

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

DANIEL FRANCISCO BRISTOT

**INFLUÊNCIA DO *CLADDING* DE INCONEL® 625 NO COMPORTAMENTO A
FADIGA DO AÇO SAE 4140**

CAXIAS DO SUL

2014

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**INFLUÊNCIA DO *CLADDING* DE INCONEL® 625 NO COMPORTAMENTO A
FADIGA DO AÇO SAE 4140**

Relatório de Estágio II, apresentado como requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Mecânica na Universidade de Caxias do Sul.
Supervisor: Prof. Dr. Alexandre Vieceli.

CAXIAS DO SUL

2014

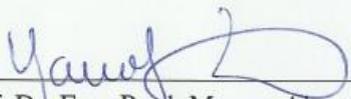
DANIEL FRANCISCO BRISTOT

**INFLUÊNCIA DO CLADDING DE INCONEL® 625 NO COMPORTAMENTO A
FADIGA DO AÇO SAE 4140**

Relatório de Estágio II, apresentado como
requisito parcial à conclusão do curso de
Engenharia Mecânica na Universidade de Caxias
do Sul.

Aprovado(a) em 09 / 06 / 2014

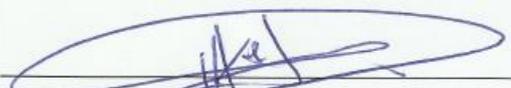
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Eng. Prof. Marcos Alexandre Luciano
Coordenador de Estágio II / Universidade de Caxias do Sul



Prof. Dr. Eng. Civil Alexandre Vieceli
Supervisor de estágio / Universidade de Caxias do Sul



Prof. Me. Eng. Metalúrgica Victor Hugo Velazquez Acosta
Professor avaliador / Universidade de Caxias do Sul



Prof. Dr. Eng. Mecânica Leandro Luís Corso
Professor avaliador / Universidade de Caxias do Sul

Dedico este trabalho as pessoas mais importantes em minha vida, minha mãe Marta e meu pai João que permitiram que este sonho se realizasse.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente gostaria de agradecer ao meus parentes, em especial minha adorável mãe Marta Lúcia Bristot e a meu pai João Carlos Bristot. Eles estiveram junto comigo em todos os momentos e sempre me apoiaram em minha educação, sem eles eu não estaria concluindo mais uma etapa de minha vida.

Gostaria também de agradecer a Deus, Jesus e a minha santinha Nossa Senhora de Caravaggio, que são meus pilares espirituais, pois sempre quando eu começa a esmorecer eles me erguia com mais força ainda.

À todos os meus amigos, que quase sempre (riso) entenderam quando não podia sair ou confraternizar pois estava estudando ou escrevendo este trabalho. Também sempre me apoiaram nos momentos que precisei.

Ao professor Alexandre Vieceli, uma grande expiração de profissional, que me ajudou na construção do meu conhecimento e soube me guiar espetacularmente para a criação deste trabalho.

Aos professores membros de minha banca, Victor Hugo Velazquez e Leandro Corso, que foram muito felizes em suas observações para tornar este trabalho o melhor possível.

À empresa Weatherford ind. E Com. LTDA que propiciou que uma idéia saísse do papel e virasse resultados reais, empresa que me ajudou desde o início de meu curso de graduação até hoje.

Ao meu orientador na empresa o engenheiro Fernando Galiotto que sempre soube disser os comentários corretos e pertinentes e me apoiou no desenvolver deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos Rafael de Matos Soares, Francis Dálmas, Lucas N. Almeida que sempre me apoiaram durante todo este percurso.

Ao meu colega Luan de Souza, Lourival de Oliveira e Willian de Oliveira que me ajudaram na fabricação de meus corpos de prova e liberação dos mesmos para este trabalho, assim como no apoio no momento da escolha do assunto.

À todos os funcionários da empresa Weatherford que me auxiliaram de maneira direta ou indireta na realização deste trabalho assim como em minha formação profissional.

À Universidade de Caxias do Sul e ao Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, pela disponibilização de laboratórios e equipamentos.

Enfim gostaria de agradecer a todos que estiveram presentes em minha vida e que foram de muito auxílio na elaboração deste trabalho. Obrigado.

*“No que diz respeito ao empenho,
ao compromisso, ao esforço, à
dedicação, não existe meio termo.
Ou você faz uma coisa bem feita
ou não faz.”*
Ayrton Senna

RESUMO

A exploração de petróleo em meios cada vez mais agressivos, ácidos, com presença de gases dissolvidos no óleo produzido, além da exposição a cloretos por meio da água salina, exigem constante desenvolvimento de materiais e processos de revestimentos superficiais para que os componentes utilizados na indústria possuam grande resistência à corrosão ou abrasão. O revestimento cladeado, ou *cladding* por soldagem, vem sendo uma solução muito utilizada por empresas para reduzir o custo na produção de equipamentos, não sendo necessária a utilização de ligas resistentes a corrosão como material constituinte de toda peça. Deste modo, aplica-se apenas uma fina camada de um material mais nobre em um material substrato que atenderá as propriedades mecânicas do equipamento, na região de contato com o meio. Devido a grande utilização de revestimentos cladeados em equipamentos submetidos a esforços cíclicos, o presente trabalho teve como objetivo a avaliação da influência do revestimento soldado de Inconel 625, em corpos de prova em aço SAE 4140 com alívio de tensões. Esta avaliação foi possível pela geração das curvas S-N para cada condição além da realização de ensaios de tração, geração do perfil de microdureza e análise metalográficas. Ficou constatado por meio do presente trabalho que o cladeamento pelo processo SMAW reduziu a resistência à fadiga de corpos de prova em até 37% mesmo este processo tendo os mais altos controles.

