



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

MÉTODO PARA MEDIDAS AUTOMATIZADAS DE PLANEZA DE SUPERFÍCIES ÓPTICAS PARA RASTREABILIDADE DE PEÇAS E INSTRUMENTOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS

Ayrton Maia Rocha da Cunha¹; Ricardo Santos França²

¹ Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia – ayrton.maia.rocha@gmail.com

² Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia – rsfranca@inmetro.gov.br

RESUMO

A indústria de petróleo e gás está em constante evolução tecnológica em vista das grandes descobertas científicas dos últimos anos. Essa evolução atinge essa indústria em todos os aspectos, inclusive no que diz respeito às perdas de distribuição de combustíveis líquidos e gasosos. Para que essa distribuição ocorra de forma segura e confiável é preciso um controle das quantidades e uma garantia adequada da qualidade no fornecimento. Para isso, não há melhor coisa a fazer do que medir adequadamente, afinal é isso o que traz confiabilidade. Uma importante grandeza que deve ser medida quando o assunto é distribuição de combustíveis é o desvio de planeza superficial, que garante um bom acoplamento das peças de encaixe e o bom funcionamento de medidores de vazão do tipo placa de orifício. Para isso o trabalho proposto está diretamente relacionado à automatização do método de medição e calibração de desvio de planeza superficial, a fim de prover rastreabilidade nas medições de planeza superficial de peças de acoplamento e de medição de vazão, utilizadas em tubos de transmissão de petróleo e gás. Tais operações implicam, então, na diminuição dos gastos com a perda desses fluidos e ainda permitindo reparos antes de um dano maior nas tubulações.

Palavras-Chave: Distribuição, Metrologia, Modelagem Computacional, Automatização, Superfícies Ópticas.

1. INTRODUÇÃO

Nas indústrias em geral sempre há a necessidade de realizar a manutenção de todos os instrumentos, equipamentos, máquinas e acessórios envolvidos desde o início, até a produção final de determinado produto, visto que, a falta dessa manutenção pode causar perdas consideráveis de tal produto, durante o processo de produção. Além disso, há ainda a necessidade de medir as quantidades de

produto produzidas, a fim de que produtos não se percam ao longo da produção.

Na indústria de petróleo e gás, por exemplo, a falta de manutenção nas tubulações de transporte de combustíveis, líquidos e gasosos podem causar perdas significativas dos mesmos, o que acarreta grandes prejuízos financeiros, não só para empresa responsável por esse transporte, como também para todas as outras que fazem parte desse processo. Outro exemplo, ainda na indústria de petróleo e gás, é a medição de

[www.conepetro.com](http://www.conepetro.com.br)
.br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br

vazão desses combustíveis durante todo o processo, ou seja, desde a retirada da matéria prima até sua chegada ao cliente. Essa medição é de suma importância, pois permite a minimização das perdas e garante o controle da produção.

Logo, visando à diminuição dessas perdas, o trabalho proposto está diretamente relacionado à calibração do desvio de planeza de superfícies ópticas, com o objetivo de prover rastreabilidade às medições de desvio de planeza superficial (DP) em peças de acoplamento de tubos de transporte de combustíveis líquidos e gasosos, válvulas, placas de orifício destinadas à medição de vazão, *etc*, bem com estender o escopo de calibração do Laboratório de Interferometria (Laint) do Instituto Nacional de Metrologia e Qualidade (Inmetro), garantindo essa rastreabilidade, visto que no país o Inmetro é o topo da cadeia de rastreabilidade em todos os tipos de medição.

Uma boa adequação dos métodos de medição de superfícies não estritamente circulares permitirá ainda a possibilidade de sistematizar estudos caso-a-caso de diversas configurações superficiais, visando o atendimento de demandas metrológicas mais extensas em relação às atuais. Um exemplo da aplicação prática da obtenção de resultados com altos graus de exatidão para mensurandos deste tipo seria na avaliação do efeito de

desvios de planeza superficial de placas de orifício de uso generalizado na indústria de petróleo e gás [COSTA E SILVA, 2007], minimizando eventuais perdas de linha e elevando seus níveis de segurança operacional.

