

---

## METODOLOGIAS UTILIZADAS EM METROLOGIA SUBMARINA

JOSÉ MARCOS FERNANDES TARDIM

JOÃO KRULY FREDIANI

GERALDO PINTO RODRIGUES

LUISNEI MARTINI

Petróleo Brasileiro S.A. - PETROBRAS  
E&P-SERV/US-SUB/GDS/PLG

jmtardim,{ joão\_k\_frediani, geraldopr , l\_martini, }@petrobras.com.br

---

**RESUMO** - O aumento considerável de dutos rígidos sendo instalados nas Bacias de Campos, Santos e Espírito Santo acarreta no uso de um grande número dos chamados "spools de fechamento". Trata-se de uma peça rígida que conecta o duto a um equipamento submarino (manifold, válvula de bloqueio, etc) e cuja fabricação é feita sob medida, baseando-se em um levantamento de precisão da relação espacial entre as citadas conexões, a chamada metrologia. Este artigo abordará as várias técnicas e equipamentos aplicados atualmente nestes levantamentos e também as possibilidades de aplicação de novos equipamentos e técnicas em desenvolvimento. Também será abordada uma metodologia baseada em estereofotogrametria, desenvolvida na PETROBRAS, utilizada no dimensionamento de danos em instalações submarinas.

**ABSTRACT** - The considerable increase in rigid ducts being installed in the Campos, Santos and Espírito Santo entails the use of a large number of so-called "closing spools." It is a rigid piece that connects the pipeline to a subsea equipment (manifold, valves, etc.) and whose production is tailor-made, based on a accurate survey of spatial relationship between connectors, this process is called metrology. This article will cover the various techniques and equipment currently used in these surveys at Petrobras and the possibilities of application of new equipment and techniques in development. Also addressed will be based on a methodology stereophotogrammetry developed by PETROBRAS, used in the design of damage to subsea facilities.

---

### 1 INTRODUÇÃO

O termo METROLOGIA deriva do grego METRON (medida) e LOGOS (estudo). Assim sendo, genericamente METROLOGIA é a ciência que estuda as medidas.

Em função de restrições impostas pelas características do fluido, a grande profundidade, entre outros, a utilização de dutos flexíveis, mais comumente utilizados pela PETROBRAS, é inviabilizada em alguns projetos devido aos altos custos, restando a possibilidade de utilização de dutos rígidos.

A utilização de dutos rígidos demanda a construção sob medida de peças para interligação destes dutos aos equipamentos submarinos. Um levantamento preciso nos locais de instalação destas peças é imprescindível e requer grande acurácia.

O termo METROLOGIA define o processo de determinação dos elementos angulares e lineares necessários à construção destas peças.

Pela sua importância e por exigir grande acurácia é um caminho crítico no processo de instalação de dutos rígidos.

A necessidade de utilização de equipamentos e técnicas específicas demanda tempo e consequente aumento de custos. Em função disso a busca de aperfeiçoamento dos processos, visando otimizar tempo sem perder acurácia no levantamento é constante e necessária.

