

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

O ESTUDO DO COMPORTAMENTO EM FADIGA DE PARAFUSOS FABRICADOS EM INCONEL 718 UTILIZADOS EM ESTRUTURAS OFFSHORE

Tales Martins, tales.martins@ifsp.edu.br
Renato Chaves, renato.chaves@ifsp.edu.br

Instituto Federal de São Paulo-IFSP-Departamento Engenharia Mecânica-Materiais e Processos de Fabricação,
Rua Pedro Vicente, 625-Canindé - CEP 01109-010 - São Paulo, SP.

Resumo: Os parafusos utilizados na indústria offshore devem ser fabricados afim de garantir uma vida normal em serviço. Além de propriedades mecânicas excelentes os materiais selecionados devem garantir resistência a corrosão principalmente em ambiente marinho. Em estudos mais recentes falhas em parafusos estão sendo apontadas como uma das principais causas de fugas de gás e petróleo em instalações offshore. As seleções de superligas na fabricação de parafusos para offshore estão sendo empregados. Parafusos fabricados de Inconel 718 superligas são utilizadas na montagem de estruturas offshore. Inconel 718 é uma liga à base de níquel capaz de ser endurecido por precipitação utilizada extensivamente neste formato onde são necessárias alta resistência mecânica e resistência à corrosão. A liga é empregada em alguns fixadores e componentes estruturais no mar, principalmente em situações onde o comportamento da força, o aumento de volume, e a resistência a fadiga são importantes. Não só a seleção do material adequado é de extrema importância, mas também de processamento de material adequado para garantir a adequação dos elementos de fixação para o ambiente de serviço submarino pretendido. A medida que a indústria de petróleo e gás vem explorando petróleo em águas mais profundas a necessidade de materiais mais resistentes. Foram utilizados dois tratamentos térmicos diferentes: o tratamento "convencional" (ASTM A637), e um tratamento térmico "modificado" são aplicados, a fim de aumentar a sua vida útil. Ensaio de fadiga e de tração após o tratamento mostram o comportamento mecânico dos parafusos fabricados para a liga Inconel 718. O presente trabalho tem como objetivo investigar o efeito de tratamentos térmicos e de envelhecimento e os benefícios as propriedades mecânicas na liga de Inconel 718 na fabricação de parafusos para offshore.

Palavras-chave: offshore, Inconel 718 superliga, fadiga, tração

1. INTRODUÇÃO

Para o observador casual a seleção de parafusos, porcas e rebites para um projeto deve ser uma tarefa simples. Na realidade, é uma tarefa difícil, que exige uma análise cuidadosa da temperatura, corrosão, vibração, fadiga, pré-carga inicial, e muitos outros fatores principalmente em ambiente submarino. Materiais de alta resistência para a fabricação de parafusos são necessários pela indústria offshore. Resistência adequada, resistência à corrosão e rachaduras assistida causadas pelo ambiente marítimo são os elementos chave na seleção de fixadores para equipamentos submarinos (Norsok M-DP-001, 1994). No entanto, vários materiais candidatos podem ser suscetíveis a falhas devido ao hidrogênio e craqueamento associada causada pelo sistema de proteção catódica (Pfingstag *et al.*, 2010). Em particular, a superliga Inconel 718 foi desenvolvida no final dos anos 1950, comumente utilizada em componentes para turbina na indústria aeronáutica. Apesar de existir a longo período de tempo, ainda é largamente utilizada em várias aplicações na indústria aeroespacial, nucleares e de petróleo, devido à combinação de excelentes propriedades mecânicas, resistência à corrosão e capacidade de soldadura a temperaturas elevadas até 650°C (Thomas *et al.*, 2006). Tais componentes estruturais são muitas vezes sujeitos a carregamentos cíclicos em serviço, e, portanto, existe a possibilidade de extensão de fissuras ou falhas de trincas durante o serviço.

