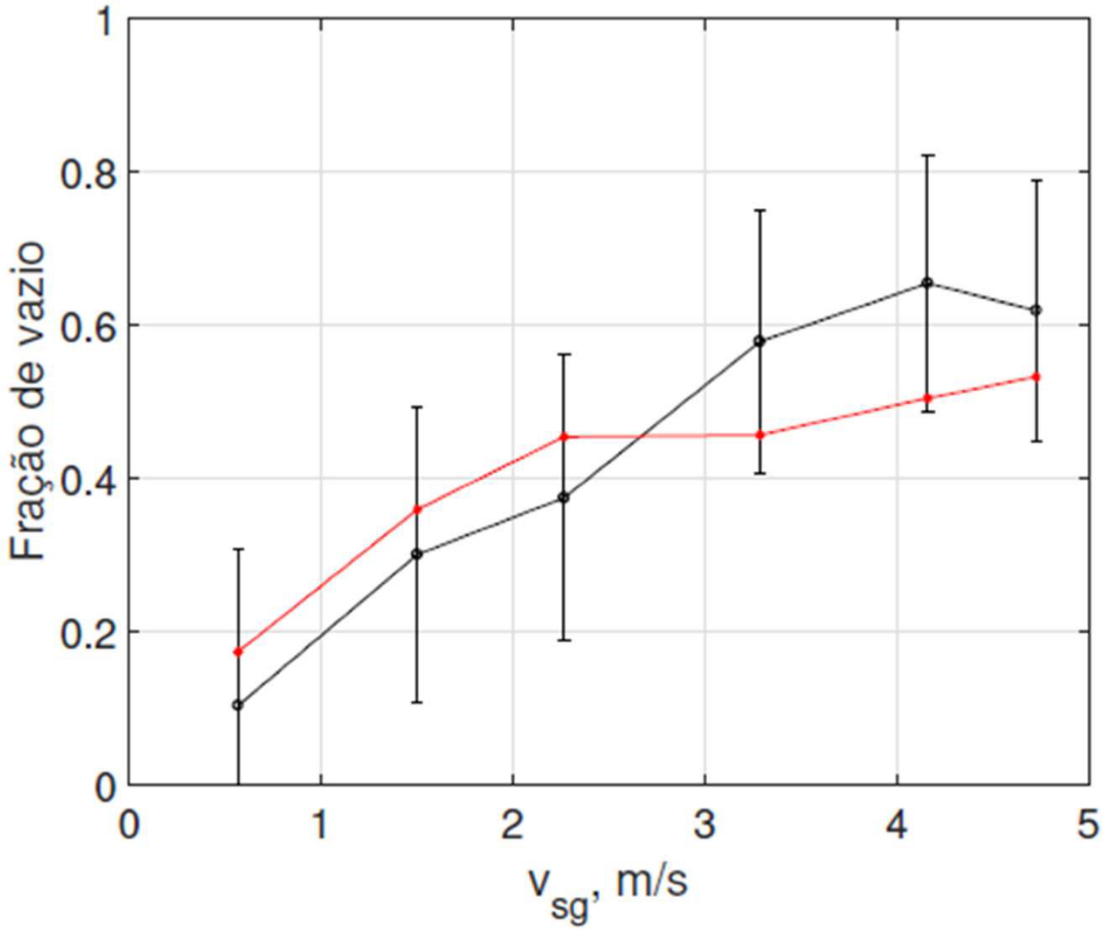
(b) Intermitente:
$v_{sl} = 1,32m/s$

FIGURA 22



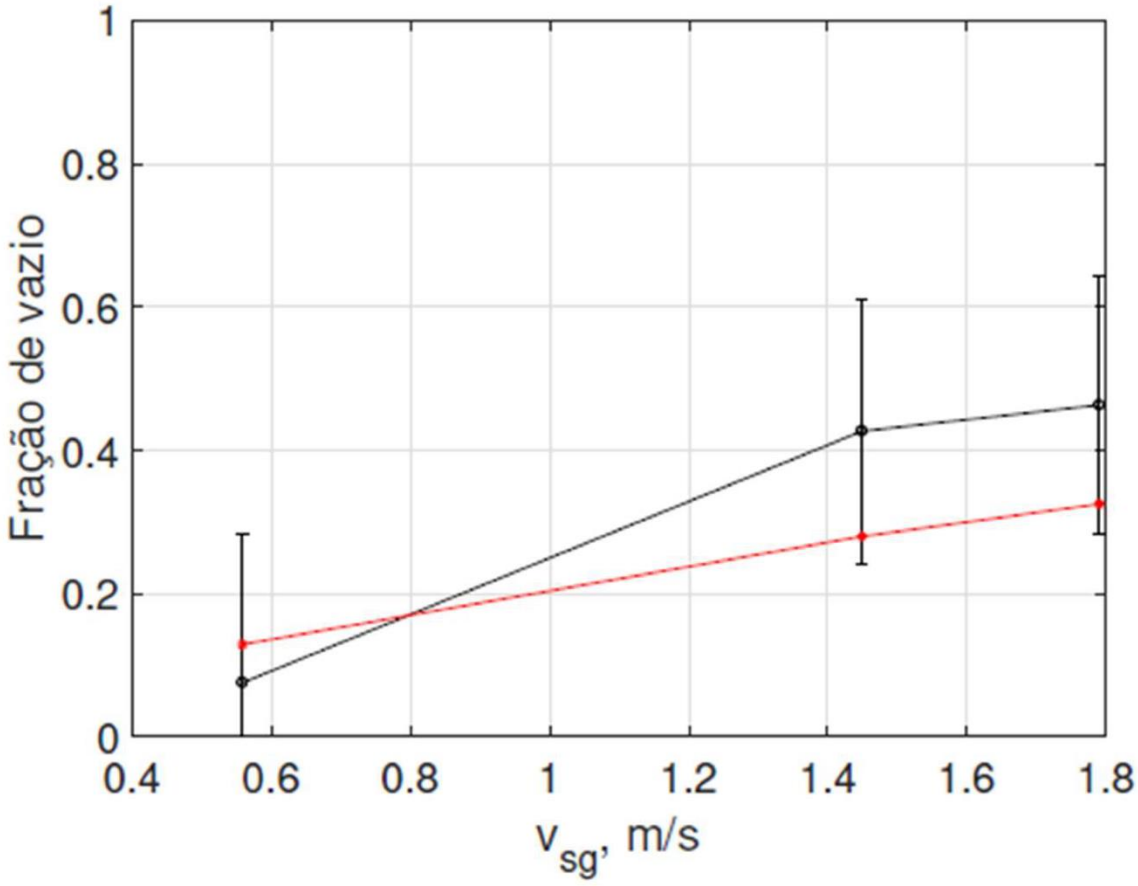
(c) Intermitente:
$v_{sl} = 1,93m/s$

FIGURA 23



(d) Intermitente:
$v_{sl} = 2,71m/s$

FIGURA 24



