

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO MECÂNICO PARA INSPEÇÃO NÃO DESTRUTIVA DE CASCOS DE NAVIO-PLATAFORMA

Alci Alexandre Delgobbo da Luz¹(UTFPR), Emerson Katsumi Onishi² (UTFPR), Carlos Cziulik³(UTFPR)

¹Av. Sete de Setembro, 3165, Curitiba-PR, CEP: 80230-901, alciadl@yahoo.com.br

²Av. Sete de Setembro, 3165, Curitiba-PR, CEP: 80230-901, emerson.onishi@gmail.com

³Av. Sete de Setembro, 3165, Curitiba-PR, CEP: 80230-901, cziulik@utfpr.edu.br

O projeto tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema mecânico autônomo capaz de deslocar-se num plano aproximadamente vertical portando um conjunto de sensores capazes de realizar inspeção de caráter não destrutivo em casco de navios de produção. Esses navios permanecem em campo, em alto mar, por anos e, para se prevenir acidentes são obrigatórios inspeções de segurança, que ainda podem ser melhorados em questão de acuracidade e tempo. Para o desenvolvimento do projeto, utilizou-se da metodologia de projeto proposta por Pahl & Beitz. Seguindo a metodologia, levantou-se informações sobre as inspeções realizadas hoje em cascos de navios, que tipos de robôs para inspeção e robôs de deslocamento no plano vertical existem, como é o ambiente de operação do mecanismo em estudo, quais são as prioridades do projeto. Atualmente o projeto encontra-se na fase de projeto detalhado, na qual, a concepção final do produto já foi selecionada, e resta dimensionar e selecionar alguns dispositivos para a construção do protótipo. Testes preliminares com o sistema de fixação ao casco indicam o potencial da solução adotada.

Inspeção não-destrutiva; Navio-plataforma; Robôs escaladores; Inspeção autônoma.

1. INTRODUÇÃO

A extração do petróleo no Brasil é feita fundamentalmente em poços marítimos profundos. Uma das soluções utilizadas para a extração no mar é o uso de plataforma tipo FPSO (Floating, Production, Storage and Offloading), também conhecidas como navios-plataforma.

O tempo de operação de um navio-plataforma é, em média, de 25 anos, tempo este que corresponde ao período de esgotamento das reservas de hidrocarbonetos Brick (2003). Para evitar acidentes, que podem causar prejuízos econômicos extraordinários e irreversíveis ambientalmente, é imprescindível a execução de inspeções de segurança nesses navios. Destas, uma das mais importantes, considerando-se o ambiente extremamente agressivo aos materiais de fabricação do navio, é a inspeção não destrutiva do casco.

Hoje, a inspeção realizada nos cascos dos navios-plataforma é executada por mergulhadores profissionais com certificação em ensaios não destrutivos, requer um elevado tempo operacional, empregando métodos estatísticos, inicialmente, com alguns pontos de análise, que mais tarde, identificadas zonas de possível falha, são executadas inspeções mais detalhadas. A operação inicial baseia-se em localizar áreas de prováveis focos de formação de trincas e redução de espessura no casco.

O desenvolvimento de um sistema mecânico capaz de automatizar total ou parcialmente a inspeção não destrutiva dos cascos de navio-plataforma é uma solução que visa a otimização do processo de inspeção, do custo e do tempo. Com um sistema autônomo, pode-se fazer uma inspeção numa malha com muito mais pontos, centralizando uma área de possível falha, reduzindo o trabalho na inspeção mais detalhada. Isso, com um custo em médio prazo menor que as praticadas hoje e num tempo muito mais reduzido.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A indústria brasileira PETROBRAS possui a mais alta tecnologia em extração de petróleo em águas profundas e ocupa o posto de maior produtora mundial de petróleo em ambiente offshore. Neste âmbito, a PETROBRAS, visando segurança e meio ambiente, está investindo em pesquisas para a automação da operação de inspeção não destrutiva do casco dos navios plataforma.

Operação de suma importância, a inspeção não destrutiva do casco dos navios plataforma não pode ser dispensada, mas pode ser melhorada. De modo como é realizada hoje, com os mergulhadores, há muita perda de tempo e a malha dos pontos para inspeção poderia ser muito mais refinada, melhoraria em muito a acuracidade das medições.