Palavras-chaves: Cladeamento. Fadiga. Inconel 625. Óleo e gás.

ABSTRACT

The exploration of oil in aggressive environments, acids, with gas dissolved between the petroleum, beyond the chlorides exposure through sea water, require constant development of materials and surfaces coatings process for that components used in the industry have a greater corrosion resistance or a wear resistance. The cladding, or weld overlay, have been a solution much used for companies to reduce the manufacturing equipment costs, it doesn't be necessary the use of corrosion resistance alloy like a raw material. Thus, it is applies a thin layer of a material noble into a substrate material that will meet the mechanical properties of the component, with environment contact. Because the large application of cladding in pieces that are subjected cyclic efforts, the present study had the main objective evaluation of weld overlay (Inconel 625) influence in SAE 4140 steel specimens, with a residual stress treatment. That evaluation was done by generating S-N curves to each condition, also the traction test, microhardness profile and metallographic analysis. It was demonstrated through this work that the cladding by SMAW process reduced in 37% the fatigue life of specimens even this process with the highest controls.

Keywords: Cladding. Fatigue. Inconel 625. Oil and gas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Número de peças c/ cladeadas ao longo dos anos na Weatherford Caxias do Sul...	15
Figura 2 - Micrografia óptica de precipitação de carbonetos e fase de Laves no Inconel 625	19
Figura 3 - Processo de cladeamento por solda	20
Figura 4 - Esquema processo de cladeamento por explosão.....	21
Figura 5 - Micrografia de uma peça cladeada por extrusão.....	21
Figura 6 - Processo de cladeamento por laminação.....	22
Figura 7 - Modelo numérico para determinação de tensões residuais em juntas soldadas	25
Figura 8 - Efeito de tensões residuais na tensão média.....	26
Figura 9 - Curva SN utilizada na indústria petrolífera.....	27
Figura 10 - Curvas S-N na comparação de materiais	28
Figura 11 - Corpos de prova de tração com cladeamento.....	31
Figura 12 - Corpo de prova para ensaio de fadiga por flexão-rotativa	31
Figura 13 - Sentido de deposição de material por soldagem.....	32
Figura 14 - Fluxograma de atividades.....	34
Figura 15 - Perfil de dureza amostra sem alívio de tensões	37
Figura 16 - Perfil de dureza amostra com alívio de tensões.....	37
Figura 17 - Metalografia CP sem alívio Nital 2%	38
Figura 18 - Metalografia CP sem alívio Kallings.....	39
Figura 19 - Metalografia CP com alívio	39
Figura 20 - Resultado ensaio de tração	40
Figura 21 - Fratura corpos de prova de tração.....	41
Figura 22 - Curva S-N do material substrato	42
Figura 23 - Curvas S-N finais.....	43
Figura 24 - Certificado da matéria-prima utilizada na confecção dos corpos de prova	50
Figura 25 - Especificação de procedimento de soldagem Cladeamento.....	51
Figura 26 - Relatório ensaio de tração 1	52
Figura 27 - Relatório ensaio de tração 2	53
Figura 28 - Ensaio de tração substrato.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço SAE 4140.....	17
Tabela 2 – Propriedades mecânicas do SAE 4140 temperado e revenido.	17
Tabela 3 – Composição química do Inconel 625.....	18
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do Inconel 625 recozido.....	19
Tabela 5 – Distribuição dos corpos de prova para ensaio tração.....	30
Tabela 6 – Parâmetros de soldagem.....	32
Tabela 7 – Listagem de principais equipamentos utilizados	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
API	<i>American Petroleum Institute</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CP	Corpo de prova
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>
EPS	Especificação de procedimento de soldagem
GMAW	<i>Gas metal arc welding</i>
GTAW	<i>Gas tungsten arc welding</i>
N	Número de ciclos em um ensaio de fadiga.
NACE	<i>National Association of Corrosion Engineers</i>
S	Tensão
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SAW	<i>Flux-cored arc welding</i>
SMAW	<i>Shield metal arc welding</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTÁGIO	14
1.2. APRESENTAÇÃO DO AMBIENTE DE ESTÁGIO	15
1.3. JUSTIFICATIVA	15
1.4. OBJETIVOS.....	16
1.4.1. Objetivo geral	16
1.4.2. Objetivos específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. MATERIAIS E SUAS APLICAÇÕES.....	17
2.1.1. Subtrato	17
2.1.2. Material de adição	18
2.2. CLADEAMENTO	20
2.2.1. Conceituação e formas	20
2.2.2. Cladeamento por soldagem ou fusão	22
2.2.2.1. Cladeamento por soldagem: processo SMAW	24
2.2.3. Tensões residuais no cladeamento e alívio de tensões	24
2.3. FADIGA.....	26
2.3.1. Fadiga em componentes soldados e cladeados	26
2.3.2. Fadiga na indústria petrolífera	27
3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	30
3.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	30
3.1.1. Corpos de prova	30
3.1.2. Processo de cladeamento e ciclos térmicos	32
3.1.3. Equipamentos	33
3.2. METODOLOGIA.....	33
3.2.1. Ensaio	34
3.2.2. Organização dos dados e resultados	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1. ENSAIO DE MICRODUREZA E METALOGRAFIA	36
4.1.1. Ensaio de microdureza vickers	36
4.1.2. Análise metalográfica	37

4.2.	ENSAIO DE TRAÇÃO	40
4.2.1.	Resultados ensaio de tração	40
4.2.2.	Análise da fratura	41
4.3.	ENSAIO DE FADIGA.....	41
4.3.1.	Ensaio de fadiga: substrato	42
4.3.2.	Ensaio de fadiga: corpo de prova cladeado.....	43
5.	CONCLUSÕES	45
	REFERÊNCIAS.....	47
	ANEXO A.....	50
	ANEXO B.....	51
	ANEXO C.....	52

1 INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTÁGIO

Baseado no aumento na demanda de equipamentos, principalmente nas indústrias de Óleo e Gás, e no conseqüente aumento da agressividade dos meios em que estas aplicações estão inseridas, muitos pesquisadores e engenheiros estão buscando soluções em materiais que antes, em poucas aplicações, eram necessárias (PFINGSTAG, SCHROEDER e MÜLLER, 2006).