Parafusos de fabricação com a liga Inconel 718 aumenta a vida útil das estruturas submersas. Estudos identificaram que o mecanismo de endurecimento como a refinação do grão 718 é observado na liga na condição de recozido, mas é muito eficaz quando a liga é envelhecida (Olovssjö *et al.*, 2010). Além dos estudos que estão sendo realizados, e tendo em vista a relevância desta liga, o presente trabalho tem como objetivo investigar o efeito de tratamentos térmicos de

envelhecimento e os benefícios as propriedades mecânicas na liga de Inconel 718. Numerosos tratamentos térmicos proprietários são usados para a liga Inconel 718 dependendo das propriedades requeridas. Essas sequências de tratamento térmico são normalmente desenvolvidas por empresas ou agências independentes do fornecedor de material, por conseguinte, a discussão de procedimentos, tolerâncias e propriedades resultantes deve ser com essa empresa ou agência. Todos os dados apresentados nas seções que se seguem são típicos, mas não podem ser utilizados para fins de especificação. Dois tratamentos térmicos diferentes foram empregados: um chamado "Convencional" à base de óleo e padrão ASTM A637, e um outro tratamento térmico chamado de "Modificado", destinada a melhorar as propriedades mecânicas e de anticorrosão, antes do processo de fabricação do parafuso.

O conhecimento do comportamento de fadiga do equipamento usado no sistema offshore é muito importante para a área de exploração petrolífera, não só para otimizar o custo / tempo de manutenção e operação, mas também para permitir a previsão de possíveis falhas, que permite alterar o projeto inicial antes da sua implementação em alto-mar. Testes de fadiga por flexão rotativa, dureza e de tração são aplicados e os resultados são comparados as normas de seleção de materiais e indicam o melhor tratamento térmico para fabricação de parafusos na aplicação offshore.

1.1. Parafusos em Offshore

Para a garantia da qualidade na aplicação dos parafusos destinados ao mercado de offshore, as normas internacionais especificam uma série de requisitos e propriedades que deverão ser atendidas pelos componentes. Para a determinação das propriedades necessárias para parafusos ou revestimentos de fixação, é importante entender qual a função dos parafusos. Parafusos submarinos são componentes cruciais para fixar juntos componentes de valor crítico. Muitas vezes, a falha destes parafusos tem sido uma das principais causas de fugas de óleo ou gás em instalações offshore, assim como as dificuldades de acesso para as equipes de manutenção. Impedir a falha prematura destes componentes é certamente desejável em qualquer lugar possível na estrutura. Aplicações típicas incluem cabeças de poço, árvore de natal, flanges e conexões estruturais.

Escolhendo o grau de material e também o tipo de fixador é importante para coincidir com o funcionamento necessário para o desempenho da carga. A Figura 1 mostra um teste de instalação do fixador, quanto maior for torque máximo maior o risco de falha por fadiga potencial e afrouxamento do sistema de parafuso.

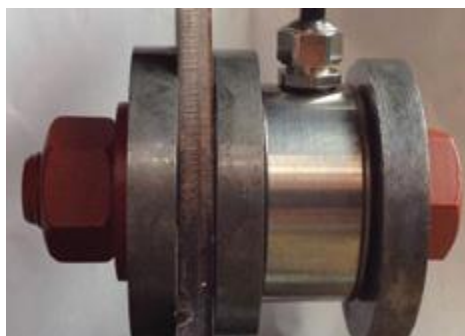


Figura 1. Parafuso sob Teste de Torque

1.2. Seleção de Materiais para parafusos Offshore

Materiais para parafusos utilizados para uso em offshore e dentro do mar são classificados nas normas ASTM A 320 Grau L43 e ASTM A193 Grau B7. A partir dos testes especificados em normas, são realizados os ensaios técnicos objetivando o controle do processo de fabricação. A seleção de materiais são fatores que precisam ser executados o suficiente para garantir desempenho. Parafusos com um diâmetro ≤ 10 mm, deve ser de aço inoxidável tipo 316 de metal para temperaturas inferiores a 60°C. Se outros materiais para parafusos são necessários devido a resistência à corrosão ou por outras razões, o material deve ser escolhido de acordo com os requisitos gerais (Norsok M-DP-001,1994). Para aplicações submarinas, Inconel 718 deve ser utilizado quando os parafusos resistentes à corrosão são necessários à ambiente submarino, isto é, para as condições em que os parafusos estão expostos à água do mar e proteção catódica não pode ser assegurada. Deve verificar-se que os materiais têm propriedades mecânicas aceitáveis às temperaturas de projeto real, desenvolvimento de ciclos térmicos especiais para o envelhecimento da liga tem sido necessário para proporcionar um material consistente com uma dureza máxima. Estas preocupações referem-se à susceptibilidade à fragilização por hidrogênio que Inconel 718 liga pode apresentar dependendo do seu processamento, microestrutura, dureza e tensões de aplicação que pode sofrer. Através deste trabalho, foi possível demonstrar a adequação de Inconel 718 liga em quanto a fadiga e dureza resultante diante de tratamentos térmicos adequadamente controlados, e se o parafuso de carga está dentro dos limites normais de trabalho. Em geral parafusos com diâmetros acima de 10 mm em sistemas e equipamentos de condutas deve ser de aço carbono de baixa liga selecionado de acordo com as normas ASTM listadas na Tabela 1.