3. METODOLOGIA

No desenvolvimento desse produto está sendo utilizada a Metodologia de Projeto de Pahl & Beitz (1996), que consiste em quatro etapas bem distintas: i, Projeto Informacional; ii, Projeto Conceitual; iii, Projeto Preliminar; iv, Projeto Detalhado. Essa metodologia é considerada uma boa referência para o projeto de produtos industriais.

3.1 Projeto Informacional

O início do projeto envolveu o levantamento do estado da arte das atividades de inspeção não destrutivas realizadas hoje, das soluções existentes, e do ambiente de trabalho do robô. Verificou-se que as inspeções realizadas nos cascos de navios-plataforma hoje são realizadas por mergulhadores profissionais com especificação em inspeção não destrutiva contratados do exterior. E, os instrumentos de inspeção mais utilizados são ultra-som e alternating current field measurement (ACFM).

Desses estudos, foram levantadas tabelas de benchmarking, casa da qualidade e especificação de projeto. No benchmarking foram reunidos os robôs com aplicações semelhantes, robôs que pudessem se deslocar em superfícies aproximadamente verticais, e aqueles para trabalho em ambiente marinho, específicos para inspeções. Foram comparados características físicas, como dimensões, formato, peso, e detalhes construtivos, como meio de atração com a superfície vertical e forma de locomoção. A tabela de benchmarking teve por objetivo a avaliação de pontos fortes e fracos nos diversos sistemas pesquisados. Uma parte da tabela de benchmarking é apresentada na Tabela 1.

Informações presentes no benchmarking da Tabela 1 foram adquiridos respectivamente de: Batlle (2004), Fatronik (2004), Grieco (1998) e Luk (2005).

Tabela 1 – Parte da Tabela de Benchmarking.

					
		<i>Uris</i>	<i>Fabricação de avião Fatronik</i>	<i>Rest</i>	<i>Robug2</i>
Parâmetros	Unidade				
Dimensões	mm x mm x mm	400 x 350 x 400	-	1110 x 600 x 90	500 x 250 x 1100
Peso	kgf	30	"relativamente leve"	200	15
Material	-	aço inoxidável	-	-	-
Número de pernas	-	4	12	6	-
Graus de liberdade por perna	-	6	-	3	3
Tipo de fixação	-	não há	ventosas	eletro-ímã	sucção
Força de Adesão	N	não há	-	-	500 x 6
Deslocamento	-	x - y - z	x - y	x - y	x - y z
Carregamento máximo	kgf	-	-	100	30
Força de Impulso	N	10 x 2	-	-	-
Velocidade máxima	m/min	-	-	1.02	0.6
Preso por cabos	-	sim	sim	sim	sim
Alimentação	-	umbilical	-	umbilical	umbilical
Fonte de Energia	V	-	-	24 DC	-
Condições de uso	-	aquático	terreno	-	-
Potência	W	-	-	100 - 600	-

As Necessidades dos Clientes, o “Benchmarking” e a análise do estado da arte foram utilizados para descrever o produto através de características técnicas capazes de serem mensuradas por algum tipo de sensor. Obteve-se desta forma os Requisitos de Projeto. Partiu-se então para a classificação dos Requisitos de Projeto, que avaliava a ordem de importância de cada requisito de projeto. Para isso foi utilizado o Método do QFD (Quality Function Deployment), mais especificamente a ferramenta da Casa da Qualidade, mostrada na Tabela 2 que faz um balanço entre os requisitos de projeto e as necessidades do cliente. Desta forma, avaliam-se quais requisitos de projeto são os mais importantes considerando-se a visão do cliente. Foram consultados para a melhor compreensão dos requisitos do projeto: Ortiz (2000), Gradetsky (1997).

Tabela 2 – Casa da Qualidade para o Robô de Inspeção.