Um grande exemplo é a utilização das chamadas superligas, às quais, segundo Callister (2008), apresentam combinações superlativas de propriedades, que lhes garante grande resistência ao meio em que são aplicadas. Estes materiais são normalmente classificados conforme o elemento predominante em sua liga, como principal exemplo das mesmas cita-se as superligas a base de níquel. As superligas, principalmente as de níquel (Inconel 625 e Inconel 718) são empregadas principalmente em equipamentos da indústria petroquímica, nuclear ou de turbinas (KULKA et al., 2013).

O material Inconel® 718* utilizado em componentes de turbina e de reatores nucleares possui excelente resistência à corrosão, elevadas propriedades mecânicas, bem como grande resistência à fadiga, tanto em elevadas como em baixas temperaturas (BYUN e FARRELL, 2003).

Entretanto, a confecção de componentes totalmente em uma superliga torna-se uma solução de custo elevado, que em determinados projetos pode inviabilizar sua manufatura. A fim de aliar à resistência à corrosão com um custo reduzido é que foram desenvolvidos processos de proteção superficial para atender os segmentos industriais citados anteriormente. Dentre os que mais se destacam é o processo de cladeamento (*cladding*), que basicamente consiste na deposição via fusão ou explosão, de uma pequena espessura de um material resistente à corrosão em um material base (substrato) de menor custo. Assim, propicia-se um diferencial econômico mais atrativo, devido a menor utilização de um material de custo elevado (GENTIL, 2011; RAJANI, MOUSAVI e SANI, 2012).

Tendo como foco o processo de cladeamento por fusão, para este caso podendo ser chamado de *weld overlay*, este trabalho analisou a sua influência no comportamento mecânico, em especial a vida em fadiga, de um material base (substrato) SAE 4140 cladeado com a liga de níquel Inconel® 625* através do processo SMAW, o qual é empregado em equipamentos para a indústria petrolífera ou vasos de pressão.

*Inconel® 625 e Inconel® 718 são marcas registradas da Special Metals do grupo PCC Company.

1.2. APRESENTAÇÃO DO AMBIENTE DE ESTÁGIO

A empresa onde este estágio foi realizado é a Weatherford International INC. Empresa de origem estadunidense, com matriz sediada em Genebra na Suíça, tendo como foco equipamentos e serviços para a perfuração, completação, produção e intervenção de poços de petróleo ou gás, tanto em terra (*Onshore*) como em meio submarino (*Offshore*).

A Weatherford possui aproximadamente 60 mil colaboradores, distribuídos em mais de 100 países. No Brasil ela possui três plantas de manufatura (Caxias do Sul, São Leopoldo e Duque de Caxias), seis bases de serviços e mais cinco centros administrativos com sede na cidade do Rio de Janeiro.

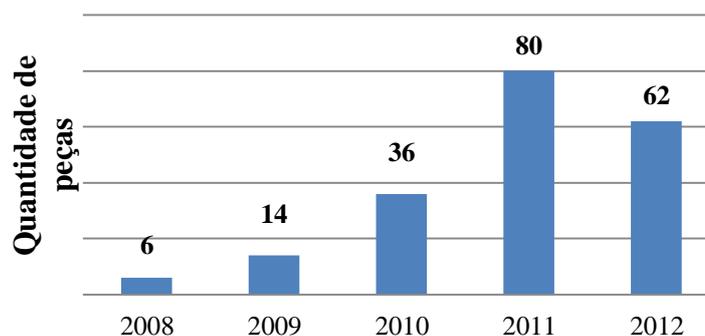
A filial onde este presente estágio foi desenvolvido é a planta de Caxias do Sul, onde são fabricados equipamentos para completação, perfuração e operações submarinas de poços de petróleo. Sendo este último à linha de negócios onde o emprego do cladeamento com Inconel 625 é mais utilizado.

1.3. JUSTIFICATIVA

Devido à necessidade de desenvolvimento de novos materiais e processos, a utilização de revestimentos metálicos como o cladeamento, torna-se uma solução interessante para meios onde à resistência à corrosão é uma necessidade, além da redução de custos de manufatura.

A Figura 1 é um gráfico gerado por este autor na empresa Weatherford, onde se pode verificar a quantidade de peças produzidas a partir do ano de 2008 que possuem em algum momento de sua etapa produtiva o processo de cladeamento com Inconel 625. Percebe-se nele um aumento de mais de 100% no número de peças que possuem o revestimento metálico no ano de 2010 em relação a 2009.

Figura 1- Número de peças c/ cladeadas ao longo dos anos na Weatherford Caxias do Sul



Fonte: Autor.

Devido ao crescimento considerável na utilização deste revestimento metálico, a compreensão dos parâmetros do processo, suas limitações, seus benefícios e especialmente a sua influência nas propriedades mecânicas do material, tornam-se um grande diferencial estratégico tanto para os técnicos como para a indústria.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo geral

Identificar e compreender o comportamento da vida em fadiga de corpos de prova em material base AISI 4140 cladeados com a liga de níquel Inconel 625.