2. METODOLOGIA

A realização desse trabalho foi baseada no fenômeno de interferência de ondas.

2.1. Interferência de Ondas

O fenômeno de interferência de ondas ocorre quando duas ondas se encontram num mesmo plano. Todo o tipo de onda está sujeita a esse fenômeno. Quando a crista (região mais alta) de uma onda encontra a crista de outra onda as alturas se somam, essa soma das alturas das ondas recebe o nome de interferência construtiva. Por outro lado, quando a crista de uma onda se encontra com o vale (região mais baixa) de outra, ocorre o que recebe o nome de interferência destrutiva, onde duas coisas distintas podem acontecer, ou as ondas se anulam ou aparece um ponto de intensidade mínima na onda resultante. Como a luz se trata de uma onda eletromagnética também está sujeita ao fenômeno de interferência, mas nesse caso

esse fenômeno recebe o nome de interferência luminosa. [PIMENTEL JR., 2012]

2.2 Interferograma

Quando ocorre o fenômeno de interferência luminosa, é possível produzir uma imagem, que mostre onde ocorrem as interferências construtivas e destrutivas. O padrão das interferências destrutivas e construtivas sucessivas é denominado de padrão de franjas (vide exemplo na figura 1), e com base nas características deste padrão de franjas é possível determinar o comprimento de um bloco padrão, o DP de uma superfície, entre outras características de padrões ou superfícies analisadas.

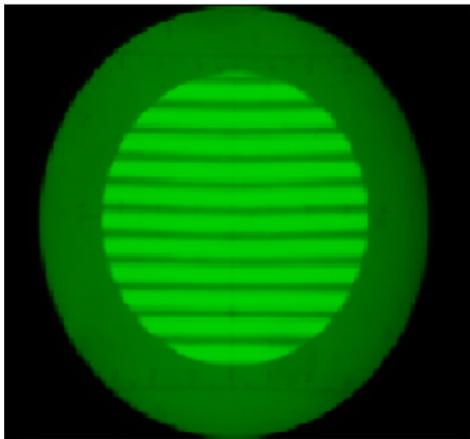


Figura 1: Interferograma digitalizado de uma superfície de colagem de blocos-padrão

2.3 Interferômetro

O interferômetro é um instrumento que opera baseado no fenômeno de interferência de ondas. Existem diversos tipos de interferômetros, baseados nos diversos fenômenos ondulatórios (ópticos, mecânicos, etc.). Os interferômetros ópticos são aqueles baseados no fenômeno de interferência luminosa. Uma das funções desses instrumentos é realizar a medição do desvio de comprimento de blocos padrão (medidas materializadas de comprimento), no entanto eles também podem ser utilizados para realizar a medição de outras grandezas dimensionais como DP, deslocamento, diferenças de altura em *step heights*, amplitude de vibração em acelerômetros, etc. Existem diversos tipos de interferômetros ópticos (Michelson, Fizeau, Jamin, Mach-Zehnder, Sagnac, etc.), cada um com uma determinada função. O interferômetro utilizado para realização das medições necessárias para o desenvolvimento desse artigo foi o interferômetro Fizeau.

2.4. Interferômetro Fizeau

O interferômetro Fizeau é um tipo de interferômetro construído com características específicas para realizar a medição de DP de superfícies ópticas. Por isso, ele possui uma configuração própria para esta modalidade de medição. As figuras 2 e 3 abaixo mostram

um Fizeau comercial equipado externamente com uma câmera digital Coolsnap_{fx} e seu esquema interno básico (excluindo a câmera), respectivamente. Posicionada sobre a superfície de apoio superior se vê na figura 2 uma base de colagem de boas características de planeza superficial.