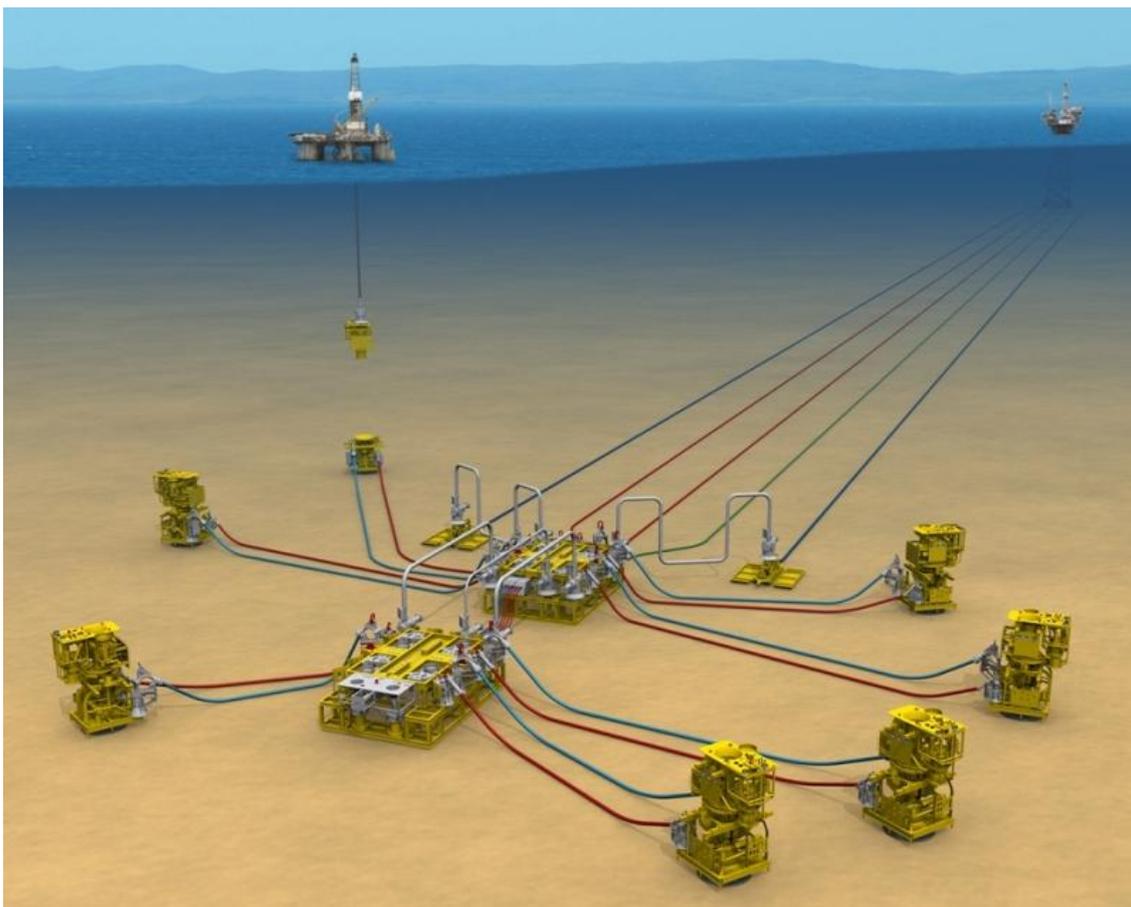


Figura 01 – Ilustração com interligação entre dutos e equipamentos submarinos.

## 2 TIPOS DE INTERLIGAÇÃO

Não existe uma definição rígida na denominação destas peças de interligação.

Em algumas publicações existem indicativos para utilização do termo SPOOL para interligação com conexão horizontal (flange a flange) e JUMPER para interligação com conexão vertical (hub a hub).

Na PETROBRAS é utilizado o termo SPOOL para ambos os casos.

### 2.1 Elementos necessários para SPOOL com conexão horizontal

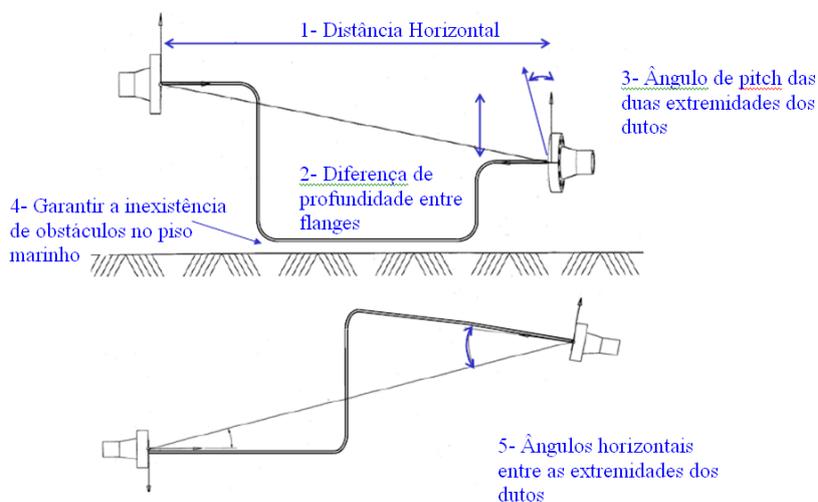


Figura 02 – Esquema dos elementos a serem medidos para spools com conexão horizontal.