1.4.2. Objetivos específicos

Para atender ao objetivo geral do trabalho, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) identificar e compreender os parâmetros do processo de cladeamento por soldagem SMAW;
- b) compreender a influência das etapas do processo de cladeamento, como exemplo o alívio de tensões, nas propriedades mecânicas finais dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração e de microdureza Vickers; e
- c) compreender o processo de geração de curvas de fadiga S-N para corpos de prova cladeados e apenas com material substrato, por meio de ensaios experimentais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MATERIAIS E SUAS APLICAÇÕES

2.1.1. Subtrato

Conforme Gentil (2011), o material substrato no cladeamento tem a função de prover as propriedades mecânicas necessárias para o melhor funcionamento de um determinado componente. No caso específico deste trabalho, o substrato estrutural será o aço baixa liga SAE 4140.

O material SAE 4140, de acordo com SAE (1997), é um aço baixa liga denominado aço cromo-molibdênio. Na tabela 1 pode-se verificar a composição química por norma deste material.

Tabela 1 – Composição química do aço SAE 4140.

Composição química (%)							
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
Min.	0,38	0,75	< 0,030	<	0,15	0,80	0,15
Máx.	0,43	1,00		0,040	0,35	1,10	0,25

Fonte: Adaptado SAE Ferrous material standards manual (1997).

Devido aos elementos constituintes da liga predominantes, este aço apresenta boa resistência mecânica (CHIAVERINI, 2008).

Na tabela 2, como exemplo, verificam-se as propriedades mecânicas do material SAE 4140 submetido ao tratamento térmico de têmpera e revenimento (temperatura mínima de revenimento 566°C). É visto por esta tabela que o material apresenta uma elevada resistência à tração aliada a uma ductilidade que o qualificam para ser utilizado na indústria de equipamentos para exploração de petróleo.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do SAE 4140 temperado e revenido.

Limite de resistência a tração (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Redução de área (%)
665	552	20	45
793	737,5	--	--

Fonte: Weatherford.

Conforme Dalcin (2012), o processo de soldagem do material SAE 4140 apresenta dificuldades principalmente pelo alto carbono equivalente. Por este motivo e pelo fato deste

material ser um aço temperável, quando exposto ao processo de soldagem e ao resfriamento rápido é gerado em sua estrutura a martensita. Sendo então necessário o seguimento de etapas para evitar falhas no processo, estas etapas são a realização de um pré-aquecimento antes e alívio de tensões após o processo de soldagem. Ambas as etapas devem ser devidamente controladas e necessariamente devem estar registradas na especificação do procedimento de soldagem (EPS).

2.1.2. Material de adição

O Inconel 625, ou conforme norma *Unified Numbering System*, UNS N06625, é uma superliga de níquel que combina uma alta resistência à tração com excelentes características de fabricação (melhor usinabilidade comparado a outras ligas de níquel). Muito utilizada na indústria petroquímica, aeroespacial e nuclear, apresenta uma excelente resistência à corrosão, elevada resistência mecânica além de reduzir o crescimento de trincas ou fissuras devido aos mecanismos de corrosão (SHANKAR et al., 2000).

Na tabela 3 são indicados os elementos que compõem essa liga de níquel, que de acordo com ASTM B444 (1998) pode ser denominada uma liga de níquel-cromo-ferro. Verifica-se pela composição química que esta liga possui grandes porcentagem do elemento cromo.

Tabela 3 – Composição química do Inconel 625.

Composição química (%)											
Ni	Cr	Fe	Mo	Al	C	Nb+Ta	Si	S	P	Ti	Mn
Bal.	20	<	8	<	<	3,15	<	<	<	<	<
	23	5	10	0,4	0,1	4,15	0,5	0,15	0,15	0,4	0,5

Fonte: Adaptado da norma ASTM B444 (1998)

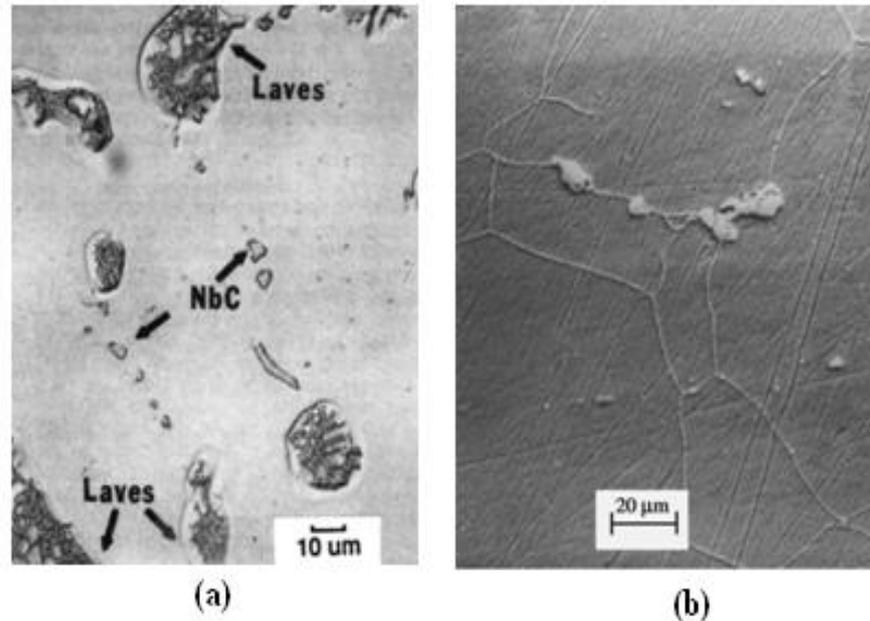
Graças a grande resistência à corrosão, principalmente em ambientes ricos em soluções ácidas e em ambientes com elevadas temperaturas, o Inconel 625 vem sendo utilizado em grande escala como material de adição em peças cladeadas (ALBUQUERQUE et al., 2012).