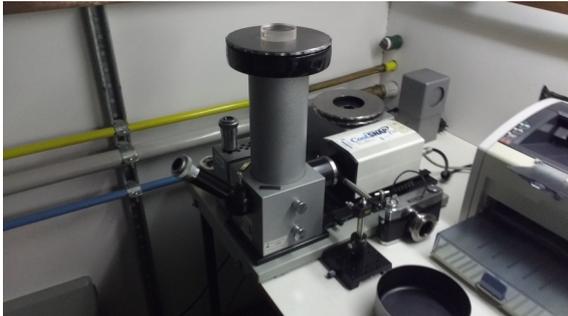


Figura 2: Interferômetro de tipo Fizeau do Laboratório de Interferometria do Inmetro.

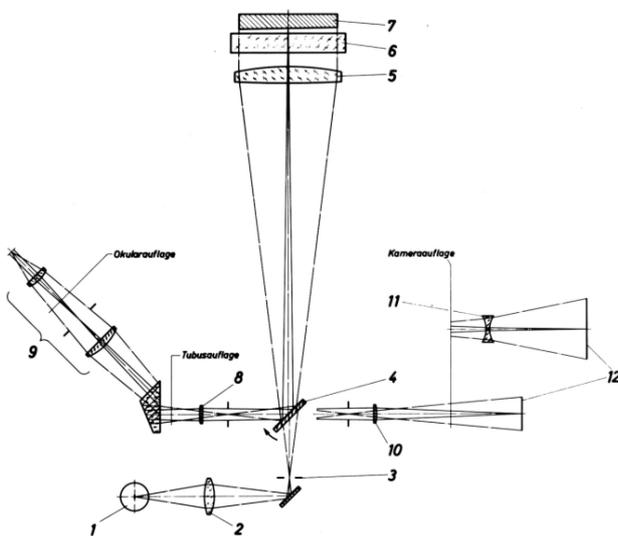


Figura 3: Corte esquemático com os componentes do Interferômetro Fizeau. Fonte: Manual de Operação do Interferômetro Fizeau (Carl Zeiss – originalmente em alemão).

Originalmente, o Fizeau era equipado com uma câmera de filme. No entanto, com a evolução da tecnologia, essa câmera foi substituída por uma câmera digital interfaceável, que hoje faz parte do sistema de automatizado para medição de DP.

2.5. Método interferométrico

Para que o fenômeno de interferência luminosa ocorra é necessário que haja a composição de dois feixes de luz. Por isso, todo interferômetro deve ter um arranjo tal que haja a composição desses dois feixes, sendo que necessariamente um desses feixes seja obtido pela reflexão do feixe luminoso na superfície em medição e o outro pela reflexão em uma superfície de referência.

Valores do parâmetro de fase são obtidos a partir de uma estimativa visual ou por uma estimativa automatizada de reconhecimento de padrão das não homogeneidades presentes nos padrões interferométricos. Variações deste parâmetro são diretamente ligadas com as diferenças de altura na superfície (ou seja, de seu desvio de planeza superficial).

2.5.1. Estimativa visual

A estimativa do resultado de medição de desvio de planeza por meio visual é sempre mais problemática, pois visualmente não se tem uma acuidade necessária fazer uma



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

estimativa suficientemente fina e exata, visto que, se torna impossível fazer uma varredura pixel a pixel da imagem, já que se têm variações sutis de intensidade na imagem, características de uma função trigonométrica.

No método visual primitivo, eram definidas direções preferenciais, onde se definia a diferença de planeza ao longo de quatro direções, vertical, horizontal e duas diagonais, utilizando como base uma escala graduada para a estimativa quantitativa das frações de franja interferométricas. É facilmente perceptível que trabalhando a planeza ao longo apenas dessas linhas, existem diversas áreas da superfície em medição que não são inspecionadas, o que acaba mascarando o verdadeiro resultado.

Utilizando métodos de estimativa visual, o valor de incerteza da medição de desvio de planeza superficial pode chegar, nos melhores casos, a 30 nm, como consta na tabela dos CMCs do Inmetro, disponível no site do BIPM. [BIPM, 2016]

No entanto, com uma estimativa automatizada de medição esta incerteza pode diminuir consideravelmente.