Tabela 1. Faixa de Temperatura - Materiais para parafusos Offshore

Faixa Temperatura (°C)	PARAFUSO	PORCA	Faixa Tamanho (mm)
-100/+400	A 320 Grade L7	A 194 Grade 4/S4	<=50
	A 320 Grade L43	A 194 Grade 7	<100
-46/+400 ¹⁾	A 193 Grade B7	A 194 Grade 2H	TODOS
-29/+540 ¹⁾	A 193 Grade B16	A 194 Grade 7	TODOS
-196/+540 ²⁾	A 193 Grade B8M	A 194 Grade 8M/8MA ³⁾	TODOS

NOTAS

1. Estes tipos não devem ser utilizados para equipamento submarino permanente. Para árvores X-mas e equipamentos recuperáveis, Grau B7 pode ser usado. Grau B16 é destinado para o serviço de alta temperatura, fora do intervalo de temperatura para Grade B7.
2. Tipo Aço 316 para parafusos e porcas não devem ser utilizados na temperatura máxima de operação acima de 60°C, se forem expostos a ambiente marinho.
3. Use 8MA com classe 1 parafuso.

1.3. Inconel 718

As conexões aparafusadas devam ser projetadas e instaladas para fornecer a vida de serviço necessário para as diversas condições de exposição e de trabalho. Parafusos podem falhar por uma série de razões (por exemplo, sobrecarga, fadiga ou corrosão).

Materiais de alta resistência para aparafusar são necessários para utilização submarina pela indústria offshore. No entanto, vários materiais candidatos podem ser suscetíveis a falhas devido ao hidrogênio e associados rachaduras causadas por o sistema de proteção catódica.

Superliga Inconel 718 é uma liga de níquel-base de precipitação endurecível que é utilizada extensivamente onde a alta força e resistência à corrosão são necessários e tem a composição química conforme Tabela 2. O material é utilizado na faixa de temperatura -250°C a 700°C. Por estas razões, a liga é usada em alguns componentes estruturais offshore, em particular quando o comportamento a força, inchaço, e resistência à deformação são importantes (Kilgallon *et al.*, 2003).

Tabela 2: Composição Química Inconel 718 em Peso % segundo a especificação API (UNS N07718)

Al	B	C	Cr	Co	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Nb+Ta	Ti	O	N
0.56	0.0041	0.023	17.97	0.14	0.03	17.31	0.08	2.97	54.18	5.40	1.00	0.001	0.0062

2. MATERIAS E MÉTODOS**2.1. Tratamentos Térmicos**

Os tratamentos térmicos são realizados com o intuito de otimizar as propriedades das superligas para que estas se tornem adequadas para diversas aplicações (Donachie *et al.*, 2002). Dois tipos de tratamentos térmicos diferentes foram empregados: um que chamamos de "Convencional" tratamento térmico, e outro tratamento térmico que chamamos de "Modificado", desenvolvido em parceria com a empresa Multialloy Metais e Ligas Especiais (São Paulo-SP). Para aplicações na indústria de petróleo e gás o objetivo é atingir uma combinação de alta resistência à corrosão e resistência mecânica (Behrens *et al.*, 2005).

Os tratamentos térmicos foram desenvolvidos como se segue:

1. "Convencional" -recozido em 954°C, refrigerada a ar em sala ate temperatura ambiente. Aquecido entre 8 horas a 718 °C, resfriado no forno a 621°C e mantida a 621°C durante um total tempo de 18 horas de envelhecimento, e refrigerada em sala a ar ate temperatura ambiente.

2. "Modificado" -solubilizado -recozido 1 hora a 1093°C, resfriado a 718°C a rampa de 56°C / h, mantido 4 horas a 718°C, e resfriado a 621°C em rampa de 56°C / h, mantido 16 horas a 621°C, e refrigerado em sala a ar ate temperatura ambiente.