Entretanto, a soldagem desta liga de níquel sem as devidas precauções pode acarretar em falhas, como por exemplo, aparecimento de trincas por solidificação (ALBUQUERQUE et al., 2012).

Conforme Albuquerque (2012), no processo de soldagem do Inconel® 625 outra falha dependente do processo é a precipitação de grandes carbonetos primários (ver Figura 2 a) ou

da fase de Laves (ver Figura 2 b). Estes precipitados na região intergranular reduzem a resistência à corrosão do material, bem como sua resistência mecânica.

Figura 2 - Micrografia óptica de precipitação de carbonetos e fase de Laves no Inconel 625



Fonte: Adaptado de Albuquerque et al. (2012) e Dupont et al. (2009).

Apesar do cuidado que se torna necessário na soldagem do Inconel 625, a sua utilização ainda é estratégica. Por exemplo, a utilização desta liga de níquel em plataformas *offshore*, garante uma excelente resistência à corrosão por pite (COOPER, SLEBONDNICKB e THOMASB, 1996). Por este motivo, o número de manutenções realizadas torna-se menor e conseqüentemente, o custo operacional é reduzido.

Outra característica marcante deste material é sua resistência mecânica, como pode ser visualizado na tabela 3, tendo seu limite de resistência a tração na faixa dos 827 MPa e seu alongamento de aproximadamente 30%, propiciando uma boa integridade estrutural a componentes confeccionados com este material.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do Inconel 625 recozido.

Limite de resistência a tração (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
827	414	30

Fonte: Adaptado da norma ASTM B444 (1998)

2.2. CLADEAMENTO

2.2.1. Conceituação e formas

Conforme Robinson (2010), a fabricação de componentes em aço ao carbono cladeados vem se tornando uma prática comum em indústrias, quando a resistência mecânica e a resistência à corrosão são preocupações, por propiciar um aspecto econômico mais atrativo em comparação com a fabricação do mesmo componente totalmente em superliga, por exemplo.

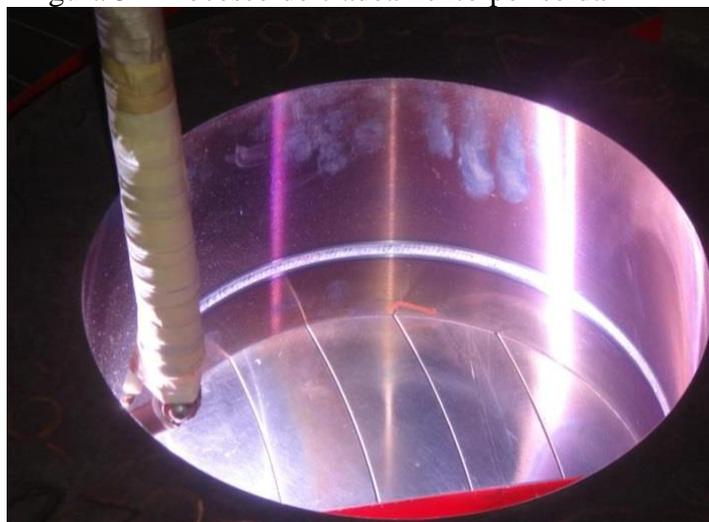
O cladeamento, do inglês *cladding*, é um revestimento superficial, onde é depositada uma pequena espessura de material com elevada resistência à corrosão ou resistência ao desgaste, em um substrato de menor valor agregado (PALANI e MURUGAN, 2006).

De acordo com Robinson (2010), o cladeamento é um revestimento que pode ser aplicado de diversas formas:

- a) soldagem ou fusão;
- b) explosão;
- c) extrusão; e
- d) laminação à quente.

Ainda, segundo Robinson (2010), atualmente a forma de cladeamento que permite uma maior flexibilidade produtiva é o cladeamento por soldagem. Sendo este processo visualizado na Figura 3, onde uma peça é revestida com um material de adição por meio de um arco elétrico, fundindo o material de adição na superfície do substrato.

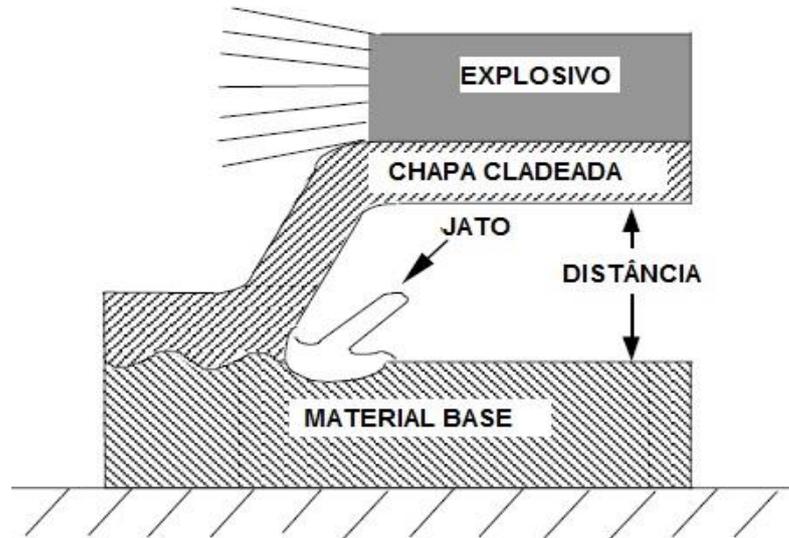
Figura 3 - Processo de cladeamento por solda



Fonte: Adaptado de Cantarin e Das Neves (2011).