## 2.2 Elementos necessários para SPOOL com conexão vertical

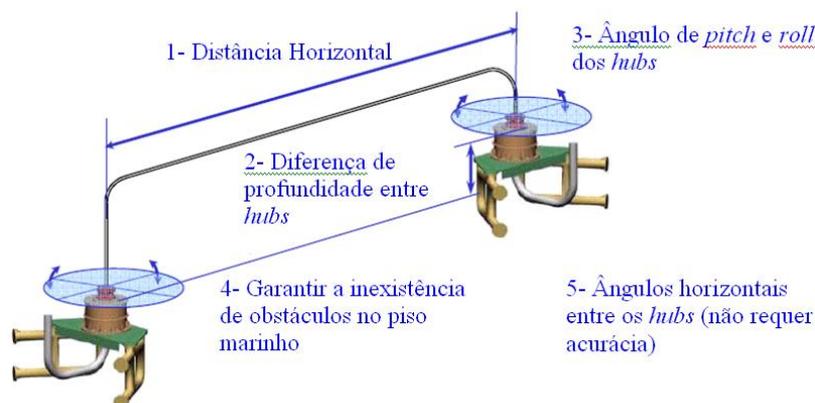


Figura 03 – Esquema dos elementos a serem medidos para spools com conexão vertical.

## 3 METODOLOGIAS APLICADAS EM TRABALHOS NA PETROBRAS

Em função da importância dos resultados da METROLOGIA, é indicado o uso de pelo menos duas técnicas distintas, visando redundância dos resultados.

Nos serviços executados na PETROBRAS foram até então utilizados o sistema Tautwire e métodos de hidroacústica.

Nestes dois casos é de fundamental importância a existência de receptáculos dedicados para instalação dos equipamentos, e os resultados são muito dependentes de um planejamento prévio visando minimizar os erros de offsets

### 3.1 Metrologia com sistema tautwire

É utilizado um cabo conectado entre os hubs ou flanges para medir distância e ângulo vertical.

O sistema pode ser manual, operado por mergulhador ou semi automático digital, operado por mergulhador ou ROV.



Figura 04 – Ilustração de um sistema tautwire

A acurácia de medida linear esperada é da ordem de 100 mm. No entanto resultados práticos de trabalhos recentes têm apresentado diferenças maiores.

Em função da forma de medição angular empregada, pode limitar muito a distância onde pode ser empregado.



Figura 05 – Fotos com registro de distância (em pés) e ângulo vertical (Equipamento PMT da Oceanering)

### 3.2 Metrologia utilizando sistema hidroacústico

É a metodologia mais utilizada pela maioria das companhias.

Utiliza um array de transponders equipados com sensores de pressão de alta resolução e inclinômetros, além de bússolas giroscópicas de fibra óptica (FOG) ou ring laser.

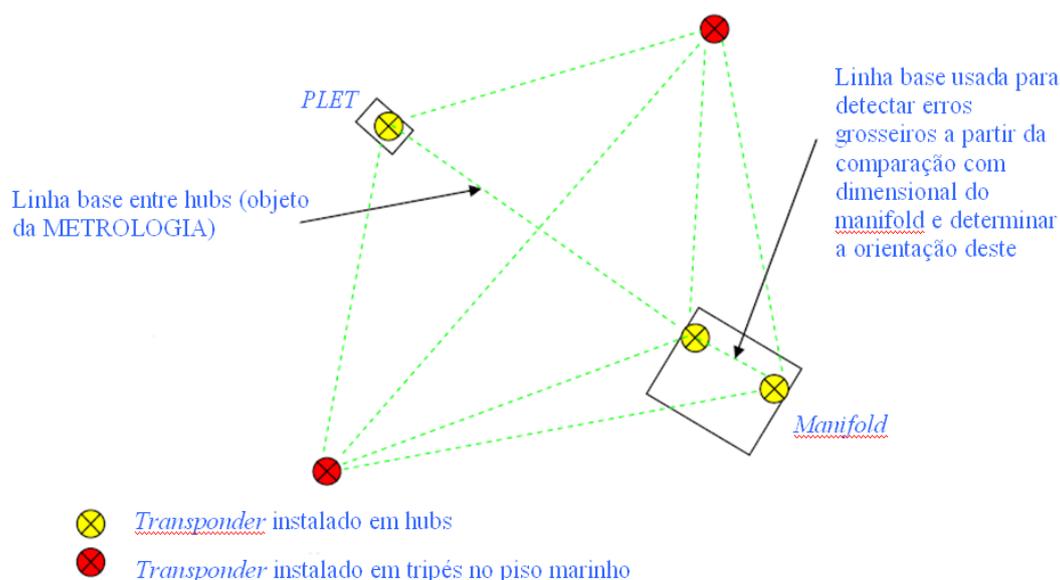


Figura 06 – Figura ilustrando um array de transponders padrão para METROLOGIA.