2.5.2. Estimativa automatizada

Numa primeira tentativa de automatizar a estimativa do resultado de medição de desvio de planeza no Laint, foi feita uma adaptação do sistema, onde, ao invés de fazer

a medição pela ocular do interferômetro, foi registrada, com o auxílio de uma câmera digital, uma imagem do interferograma. Com o auxílio de um ambiente de programação chamado Matlab, desenvolvido pela Mathworks Inc. foi feita uma inspeção da imagem pixel a pixel, o que, diferentemente da estimativa visual comum, possibilitou uma estimativa mais fina e exata do resultado de medição.

No entanto, apesar de melhorar o resultado de medição, essa ainda não poderia ser considerada como uma estimativa plenamente automatizada e sim como um método intermediário entre a estimativa visual e a automatizada, visto que ainda era necessária a presença de um operador durante maior parte do processo de medição. Com isso, na busca pela automatização da estimativa do resultado, foram elaborados algoritmos para obtenção dessa estimativa, onde um deles é a base para realização desse trabalho. Esses programas seguem diferentes estratégias para obtenção do resultado.

2.6. Algoritmo de medição de planeza

Ainda utilizando o Matlab, foi elaborado um algoritmo inspirado no método de elementos finitos, no intuito de se realizar de modo totalmente automatizado a medição de DP. Para a realização desse algoritmo foram levadas em consideração algumas

www.conepetro.com.br

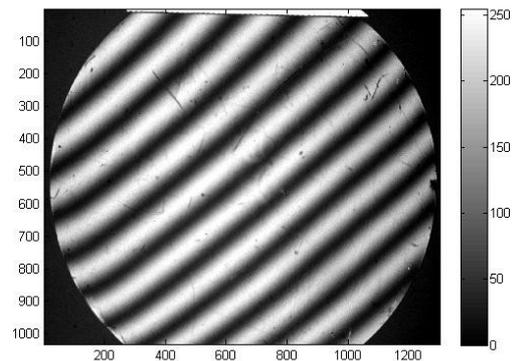
(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br

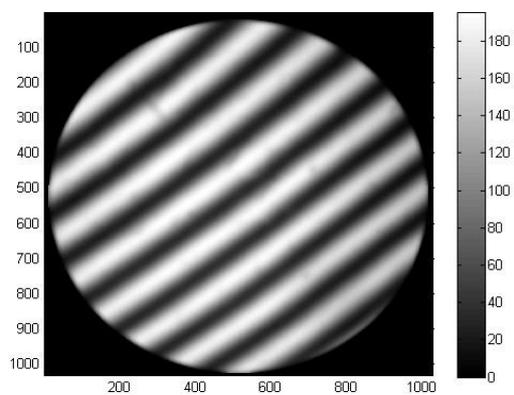
etapas, que foram representadas como funções distintas. Uma dessas etapas é o que pode ser chamado de pré-processamento de imagem, onde a imagem é tratada com o intuito de eliminar ruídos, efeitos de bordas, entre outros, para que após esse tratamento a busca da solução dos parâmetros usados para o cálculo seja mais rápida, inequívoca e confiável. Uma das funções independentes especialmente desenvolvidas para este fim é baseada em médias móveis e janelas gaussianas, denominada de *smooth*. Outra etapa, a que pode ser considerada como a “alma” do algoritmo, é a função *FinElem*, que mapeia a informação local das intensidades, enviando estas para uma sub-função baseada no método dos mínimos quadrados.

2.6.1. Função *smooth*

Nessa etapa é feita a redução/eliminação de ruídos ópticos da imagem, causados por variações de rugosidade e eventuais danos superficiais. Além disso, também é feita a eliminação de irregularidades locais na superfície de medição, dentro da seleção de uma região circular simétrica, definida por uma rotina para reconhecimento de bordas.



(a)



(b)

Figura 4: Efeito da função *smooth*: a) Interferograma digital ruidoso de um corte localizado na superfície padrão de um plano óptico. b) Imagem obtida após a execução de *smooth* sobre a figura anterior, dentro de um corte circular.

Normalmente essa etapa produz efeitos “de borda” e consome certa quantidade de ciclos de máquina e recursos computacionais.