Na Figura 4, pode-se visualizar esquematicamente o processo de cladeamento por explosão, processo que já é utilizado desde os anos de 1950 no revestimento principalmente de chapas, onde a onda de choque gerada por uma carga explosiva resultará na união de dois ou mais materiais, sendo este também um processo fortemente utilizado (NOBILI, 1999).

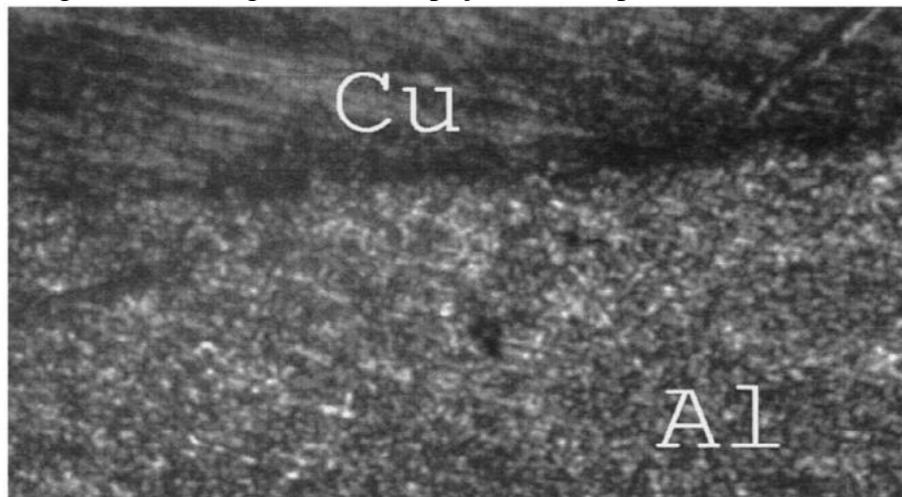
Figura 4 - Esquema processo de cladeamento por explosão.



Fonte: Adaptado de Nobili (1999).

O cladeamento por extrusão, conforme MAMALIS et al. (1998), é um processo de cladeamento em que um material de adição deverá ser extrudado em um material base, por este motivo é um processo utilizado em materiais não ferrosos como por exemplo a união entre um tubo de alumínio com uma superfície de cobre (ver Figura 5).

Figura 5 - Micrografia de uma peça cladeada por extrusão.

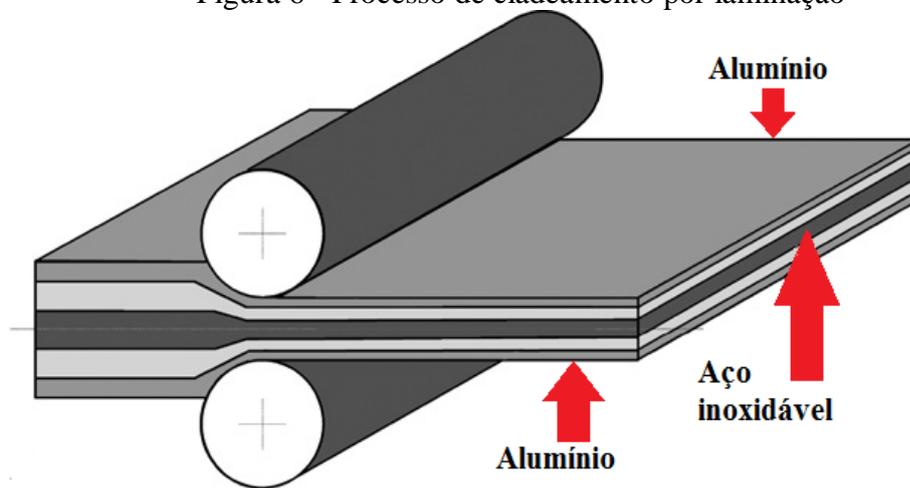


Fonte: Adaptado de Mamalis et al (1998).

Para a fabricação de materiais conjugados, ou “sanduíches” metálicos na forma de chapas, de modo a alcançar elevada resistência à corrosão aliada à alta resistência mecânica, pode-se utilizar o cladeamento por laminação. É um processo onde duas ou mais chapas de materiais diferentes são passadas por rolos laminadores, assim atribuindo as características necessárias para aplicação.

Um exemplo deste processo são chapas de aço inoxidável cladeadas com alumínio, utilizado na indústria aeroespacial (KANG et al., 2007). Na Figura 6 visualiza-se o cladeamento por laminação de uma maneira esquemática.

Figura 6 - Processo de cladeamento por laminação



Fonte: Adaptado de Kang et al (2007).

2.2.2. Cladeamento por soldagem ou fusão

O cladeamento por soldagem (fusão), do termo em inglês *weld overlay*, por definição é o revestimento de um componente metálico através da fusão de um material de adição também metálico. É caracterizado como um excelente processo de fabricação onde há o incremento de propriedades que apenas com o material de base não seria possível (RAO, REDDY e NAGARJUNA, 2010).

Ainda conforme Rao et al (2010), para o cladeamento de componentes utilizam-se os processos convencionais de soldagem como: eletrodo revestido (SMAW), arco submerso (SAW), eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (GTAW), proteção gasosa e eletrodo metálico (GMAW) entre outras. Normalmente, a camada depositada é pequena, na média de três mm.