GRAU DE RELACIONAMENTO Necessidade dos clientes x Requisitos de Projeto = 5 = 3 = 1 = 0 ----- → = manter ↘ = reduzir ↗ = aumentar			REQUISITOS DO PROJETO																							
			Bitola do cabo umbilical	Comprimento cabo umbilical	Massa do cabo umbilical	Comprimento do robô	Largura do robô	Altura do robô	Massa do robô	Preço total do equipamento	Tempo de preparação	Velocidade de inspeção	Consumo de corrente	Potência consumida	Precisão de posicionamento	Frequência de manutenção	Resistência à corrosão	Força de fixação	Capacidade de carga	Volume dos sensores	Massa dos sensores	Posicionamento dos sensores	Força de Arrasto	Força para Movimentação	Material	VALOR DO CLIENTE
NECESSIDADES DOS CLIENTES	Básicas	Movimentação em duas coordenadas cartesianas	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	1	
		Trabalho em ambiente marinho	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	1	
		Grande aderência ao casco do navio	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	1	
	Durabilidade	Pouca Manutenção	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	3	
		Grande resistência à corrosão (não oxidar)	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	2	
		Facilidade de operação (controle e manuseio)	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	3	
	Utilização	Baixo tempo de inspeção	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	3	
		Baixo peso	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	3	
		Pequenas dimensões	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	4	
	Operação	Autonomia	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	2	
		Baixo consumo de energia	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	4	
		Estabilidade mecânica	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	1	
	Custo	Precisão do posicionamento	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	1	
		Baixo custo de Manutenção	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	3	
		Custo compatível	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	5	
	Adicionais	Aparência	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	4	
UNIDADES			mm²	mm	kg	mm	mm	mm	kg	R\$	min	m³/min	mAh	Wh	mm	vez/ano	ano	kgf	kg	mm³	kg	-	kgf	kgf	-	
Classificar			VALOR DA IMPORTÂNCIA																							
CLASSIFICAÇÃO DA IMPORTÂNCIA			12	8	15	4	4	3	6	9	19	10	17	17	5	14	18	1	10	11	13	16	2	1	7	

Em consequência disso, foi possível definir as Especificações de Projeto e neste documento estabeleceu-se Objetivos Específicos para cada Requisito de Projeto, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Especificação de Projeto para o Robô de Inspeção.

REQUISITOS DO PROJETO	CLASSIFICAÇÃO QDF	OBJETIVOS ESPECIFICOS	SENSOR
Bitola do cabo umbilical	11º	< 507 mm ²	Paquímetro
Comprimento cabo umbilical	8º	> 50m	Trena
Massa do cabo umbilical	14º	< 158,64 kg	Balança
Comprimento do robô	4º	< 1000mm	Régua
Largura do robô	4º	< 600 mm	Régua
Altura do robô	2º	< 350 mm	Régua
Massa do robô	5º	< 200 kg	Balança
Preço total do equipamento	9º	25 000,00	R\$
Tempo de preparação	17º	30 mim	Cronômetro
Velocidade de inspeção	10º	0,43 m ² / min	Cronômetro
Consumo de corrente	15º	< 5 A	Cálculo
Potência consumida	15º	< 1200 W	Cálculo
Precisão de posicionamento	3º	< 100 mm	Cálculo
Frequência de manutenção	12º	> a cada 10 inspeções	Registro
Resistência à corrosão	16º	> 5 anos	Registro
Força de fixação	1º	5000 N	Dinamômetro
Capacidade de carga	9º	20 kg	Dinamômetro
Volume ocupado pelos sensores	7º	< 0,21 m ³	Régua
Massa dos sensores	12º	< 3kg	Balança
Posicionamento dos sensores	13º	-	Régua
Força de Arrasto	4º	100 N + 65,67 N	Ensaio
Força para Movimentação	1º	< 5165,67 N	Ensaio
Material	6º	Aço inoxidável	-

Com base nessa classificação obtida, a força de fixação e a força para movimentação mereceram uma atenção maior, seguida das dimensões do robô e da precisão de posicionamento.

3.2 Projeto Conceitual

Dando seqüência ao trabalho, a etapa de Projeto Conceitual foi iniciada. Essa etapa pode ser dividida em três passos: i, estrutura funcional; ii, gerações de soluções; e a iii, escolha da concepção mais adequada.

A Estrutura Funcional, uma lista de verbo predicado, permite identificar as funções principais que o produto deverá executar, como movimentar na vertical, não escorregar, ser resistente à corrosão. Com isso, é possível construir a Matriz Morfológica, tabela que contém soluções parciais, ao menos duas, para cada função identificada na Estrutura Funcional. Parte da matriz morfológica é mostrada na Figura 1. De Xu e Ma (2001) algumas soluções parciais foram retiradas.