2.6.2. Função *FinElem*

Essa função tem a finalidade de fazer uma varredura da imagem com triângulos (vide figura 5), com o objetivo de extrair, no fim de sua rotina de cálculos, o valor final global de DP.

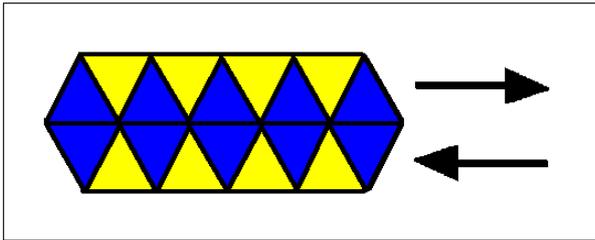


Figura 5: Esquemático da varredura em linha com triângulos, feita com a função *FinElem*.

Deve-se lembrar de que a imagem utilizada nesse algoritmo é um interferograma 2D, baseado em uma imagem bidimensional, portanto a variação de intensidade ocorre nas coordenadas x e y.

Para que a função *FinElem* faça a varredura corretamente, é necessário que cada um dos triângulos utilize a informação das coordenadas (x_i, y_i) dos pixels dos vértices $\{1,2,3\}$ e do centro $\{c\}$ de cada triângulo, suas intensidades e taxas de variação no sentido x e y, para se estimar localmente o vetor de parâmetros “p” contendo as frequências parciais em x e em y (f_x e f_y) e a fase (ϕ) através do método dos mínimos quadrados. A representação de cálculo desse método pode ser observada na equação 1 (explicitando os elementos de $Arg = T \cdot p$).

$$\begin{bmatrix} Arg_1 \\ Arg_2 \\ Arg_3 \\ Arg_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ 1 & x_c & y_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \phi \\ f_x \\ f_y \end{bmatrix} \quad [1]$$

Do cálculo da equação matricial que soluciona o problema inverso ($p = T^{-1} \cdot Arg$) se extraem as variáveis representadas pelo vetor de variáveis “Arg” são os argumentos de cada uma das funções trigonométricas que representam as variações de intensidade para cada pixel da imagem em análise e os valores de x_i e y_i alimentados nas colunas de “T” são as coordenadas dos pontos dos triângulos. Para obtenção dos argumentos de cada uma das funções trigonométricas do vetor é utilizada uma sub-função, que é chamada por *FinElem*, e denominada *PlanTriLS*, a qual fazendo o uso da equação 2 abaixo utiliza estes argumentos para obter o vetor de parâmetros citado.

$$Arg_i = \cos^{-1} \left\{ \frac{2I_i - 1}{A} \right\} \quad [2]$$

No entanto, ter apenas essa informação não é o suficiente, pois não é possível afirmar se esse valor é o cosseno de 0 a π ou cosseno

de 0 a $-\pi$, visto que o argumento é o mesmo nos dois casos e conseqüentemente fica impossível saber se ele está subindo ou descendo a “colina” no gráfico da função. Logo, para se resolver esse problema é necessário alimentar a sub-função *PlanTriLS* com o parâmetro da informação da taxa de variação (derivada) das intensidades, possibilitando saber se está subindo ou descendo a “colina”, respeitando as relações de proximidade entre os pixels. A figura 5 abaixo apresenta melhor uma definição gráfica das operações usadas pelo algoritmo para retificação posicional.