A seleção do melhor processo para deposição dependerá de alguns parâmetros como: tamanho da região cladeada, acesso do equipamento ou soldador, materiais, espessura da camada, limites de composição química, posição de soldagem e acessibilidade para ensaios não destrutivos. Portanto, para o cladeamento são qualificados procedimentos de soldagem conforme a norma ASME IX, e se o objetivo do cladeamento é a resistência à corrosão a qualificação deverá estar conforme as normas NACE MR01-75 e API 6A (ROBINSON, 2010).

Outro parâmetro que se deve levar em consideração no cladeamento, principalmente, em componentes que estarão submetidos a um meio ácido, é a diluição de elementos. Por exemplo, em componentes de uma plataforma offshore com o cladeamento de Inconel 625, a diluição do ferro na camada aplicada deve ser controlada, estando na faixa de 5% a 10%. Esta diluição de ferro é devido ao material de adição, e se não for controlada, com uma porcentagem acima de 10%, há a precipitação de fases ricas em ferro na matriz da liga de níquel e estes precipitados podem gerar problemas no comportamento a corrosão do equipamento (SMITH, 2012).

Para poder controlar melhor os parâmetros envolvidos na soldagem, foram desenvolvidos os processos automatizados, ou seja, a utilização de um robô controlando a tocha, corrente e tensão. E estes processos são os que oferecem, normalmente, uma melhor taxa de deposição e qualidade do revestimento soldado, além de serem utilizados em posições e acessos onde é impossível colocar um soldador, como revestir o diâmetro interno de pequenas tubulações (ROBINSON, 2010).

Como um exemplo destes processos automatizados, segundo Smith (2012), pode-se citar o GTAW aliado ao material de adição previamente aquecido (*hot wire*) recomendado em soldagem com diversas camadas, passes, devido ao menor aporte térmico na peça e menor geração de tensões residuais.

Outro método de revestimento que não precisa necessariamente da fusão do material substrato, apenas do material de adição, é o cladeamento a laser conforme Ganesh et al. (2010) trata-se da emulsão, injeção, do material de adição na região de interesse e antes do mesmo entrar em contato com o substrato, ele é bombardeado por um feixe de laser, de modo a fundir o material de adição e este material liquefeito é aderido ao material substrato.

De acordo com Alam et al. (2012) este método garante um menor aporte térmico ao material substrato, por não haver a fusão do mesmo, portanto há reduções nas distorções da peça cladeada além da susceptibilidade à trincas na região de termicamente afetada.

2.2.2.1. Cladeamento por soldagem: processo SMAW

Conforme Robinson (2010), os processos automatizados vêm sendo desenvolvidos e há o aumento em sua utilização, entretanto os processos manuais ainda são utilizados pela indústria petrolífera para o revestimento cladeado. Processos manuais como, com eletrodo revestido (SMAW), possuem diversos parâmetros que devem ser analisados no momento de qualificar um procedimento ou efetuar o revestimento.

Segundo Wainer, Brandi e De Mello (2010), dois parâmetros ou variáveis são de fundamental importância: corrente e velocidade de avanço. A corrente no processo de soldagem por eletrodo revestido é o parâmetro determinante na taxa de deposição, além de ser o principal controle na penetração da solda. Utilizando-se uma corrente positiva ou inversa aumentasse a penetração da solda, por outro lado utilizando-se de uma polaridade negativa diminui-se a penetração e aumenta a largura da poça de fusão, outro efeito da corrente é o reforço da solda.

Ainda conforme Wainer, Brandi e De Mello (2010), a altura e largura do cordão variam inversamente com a velocidade de avanço no processo de soldagem por eletrodo revestido. A sua implicação é que a energia no processo pode ser mantida reduzida mesmo utilizando-se altas correntes e através do uso de altas velocidades de avanço. Tanto a velocidade de avanço como a corrente, se adequadamente dimensionadas, garantem as características necessária ao cladeamento como baixa penetração, baixa diluição e grande largura do cordão.

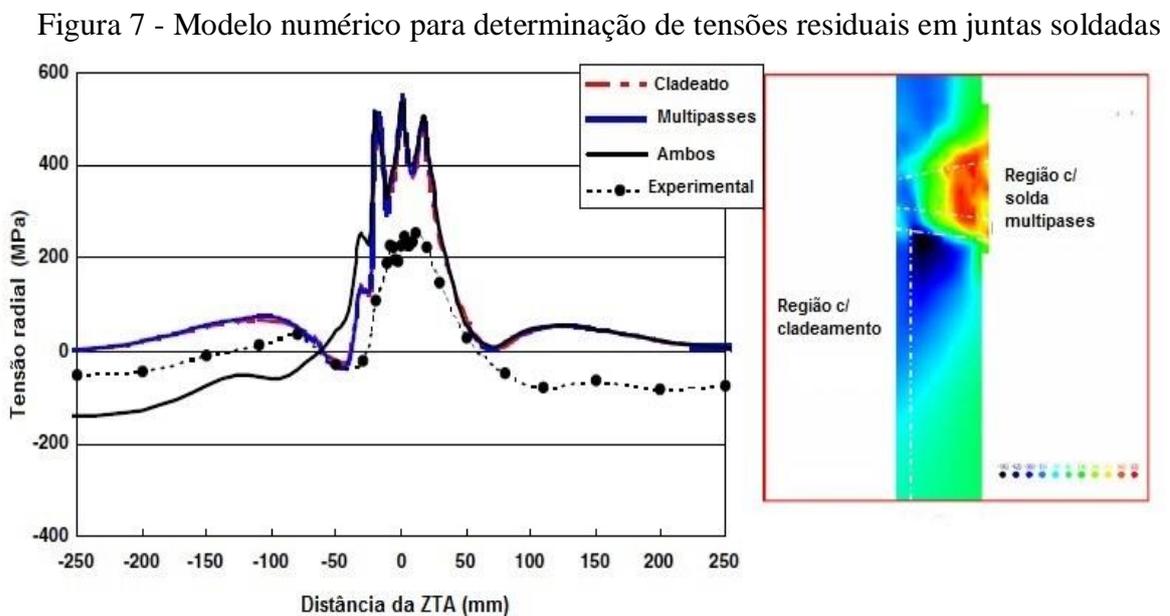
2.2.3. Tensões residuais no cladeamento e alívio de tensões