2.2. Identificação e Confeção das Amostras

Os parafusos confeccionados após os tratamentos térmicos nos tamanhos M6 x100 e M12 x200 foram usinados e transformados em espécimes de acordo com as medidas do corpo de prova de cada ensaio. Para testes de tração e fadiga por flexão rotativa com o material nas duas condições de tratamentos térmicos "Convencional" e "Modificado" na sequência de ensaios conforme Tabela 3.

Os grupos foram divididos em dois tratamentos o "Convencional" - 5 espécimes ensaios de tração utilizando parafusos tipo M6 e 5 espécimes de fadiga por flexão rotativa utilizando parafuso tipo M12 e o tratamento térmico "Modificado"- 5 espécimes para o ensaio de fadiga por flexão rotativa utilizando parafuso M12 e 5 para o ensaio de tração utilizando parafuso M6 onde foram identificados e conduzidas.

Tabela 3. Sequência de Ensaios de Tração e Fadiga por Flexão Rotativa

Corpo de Prova	Tratamento Térmico	Tratamento Térmico
Identificação	Convencional	Modificado
121	Ensaio Tração-M6	Fadiga Flexão Rotativa-M12
131	Ensaio Tração-M6	Fadiga Flexão Rotativa-M12
141	Ensaio Tração-M6	Fadiga Flexão Rotativa-M12
321	Ensaio Tração-M6	Fadiga Flexão Rotativa-M12
441	Ensaio Tração-M6	Fadiga Flexão Rotativa-M12
552	Fadiga Flexão Rotativa-M12	Ensaio Tração-M6
442	Fadiga Flexão Rotativa-M12	Ensaio Tração-M6
332	Fadiga Flexão Rotativa-M12	Ensaio Tração-M6
222	Fadiga Flexão Rotativa-M12	Ensaio Tração-M6
112	Fadiga Flexão Rotativa-M12	Ensaio Tração-M6

2.3. Ensaio de microdureza Vickers

Para os ensaios de microdureza Vickers foi utilizado o microdurômetro Ernst Leitz Wetzlar conforme Figura 2, com cargas de 100 g e de 300 g, dependendo da dureza do material, durante 30 segundos. Nos corpos de prova – de aproximadamente 10 mm e 20 mm de espessura e 100 mm e 200 mm de comprimento e 10 mm e 20 mm de largura – foram realizadas seis impressões de microdureza, com a distância de aproximadamente 2 mm entre as impressões.



Figura 2. Microdurômetro Ernst Leitz Wetzlar

2.2. Ensaios de Tração

Os ensaios de tração a temperatura ambiente foram executados numa máquina universal de ensaios mecânicos modelo DL3000 da Instron realizados no campus SP/IFSP conforme figura 2, utilizada velocidade de ensaio conforme Norma ASTM A 370-12.



Figura 2. Máquina Ensaios de Tração-DL 3000

Os corpos-de-prova foram usinados conforme mostra o desenho da Figura 3.