A acurácia das medidas lineares esperada é da ordem de 50 mm. No entanto cuidados especiais devem ser tomados com relação à instalação dos transponders, pois erros de offset podem comprometer a METROLOGIA.

Sistemas hidroacústicos medem basicamente tempo de propagação da onda acústica. Assim sendo é de fundamental importância o controle rigoroso e uso da correta velocidade do som no momento de aquisição das medidas.

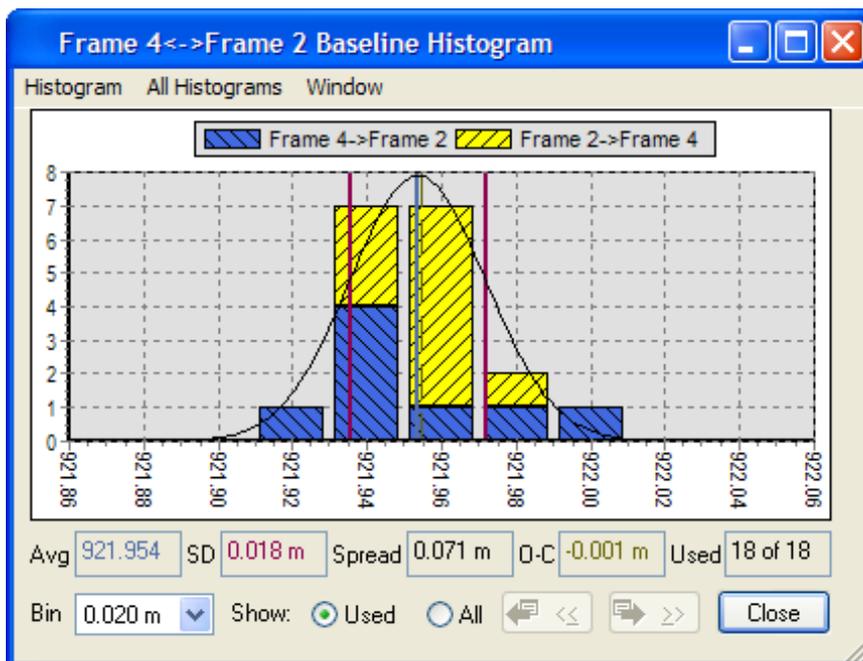


Figura 07 - Histograma de uma medida acústica bruta desconsiderando outras fontes de erro.

Com dados de perfilagens do som a partir de equipamentos distintos, em condições operacionais, observa-se a possibilidade de existirem diferenças de até 1 m/s, o que implicaria em 0,02m para uma distância de 30m, que é o comprimento médio dos spools instalados na PETROBRAS.