(e) Intermitente:
$v_{sl} = 3,76m/s$

FIGURA 25

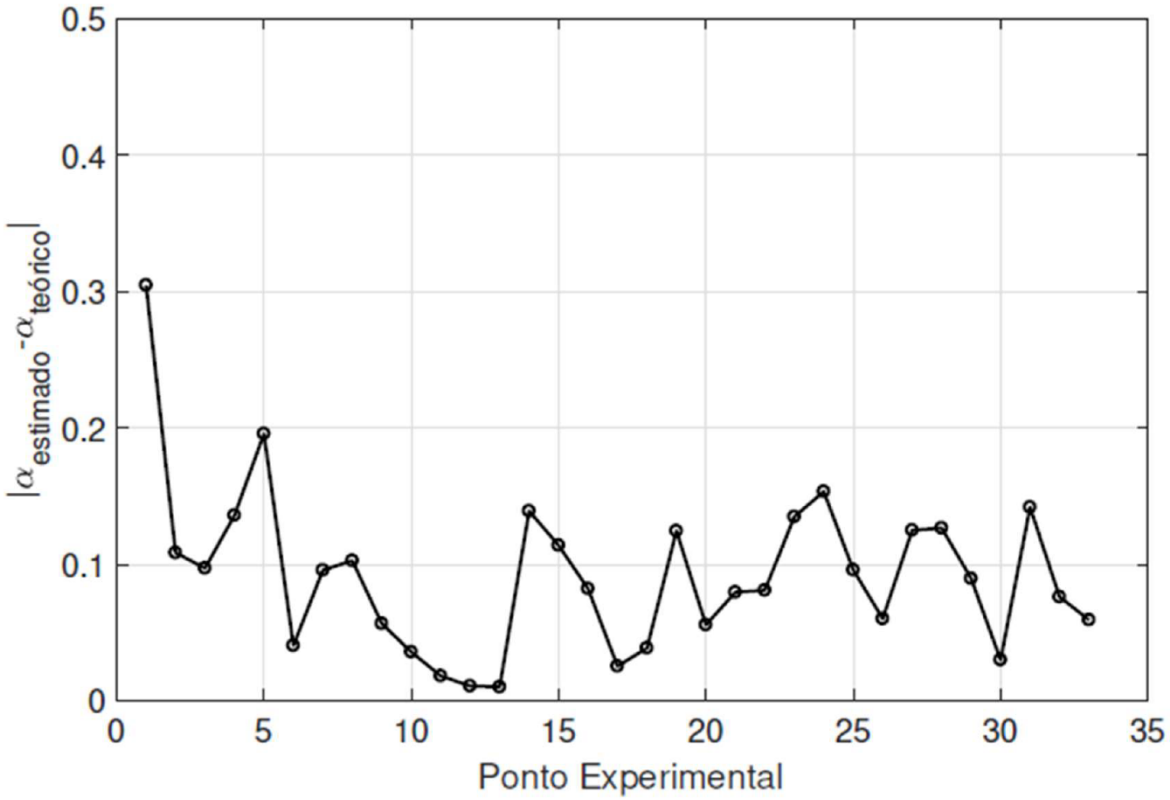

0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
5
10
15
20
25
30
35
$|\alpha_{estimado} - \alpha_{teórico}|$
Ponto Experimental

FIGURA 26