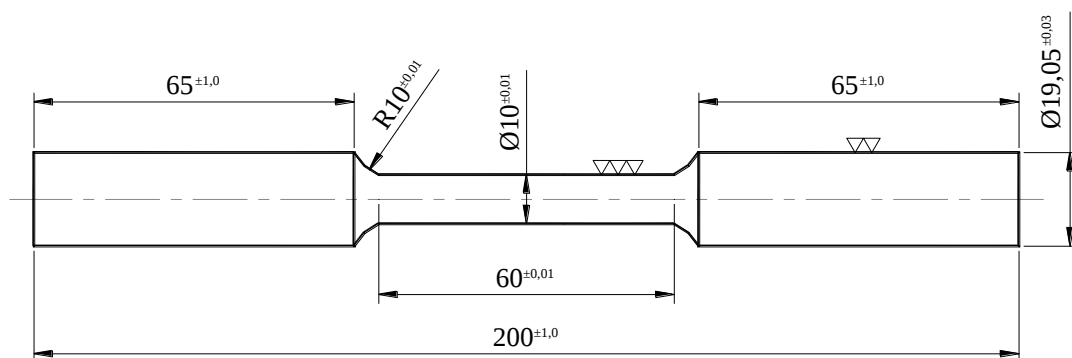


Figura 3. Corpo de Prova Ensaio de Tração

2.2. Ensaio de Fadiga por Flexão

À melhoria na vida útil de fadiga dos espécimes com diferentes tratamentos térmicos é atribuído principalmente ao estresse induzido residuais de compressão, maior dureza, rugosidade reduzida. As superfícies fraturadas foram analisadas em mecanismos de fratura e vida útil em fadiga. Os ensaios de fadiga por flexão rotativa foram realizados na Campus SBV/IFSP e o equipamento utilizado foi uma máquina de ensaios de fadiga por flexão rotativa modelo RBF200 da SI conforme Figura 4. A rotação de ensaio foi de 20 Hertz e a razão de tensão foi de $R = -1$ até a fratura ou até 10^7 ciclos, estando de acordo com os parâmetros recomendados pelo fabricante.



Figura 4. Máquina de Ensaio de Fadiga por Flexão- RBF 200

Os corpos-de-prova foram usinados de acordo com o desenho apresentado na Figura 5.

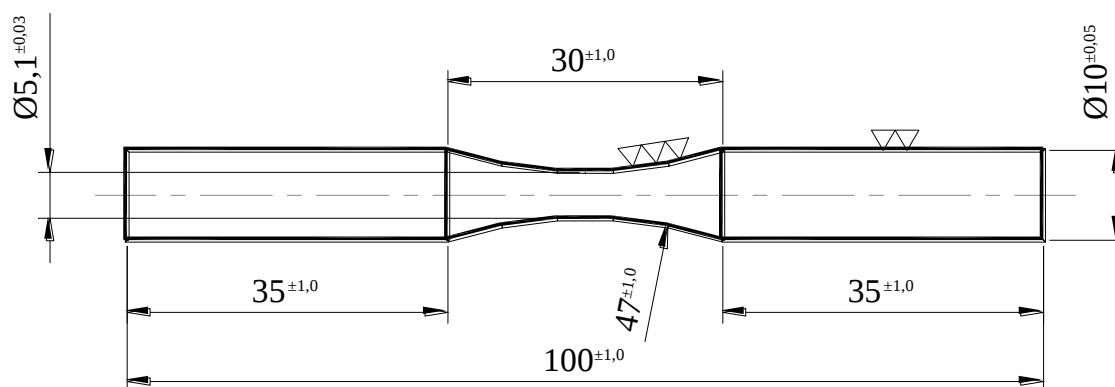


Figura 5. Corpo de Prova Ensaio de Fadiga Flexão Rotativa

3. RESULTADOS E ANÁLISES

3.1. Resultados dos Ensaio de Dureza e Tração

A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de tração e dureza dos corpos de prova dos tratamentos térmicos “convencional” e “modificado” em parafuso M6.

Tabela 4. Resultados do Ensaio de Dureza e Tração

Tratamentos Térmicos	Dureza [HV]	σ_{LE} [MPa]	σ_{LRT} [MPa]	ϵ [%]
121-Convencional	424,2	918	1240	16,9
131-Convencional	430,1	928	1245	16,9
141-Convencional	425,3	933	1247	16,8
321-Convencional	422,4	965	1236	16,7
441-Convencional	426,2	945	1239	16,6
552-Modificado	428,2	914	1208	12,7
442-Modificado	425,3	918	1206	12,6
332-Modificado	423,7	925	1210	12,7
222-Modificado	426,4	942	1212	12,5
112-Modificado	427,1	934	1209	12,4

3.2. Resultados dos Ensaio de Fadiga por Flexão Rotativa

A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios de fadiga por flexão rotativa e dureza dos corpos de prova dos tratamentos térmicos “convencional” e “modificado” em parafuso M12.

Tabela 5. Resultados do Ensaio Dureza e Fadiga por Flexão Rotativa

Tratamentos Térmicos	BAIXO (10 ⁵) [MPa]	ALTO (10 ⁶) [MPa]	LIMITE (10 ⁷) [MPa]
121-Modificado	937	554	485
131-Modificado	958	532	493
141-Modificado	895	528	474
321-Modificado	934	538	455
441-Modificado	956	545	423
552-Convencional	827	413	386
442-Convencional	815	419	358
332-Convencional	833	425	365
222-Convencional	854	432	372
112-Convencional	828	418	384

4. CONCLUSÕES

O comportamento de Inconel 718 para diferentes tratamentos térmicos na fabricação de parafusos foram estudados. Os resultados deste estudo podem ser resumidos como se segue:

Após o envelhecimento, houve um relevante aumento nos valores de resistência à tração, fadiga e de dureza e uma considerável diminuição da ductilidade.