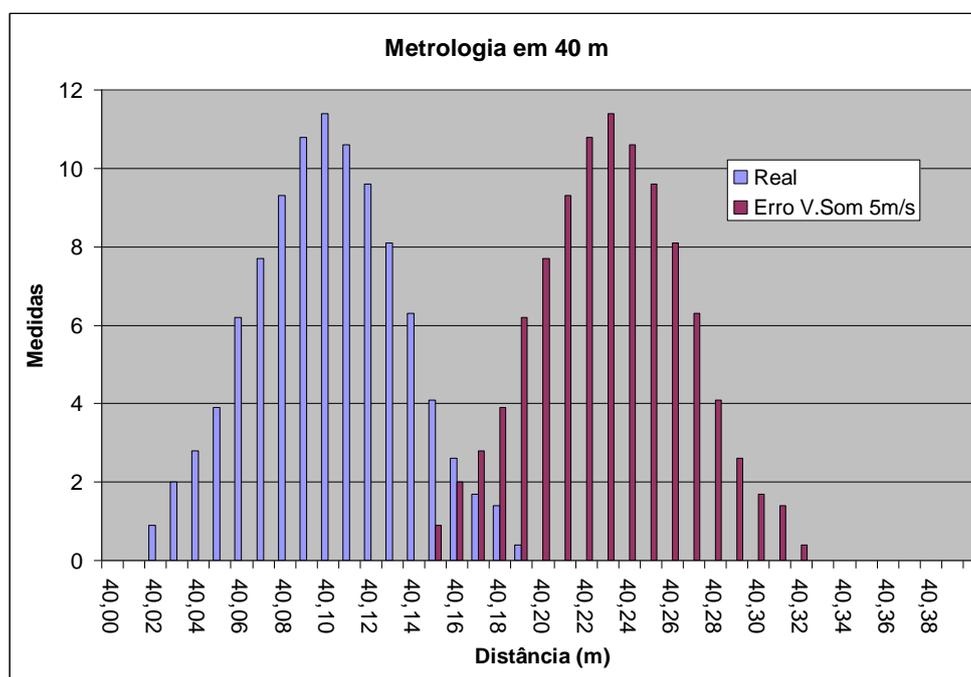


Figura 08 - Ilustração do efeito de um erro de 5 m/s em uma distância de 40 m.

Para medir profundidades e conseqüentemente as diferenças de altura entre hubs, são utilizados sensores de pressão à base de cristal de quartzo (diguartz), cuja acurácia é da ordem de 0,01% do fundo de escala (profundidade máxima de operação) e resolução 10 vezes melhor. Os sensores mais comumente utilizados são para profundidades de até 1350m, 2000m e 4000m.

Uma componente importante a ser observada na utilização de sensores diguartz é a equalização da temperatura. Um gradiente de temperatura insere erros na medida:

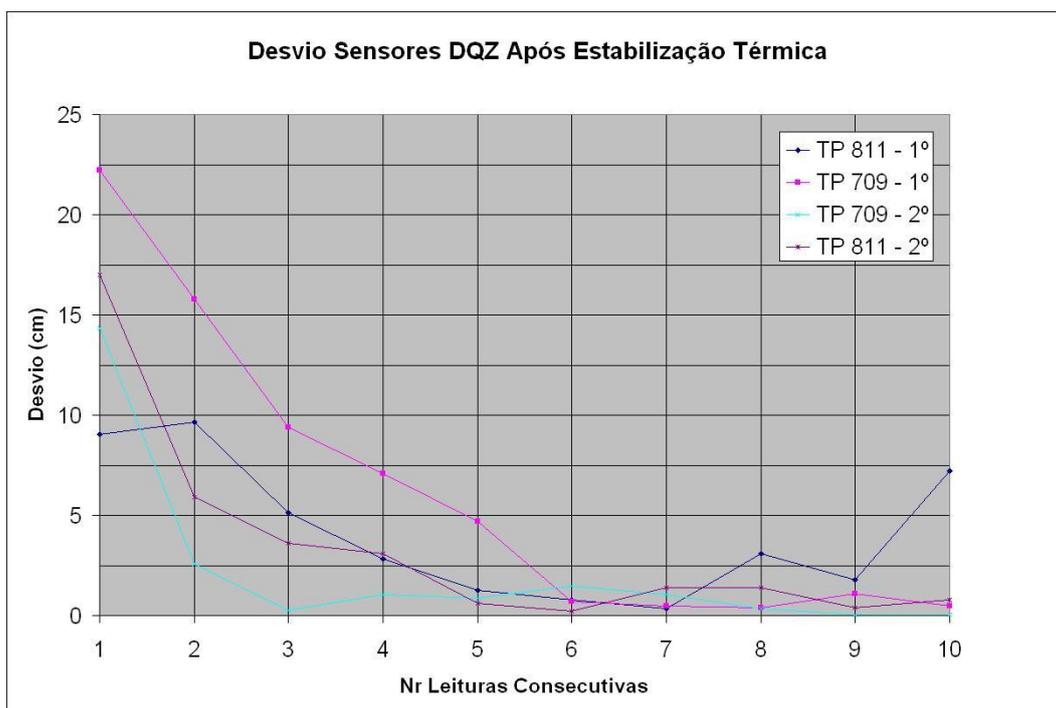


Figura 09 - Sequência de medidas após estabilização de temperatura.

Para medir as inclinações normalmente são utilizados transponders equipados com inclinômetros para operar na faixa de  $\pm 14,5^\circ$ , com acurácia de  $\pm 0,05^\circ$ .