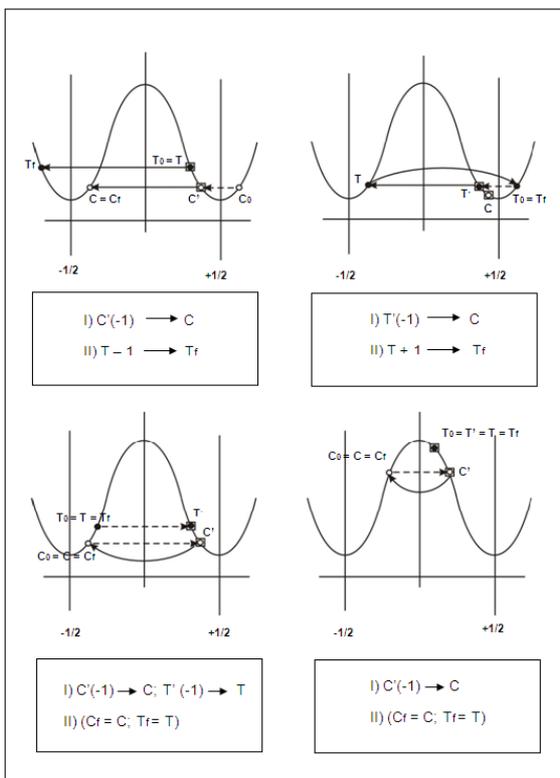


Figura 5: Representação esquemática da solução adotada para o problema de domínio da função de cosseno inverso.

Depois de extrair o valor de todas as variáveis necessárias, a sub-função *PlanTriLS*, por sua vez, utilizando o método dos mínimos quadrados, calcula a fase e as frequências parciais em x e y, e retorna estes parâmetros de cada triângulo para a função *FinElem* para a estimativa final de DP global. Tal estimativa só pode ser obtida após uma operação de “*phase unwrapping*” ou “desdobramento de fase”, em que são compostas as contribuições de fase ao longo dos triângulos sucessivos na varredura.

Uma última operação adicional de mínimos quadrados em *FinElem* é realizada para o desconto por compensação de um plano ideal de variação global de fase linear. O valor de DP global é obtido da diferença entre as variações máximas e mínimas para com este plano em toda a região de análise.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O algoritmo de medição de DP ainda encontra-se em fase de elaboração. No entanto foram realizados alguns testes a fim de verificar a capacidade de medição do algoritmo. Para realização desses testes foi utilizado um interferograma simulado,

elaborado no próprio Matlab, possuindo valor de DP igual a zero (vide figura 6).

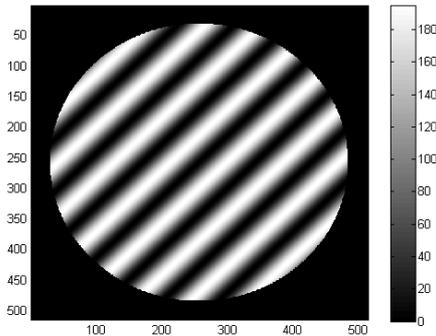


Figura 6: Interferograma simulado, utilizado para realização dos primeiros testes do algoritmo.

Como se trata de um interferograma simulado, e considerado uma imagem perfeita, não foi necessária a utilização do pré-processamento de imagem com a função smooth, no entanto também foi realizado o teste dessa função e o resultado foi bem satisfatório como pôde ser observado na figura 4, do item 1.2, subitem 1.2.1.

As figuras 7 e 8 abaixo representam o resultado da medição de DP pelo algoritmo, sendo uma delas a variação de fase ainda não compensada pelo plano de fase linear e a outra após a compensação, respectivamente. A coluna em cores à direita indica uma correspondência numérica com os valores de variação de altura ao longo da superfície. Os valores mais elevados presentes na forma das

cores mais extremas na barra da figura 8 correspondem a regiões inválidas entre o círculo externo e os triângulos utilizados na varredura e na análise e, portanto, não devem ser levados em consideração no cômputo das variações de planeza na região interior à borda circular.

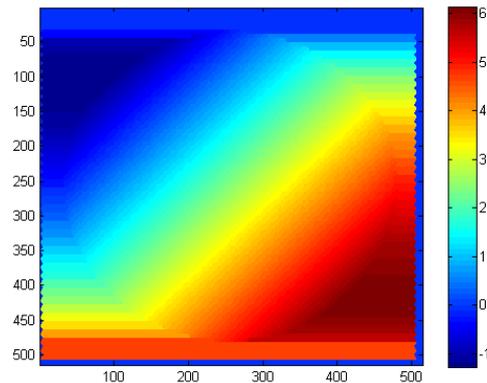


Figura 7: Mapeamento em cores falsas de variações de fase linear de um interferograma simulado (DP = 0).