Para os dois tratamentos térmicos estudados, taxas de crescimento de trinca são geralmente um pouco mais elevadas sendo o tratamento "Convencional" pouco mais acelerada.

Analizando os dados de fadiga, tração e dureza pode-se afirmar que o tratamento térmico "Modificado" eleva significativamente os níveis de resistência mecânica da liga, tendo como consequência a redução da ductilidade

Os resultados de tração e fadiga indicam o tratamento térmico como "Modificado" como melhor resposta a resistência mecânica na fabricação de parafusos para aplicação em offshore.

5. REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials - ASTM. A 370: Standard Test Method and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. ASTM; 2016
- Behrens, R., Agarwal, D.C., Laboratory testing of age-hardenable alloys 925 and 718 in source gas environments. In: Corrosion 2005, number 05103, NACE International, USA, 2005.
- Donachie, M.J., Donachie, S.J., Superalloys: A Technical Guide, ASM International, Second Edition, USA, 2002.
- Ferreira, A.D.C., Influência do processamento termomecânico e dos tratamentos térmicos na microestrutura e nas propriedades da superliga de níquel 718, Projeto de fim de curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, julho de 2010.
- Norsok Standard M-DP-001, 1994, "Materials Selection-Design Principles- Bolting materials for piping, equipment, structural and subsea applications", Seção 6.5.5, pp.20-21.
- Olovsjö, S., Wretland, A., Sjöberg, G., 2010, "The effect of grain size and hardness of wrought Alloy 718 on the wear of cemented carbide tools", Wear, Vol. 268, Göteborg, Sweden, pp.1045-1052.
- Pfingstag, M.E, Muller, I.L, Schaeffer, L., 2010, "Avaliação em relação à corrosão-fadiga de juntas soldadas da liga Inconel 625", CIFIE, Vol.22, Rio Grande do Sul, Brazil, pp.3-4.
- Thomas, A, Wahabi, M.El, Cabrera, J.M., Prado, J.M., 2006, "High temperature deformation of Inconel 718", Journal of Materials Processing Technology Vol. 177, Barcelona, Espanha, pp.469-477.

6. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

BEHAVIOR STUDY ON FATIGUE BOLTS PRODUCED IN INCONEL 718 USED IN OFFSHORE STRUCTURES

Tales Martins, tales.martins@ifsp.edu.br
Renato Chaves, renato.chaves@ifsp.edu.br

Instituto Federal de São Paulo-IFSP-Departamento Engenharia Mecânica-Materiais e Processos de Fabricação,
Rua Pedro Vicente, 625-Canindé - CEP 01109-010 - São Paulo, SP.

Abstract: *The bolts used in the offshore industry must be made in order to ensure a normal service life. In addition to excellent mechanical properties, the materials selected should ensure corrosion resistance especially in marine environment. More recent studies failures screws are being identified as a major cause of gas leaks and oil in offshore facilities. The super alloys selections in manufacturing offshore for screws are being employed. Bolts made Inconel 718 super alloys are used in offshore structures assembly. Inconel 718 is an alloy of nickel base capable of being hardened by precipitation extensively used in this format which are necessary high mechanical strength and corrosion resistance. The alloy is used in some fasteners and structural components in the sea, especially in situations where the behavior of strength, swelling, and fatigue resistance are important. Not only the selection of suitable material is of utmost importance, but also of suitable material processing to ensure the adequacy of fasteners to the desired submarine service environment. As the oil and gas industry has been exploring oil in deeper waters the need for tougher materials. Two different heat treatments were used: the "conventional" treatment (ASTM A637), and a heat treatment "modified" are applied in order to increase its useful life fatigue tests and tensile strength after treatment show the mechanical behavior of made screws for Inconel 718 alloy this study aims to investigate the effect of thermal treatments and aging and the benefits the mechanical properties of the alloy Inconel 718 in manufacturing bolts offshore.*

Keywords: *offshore, Inconel 718 super alloy, fatigue, tensile*