### 3.3 Comparativo de resultados com tautwire e hidroacústica

A tabela 01 mostra as diferenças encontradas entre METROLOGIA executada com tautwire e hidroacústica, em operação realizada na PETROBRAS:

Tabela 01 – Diferenças de medidas entre o sistema Tautwire e Hidroacústico

Linha base		Hidroacústica (m)	Tautwire (m)	Diferença (m)
HUB PLET 5	Hub 1 TBU 02	29,35	29,66	0,31
HUB PLET 4	Hub 2 TBU 02	28,26	28,58	0,32
Hub 4 TBU 02	Hub 7 TBU 02	25,04	25,36	0,32
Hub 3 TBU 02	Hub 8 TBU 02	24,94	25,33	0,39
Hub 5 TBU 02	Hub 6 TBU 02	25,15	25,46	0,31

Pode-se observar uma diferença muito significativa. Diferenças desta ordem na construção dos spools podem inviabilizar a conexão.

A comparação da METROLOGIA com hidroacústica com dados de posicionamento dos manifolds e plets, realizados com o método de LBL (Long Base Line), apresentou diferenças da ordem de 0,10m.

## 4 METODOLOGIAS ALTERNATIVAS

A necessidade de agilizar o processo de aquisição de dados e prover um trabalho de METROLOGIA com dados redundantes, faz com que seja imperativa a busca de metodologias alternativas para a solução deste problema.

Para operações futuras estuda-se a aplicação de metodologias já utilizadas em outras empresas, a saber: sensores inerciais integrados à hidroacústica, laser scanner e fotogrametria submarina. Pelo fato de não existirem resultados práticos na PETROBRAS de trabalhos realizados com estas metodologias, são necessárias avaliações mais criteriosas da operacionalidade e acurácias oferecidas por estes sistemas.

### 4.1 Sensores inerciais para METROLOGIA

A integração de sensores inerciais com equipamentos de hidroacústica pode prover redundância nas medidas com maior agilidade em comparação às demais metodologias disponíveis.

Uma criteriosa avaliação deve ser feita por envolver incorporação de novos equipamentos e uma considerável parcela de soluções computacionais.

Em apresentações realizadas por fornecedores deste tipo de serviço, foi possível observar possíveis necessidades de maior desenvolvimento nos softwares propostos.

Trabalhos apresentados indicam diferença medidas acústicas da ordem de 0,03m, para distâncias de 30m.

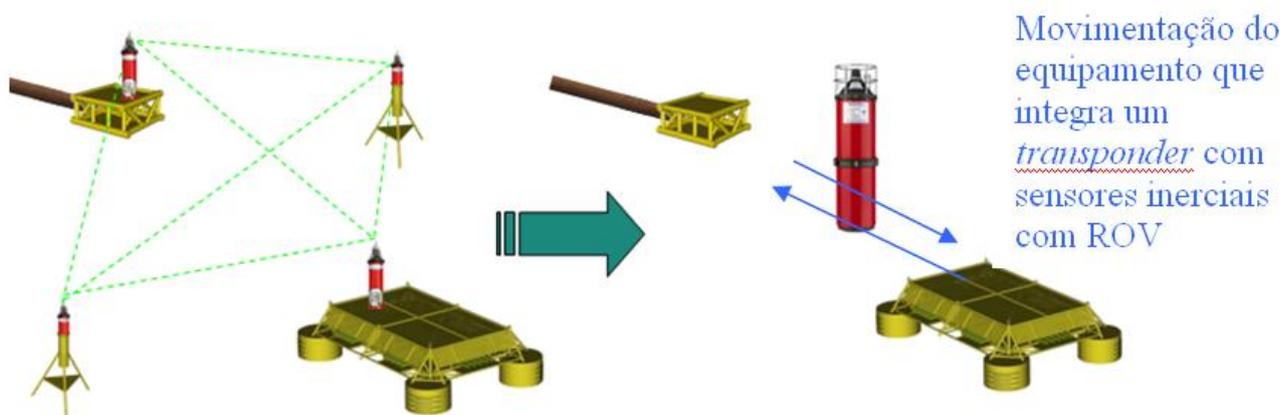


Figura 10 - Ilustração da metodologia com uso de equipamento único integrando transponder e sensores inerciais.