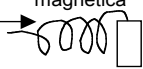
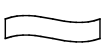
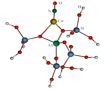
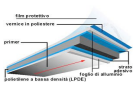
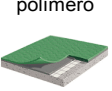
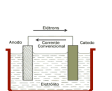
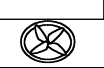
Movimentar na horizontal e na vertical	Patas movimentadas por fuso	Patas articulada	Esteira	Rodas	Discos
"Aderir ao Casco do Navio"	Força magnética 	Força eletro-magnética 	Sucção 	Ventosas 	Eletro-magnética + Ventosas
Acomodar Carga	Gancho 	Cinta 	Compartimento 	Conectores 	
Resistir à Corrosão	Aço Inoxidável 	Polímero 	Compósito 	Proteção de polímero 	Proteção catódica 
Suportar Carga	Grande força de fixação 	Propulsor 			

Figura 1 – Parte da Matriz Morfológica para o Robô de Inspeção.

Da Combinação das células da Matriz Morfológica, foram geradas 20 diferentes concepções para o projeto, que foram avaliadas utilizando uma Matriz de Avaliação, que leva em conta o quanto que a concepção atenderia às especificações de projeto.

A concepção com maior potencial de atender as funções a serem executadas foi escolhida, e será melhor explorada na seção seguinte.

3.3 Projeto Preliminar

Partindo da concepção escolhida, foi iniciado o projeto preliminar para assegurar que o modelo é aceitável e cumpre aos parâmetros de performance. Com o auxílio de um sistema CAD de modelagem comercial, foram gerados diversos modelos da concepção, até que se chegasse a uma solução estruturalmente resistente e viável de se fabricar. Para a fabricação, preferiu-se utilizar como matéria-prima produtos comerciais, peças com medidas padronizadas e fáceis de se encontrar no mercado. A Figura 2 mostra a primeira modelagem da concepção.

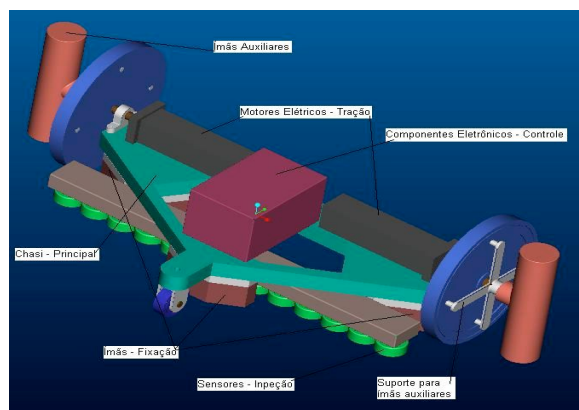


Figura 2 – Esquema da primeira concepção.

Percebe-se que, para a geração da primeira concepção, não foram utilizados materiais comerciais, fazendo com que a construção do modelo não fosse viável. Dentre outros modelos, então, foi selecionado o da Figura 3, já com materiais padrões comerciais.

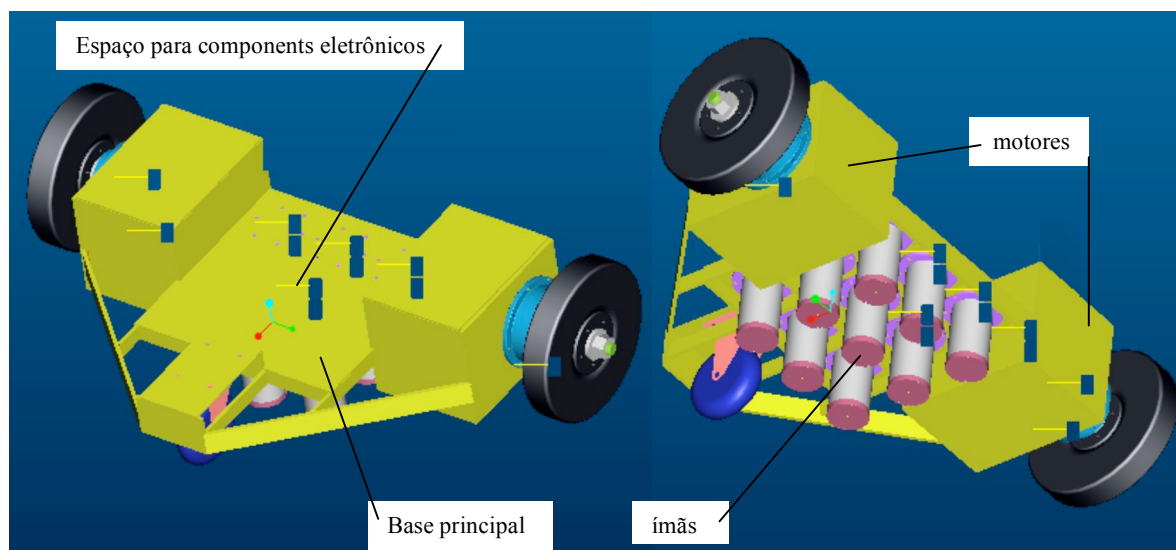


Figura 3 – Concepção final do projeto.