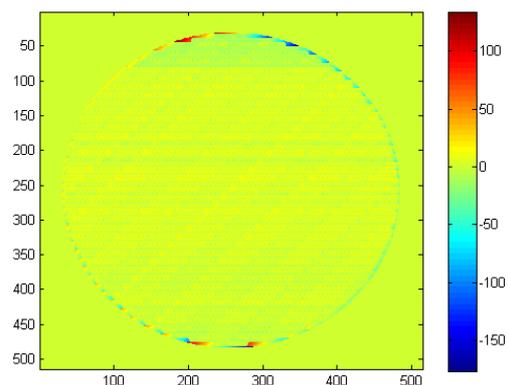


Figura 8: Mapeamento dos valores de altura da superfície após compensação.



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

O interferograma artificial foi projetado com valores de frequências espaciais $f_x = 6$ e $f_y = 6$, mantendo-se valores nulos para os demais parâmetros de ordem superior do argumento da função trigonométrica, representando com isso um DP global estritamente igual a zero. O resultado de DP encontrado pelo algoritmo, para uma das combinações mais otimizadas dos seus parâmetros operacionais sobre os dados numéricos do interferograma simulado citado, foi de apenas 15 nm, o que já pode ser considerado um resultado satisfatório, visto que a diferença deste valor para o valor nulo ideal projetado já se encontra abaixo dos limites de incerteza fornecidos na página do *Bureau International des Poids et Mesures - BIPM* (mais especificamente, na área associada à grandeza de comprimento e quanto às “*Calibration and Measurement Capabilities*” – CMCs – do Inmetro).

4. CONCLUSÕES

Apesar dos resultados apontados no item 3 estarem cobertos pelas expectativas do BIPM, ainda não é possível afirmar definitivamente a viabilidade do algoritmo proposto, como substituto pleno do atual método de medição, que por sinal ainda é feito sob estimativa visual. No entanto, espera-se que, com o contínuo

desenvolvimento das rotinas do algoritmo sejam encontrados resultados cada vez melhores e mais confiáveis, e então se possa validar a utilização desse algoritmo sob estas formas mais aperfeiçoadas.

Seu uso regular, combinado com os sistemas de medição já existentes, permitirá futuramente prover rastreabilidade nas medições de desvio de planeza superficial em peças de acoplamento e em medidores de vazão do tipo placa de orifício na indústria do petróleo e gás, ou na determinação mais exata da rastreabilidade de padrões de planeza utilizados em inspeções locais deste parâmetro dimensional sobre as peças citadas.

Além disso, é interessante ressaltar como curiosidade que o princípio de funcionamento desse algoritmo pode ser adaptado para outros fins, ou em outras modalidades de sistemas, como por exemplo, no mapeamento de relevos de grandes superfícies por robôs submarinos ou em imageamento remoto por satélites.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que sempre é comigo, a minha família e amigos que sempre me apoiam, a ANP e a Petrobras por me contemplar com a bolsa PFRH e ao meu orientador e amigo Ricardo França que

me auxiliou e participou na elaboração desse artigo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PIMENTEL Jr., R. A. *Uma história da interferometria no século XIX*. 2012, 260p. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Programa de Pós graduação em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia (HCTE). Rio de Janeiro-RJ.

BIPM. Disponível em:

<[http://kcdb.bipm.org/appendixC/country_list_search.asp?](http://kcdb.bipm.org/appendixC/country_list_search.asp?CountSelected=BR&sservice=L/DimMet.4.1)

CountSelected=BR&sservice=L/DimMet.4.1

>. Acessado em: 01/06/2016.

COSTA E SILVA, C. F. da. *Avaliação macro e microgeométrica de dispositivos utilizados na indústria do petróleo e gás*. 2007, 62p. Monografia de conclusão de curso de graduação em Engenharia Química, Área de concentração: Engenharia de Petróleo e Metrologia, Universidade Federal de Rio Grande do Norte (UFRN). Natal-RN.