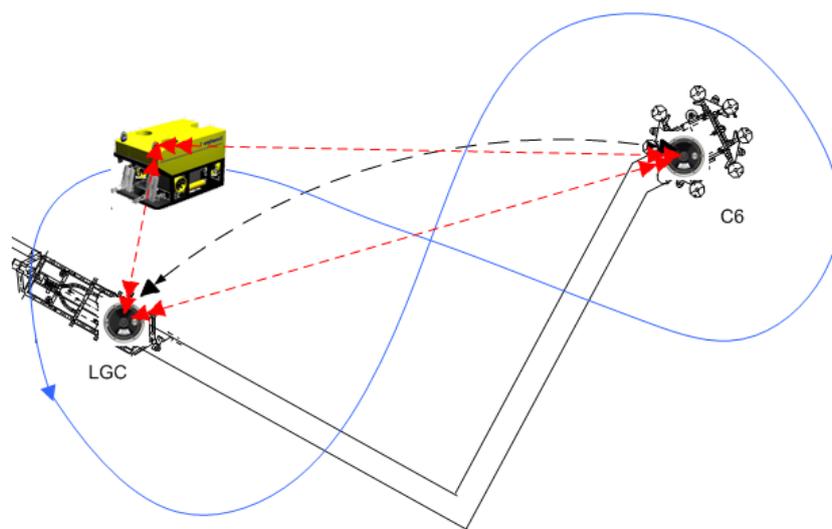


Figura 11 - Ilustração da metodologia com uso de sensor inercial em ROV e sistema hidroacústico.

#### 4.2 Laser scanner submarino para METROLOGIA

Metodologia ainda em desenvolvimento. Ensaios apresentados pela empresa CDL indicam acurácia de 0,01m para uma distância de 50 m.

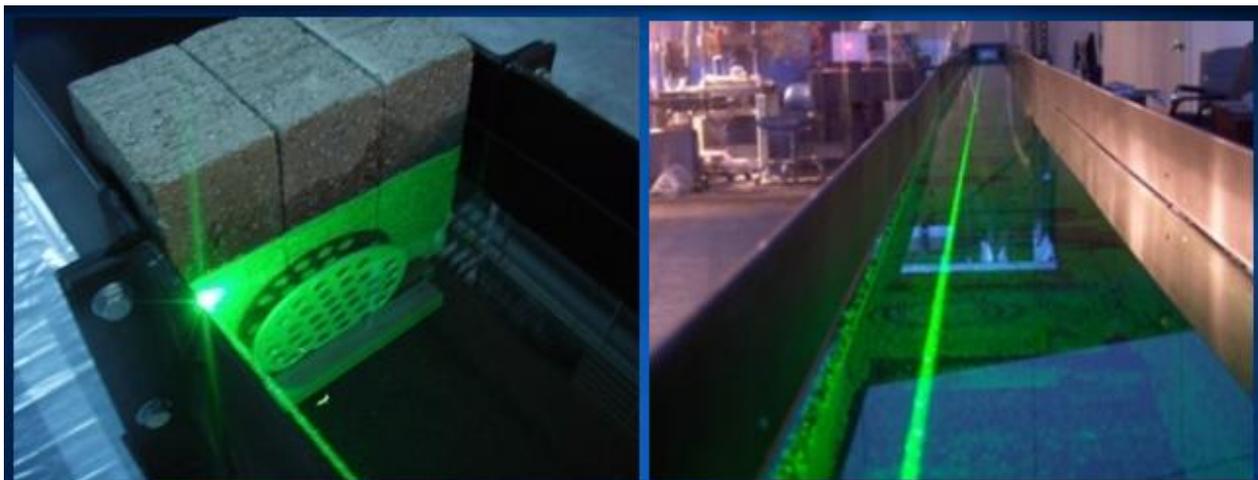


Figura 12 - Testes da CDL com protótipo de laser scanner submarino.

### 4.3 Fotogrametria submarina para METROLOGIA

Utiliza uma série de fotografias obtidas na rota de instalação da peça que se deseja fabricar. A partir do uso de softwares específicos e de fotos com suficiente superposição, é montado um modelo tridimensional do espaço compreendido entre hubs ou flanges. A obtenção das fotos se dá a partir de um ROV equipado com câmeras especiais.