3.4 Projeto Detalhado

Fase atual em desenvolvimento no projeto. Envolve o estabelecimento do layout definitivo, sendo expresso pela documentação necessária para a produção do protótipo. Está sendo desenvolvido com base na utilização de materiais e processos de fabricação oferecidos pelo mercado.

4. TESTES DE ATRAÇÃO MAGNÉTICA

A concepção escolhida tinha como mecanismo de adesão ao casco do navio a força magnética. Para maior confiabilidade no projeto do sistema de adesão, foram realizados ensaios para determinação da força de atração e dimensionamento da quantidade de ímãs a serem utilizados. Para isso foi projetado e construído um dispositivo de testes, mostrado na Figura 3, constituído de: i, uma estrutura de madeira; ii, uma mola de tração com constante de elasticidade conhecida; iii, uma base de metal ferroso; iv, um fuso; e v, suporte para o ímã.

Foram utilizados dois ímãs Neodímio-Ferro-Boro com dimensões de 50x50x25,4 mm e campo magnético com orientação perpendicular a seção de maior área.

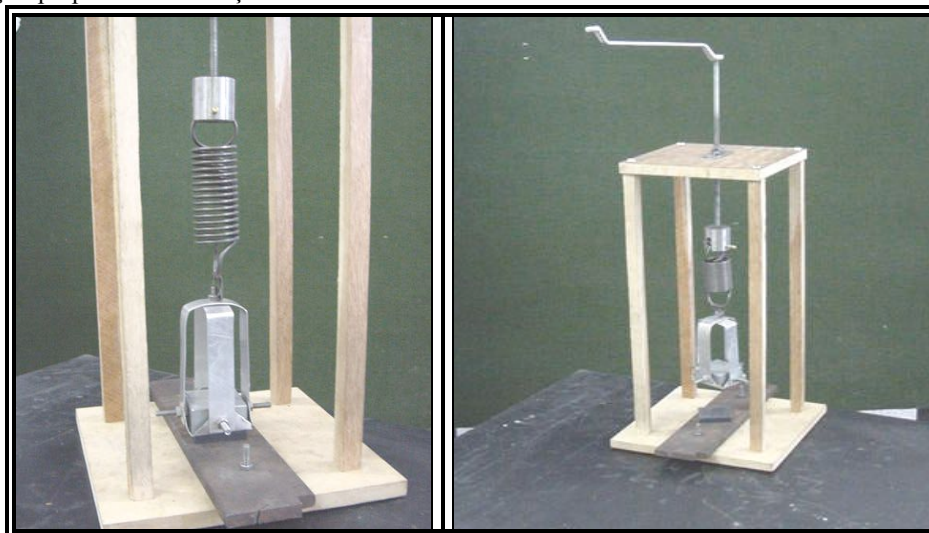


Figura 2 – Dispositivo de teste para os ímãs

O teste fundamentou-se que a força de atração magnética provocada pelo imã seria igual á força de tração aplicada pela mola. Essa força poderia ser calculada utilizando o valor medido da deformação da mola e a constante de elasticidade da mesma.

Foi avaliada a força de atração magnética com uma série de variáveis: distância do imã à base ferrosa; material e dimensões do suporte; utilização de um ou dois imãs e para orientar o campo magnético, blocos de aço junto ao imã. Os resultados podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados Obtidos no Testes com os Imãs.

	Material do Suporte	Espessura Suporte (mm)	Distância (mm)	Número de imãs	Comprimento (mm) da barra Ferromagnética	Força (kgf)	Relação (kgf/kg)
<i>Exp1</i>	Aço	1,59	10,0	1	0	5,1	10,6
<i>Exp2</i>	Al	0,60	10,0	1	0	9,7	20,3
<i>Exp3</i>	Al	0,60	10,0	1	26,1	13,0	14,0
<i>Exp4</i>	Al	0,60	10,0	1	54,1	15,5	10,9
<i>Exp5</i>	Aço	1,59	10,0	1	54,1	9,3	6,6
<i>Exp6</i>	Aço	1,59	10,0	1	25,1	8,2	8,8
<i>Exp7</i>	Aço	1,59	18,2	1	25,1	3,0	3,2
<i>Exp8</i>	Aço	1,59	8,2	1	25,1	9,9	10,6
<i>Exp9</i>	Aço	1,59	3,2	1	25,1	20,4	21,9
<i>Exp10</i>	Aço	1,59	6,3	1	25,1	12,4	13,4
<i>Exp11</i>	Aço	1,59	10,0	2	0	10,7	11,2
<i>Exp12</i>	Aço	2,79	10,0	2	0	8,4	8,8
<i>Exp13</i>	Aço	5,79	10,0	2	0	7,2	7,6
<i>Exp14</i>	Aço	7,79	10,0	2	0	5,1	5,4