Pontos críticos do processo são a necessidade de instalação no piso marinho de barras escaladas para orientar a obtenção das fotos, visibilidade e existência de obstáculos no piso marinho, além de ser muito dependente de pós processamento.

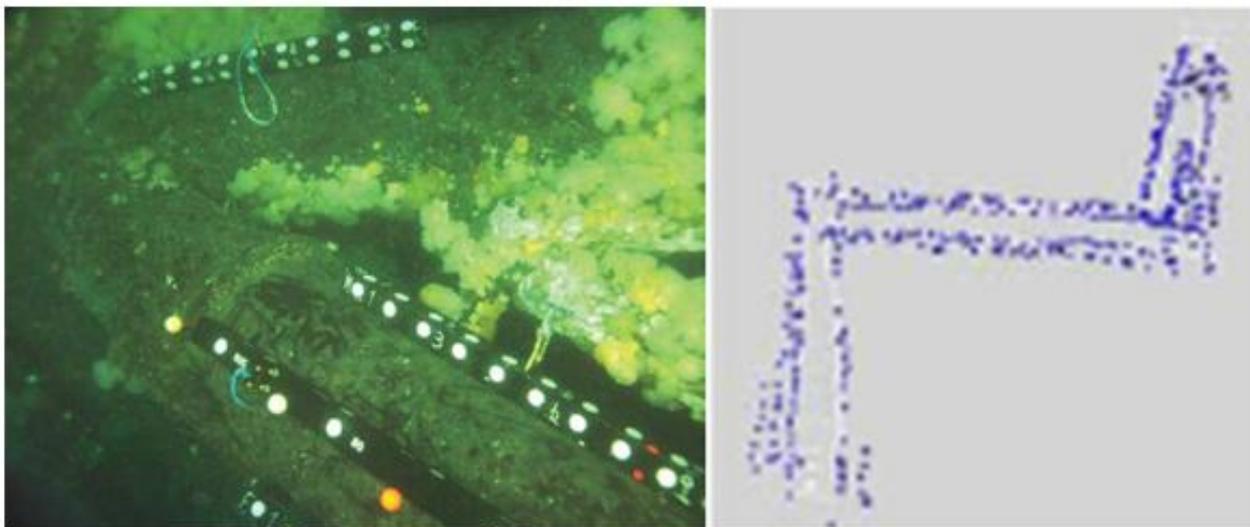


Figura 13 - Ilustração do processo para obtenção das fotos.

Alguns sistemas propostos indicam acurácias da ordem de 0,01m para a distância mais comumente utilizada.

Testes efetuados utilizando um sistema desenvolvido na PETROBRAS, envolvendo um par de câmeras instaladas em ROV e um software específico (SVE – Sistema de Visualização Estereoscópica), idealizado para inspeção submarina, não apresentou resultados satisfatórios, com grandes possibilidades de estarem relacionados com a baixa resolução das câmeras utilizadas. A próxima etapa será a utilização de câmeras de maior resolução e repetição do experimento

## 5 CONCLUSÕES

Por se tratar de uma matéria cuja utilização será muito demandada em futuro próximo, o entendimento é que deve ter especial atenção e recursos visando o total domínio das metodologias disponíveis.

Pode-se concluir que a METROLOGIA submarina envolve uma etapa primordial de planejamento operacional, estando os resultados muito dependentes da instalação dos equipamentos e rigor no processo de aquisição das medidas.

Atenção especial deve ser dada às propostas apresentadas pelos fornecedores, pois via de regra, apresentam em suas propostas apenas os erros relacionados à precisão nominal dos equipamentos, omitindo os possíveis problemas operacionais, que são a maior fonte de erro do processo.

#### **REFERÊNCIAS**

NADERI, D. **Workshop for acoustic metrology**. Sonardyne. 2009.

PRYTZ, F. **Workshop Underwater Spoolpiece Metrology**. The Hydrographic Society in Scotland. 2005.

MANNING, N. **Workshop INScan (Green Light Ranger Laser)**. CDL Inertial Engineering. 2010.

MELO, R. **Tambaú Jumper Metrology**. InterMoore do Brasil Ltda (63003-002-MR-01-Rev03).

SILVA, S.; NEVES, C. **Medição por arame Manifolds de Tambaú**. OCEANEERING (RAODTSBR01-11).