Com base nos resultados obtidos, serão necessários oito conjuntos constituídos de quatro imãs cada um para gerar uma força de atração total com o casco do navio de 3000N.

5. CONCLUSÃO

O trabalho deu origem a 20 diferentes alternativas para a solução do problema durante o Projeto Conceitual. Dentre elas, a alternativa que apresentou o maior potencial foi selecionada para o Projeto Preliminar. Esta concepção está sendo detalhada tendo com base materiais e processos oferecidos pelo mercado. Após essa etapa, pretende-se realizar a construção do protótipo e a realização de testes para a avaliação de performance do produto.

Os resultados dos testes de atração magnética apresentaram resultados com um desvio padrão inferior a 4% do valor médio, o que elevou a qualidade dos dados obtidos e forneceu mais segurança no dimensionamento e distribuição dos elementos magnéticos no robô.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Agência Nacional do Petróleo – ANP – e à Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT e ao PRH-10.

7. REFERÊNCIAS

- BATLLE, J., RIDAO, P., GARCIA, R., CARRERAS, M., CUFÍ, X., EL-FAKDI, A., RIBAS, D., NICOSEVICI, T., BATLLE, E., Underwater Robotic Intelligent System, Computer Vision and Robotics Group, University of Girona, Spain, 2004.
- BRICK, E.S., DE PILLA, L.H.L., **A análise de custo de ciclo de vida no contexto da Engenharia de Sistemas e Apoio Logístico**. In: VI Simpósio Depesquisa Operacional E Vii Simpósio De Logística Da Marinha (SPOLM-2003), 2003, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: Centro de Análise de Sistemas Navais, 2003.
- FATRONIK, **Annual Report** 2004.

- GRIECO, J.C., PRIETO, M., ARMADA, M., DE SANTOS, P.G., A Six-Legged Climbing Robot For High Payloads. In: **International Conference on Control Applications**, Trieste, Italy: Instituto de Automatica Industrial, CSIC, Sep. 1998.
- LUK, B.L., **Intelligent Legged Climbing Service Robot For Remote Maintenance Applications In Hazardous Environments**, City University of Hong Kong. Tat Chee Avenue, Kowloon, Hong Kong, 2005.
- ORTIZ, F.J., IBORRA, A., MARÍN, F., ÁLVAREZ, B., FERNÁNDEZ, J. M., **A Teleoperated System for blasting applied to ships maintenance**, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, Spain, 2000.
- PAHL, G., BEITZ, W. **Engineering design: a systematic approach**. London: Springer-Verlag, 1996.
- GRADETSKY, V., RACHKOV, M., Climbing Robot For Underwater Inspection Of Constructions, Institute for Problem in Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 1997.
- XU, Z., MA, P., **A Wall-Climbing Robot Labelling Scale of Oil Tank's Volume**, The Robotics Institute, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao University, Shanghai, China, Oct., 2001.

PAPER TITLE

The objective of the project is the development of an autonomous mechanic system capable of moving on an approximately vertical plane carrying on a set of sensors able to accomplish a non-destructive inspection on production ship's hull. These ships remain on work, on sea, for years and, to prevent accidents they must pass through safety inspections, which still could be improved in precision and time. For the development of the project, it has been applied the methodology of project proposed by Pahl & Beitz. Following the methodology, it has been collected information about the inspection conducted today on ship's hull, what kind of robots for inspection and climbing do exist, how is the operation environment of the mechanism studied. Now, the project is on the detail design stage, in which the final alternative solution is being dimensioned. The final phase is the construction of the prototype. A preliminary set of tests with the connection system indicates the feasibility of the adopted solution.

Non-destructive Inspection, Platform-Ship, Climbing Robots, Autonomous Inspection.

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.