De acordo com Wainer et al (2010), os ciclos térmicos do processo de cladeamento ou soldagem, podem gerar fenômenos indesejados: deformações residuais e o consequente aparecimento de tensões residuais na região soldada. As tensões residuais podem ser indesejáveis, pois estão ligadas a propagação de trincas, corrosão sob tensão além de influenciar na vida em fadiga do componente soldado.

A tensão residual depende muito da resistência que a região soldada oferece para deformar ou distorcer de tal maneira que reduza as tensões geradas durante o processo de soldagem (WAINER, BRANDI E DE MELLO, 2010). De modo que pesquisas na determinação destas tensões estão sendo desenvolvidas, como exemplo podemos citar a pesquisa de Deng et al (2009), que por meio da utilização de um modelo numérico de

elementos finitos determinaram as tensões residuais em juntas soldadas e cladeadas ambos os ensaios considerando-se o processo de soldagem por eletrodo de tungstênio (GTAW).

Como pode ser visto na Figura 7, tem-se um gráfico onde o eixo das ordenadas é a tensão radial, componente da tensão no sentido do raio do corpo de prova cilíndrico, sendo a tensão de maior interesse neste estudo e no eixo das abscissas tem-se a distância da zona termicamente afetada para as extremidades dos diversos corpos de prova. Nele percebem-se picos de tensão na região da ZTA igual a zero, caracterizando regiões com a presença de tensões residuais em corpos de prova apenas cladeados (linha vermelha), com soldagem multipasses (linha azul), multipasses e cladeado (linha preta) e a medição experimental (pontilhado).



Fonte: Adaptado de Deng et al (2009).

De modo a reduzir possíveis falhas por tensões residuais, segundo Smith (2012), componentes cladeados normalmente passam por um tratamento térmico de alívio de tensões, de modo a não afetar a resistência à corrosão da zona termicamente afetada e reduzir as tensões impostas pelo processo de cladeamento. Para substratos de aço carbono ou baixa liga revestidos com liga níquel Inconel 625, a temperatura de alívio de tensões recomendada para que não haja a precipitação de carbonetos é de 580°C a 620°C, mantendo a temperatura de homogeneização por aproximadamente 20 horas.

2.3. FADIGA

2.3.1. Fadiga em componentes soldados e cladeados

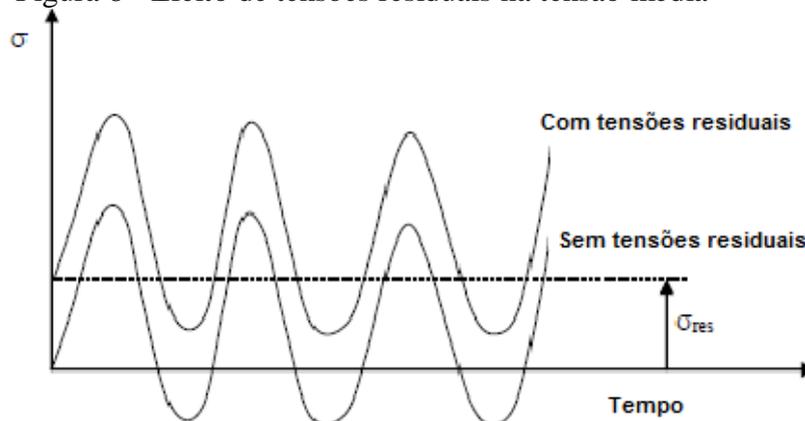
Conforme Lassen e Recho (2006), a fadiga pode ser definida como “... dano acumulado no material através de tensões e deformações cíclicas...”. Ainda segundo os autores, um estudo realizado pela Health and Safety Executive, do Reino Unido, listou as principais causas de danos estruturais no mar do norte no período de 1974 a 1992, sendo a fadiga a causa de 25% dos danos estudados.

A fadiga é influenciada pela: natureza da carga cíclica, a geometria do componente, as características dos materiais (no caso da soldagem), tensões residuais decorrentes do processo de fabricação do componente, acabamento superficial do componente e pelo ambiente ou meio em que o mesmo atua. Estes fatores podem aumentar ou diminuir a vida à fadiga do componente. Como exemplo, testes em laboratórios já constataram um decréscimo de 3 a 5 vezes da vida em fadiga de um determinado componente apenas modificando o meio em que o mesmo trabalha (LASSEN e RECHO, 2006).

Em componentes soldados, ainda conforme Lassen e Recho (2006), a redução da vida em fadiga decorrente do processo de soldagem deve-se normalmente a três fatores:

- Concentração de tensões na região da solda, como por exemplo, cantos-vivos;
- presença de inclusões ao longo da linha de fusão; e
- acúmulo de tensões residuais trativas na região de solda, cujo efeito pode ser visualizado na Figura 8, onde há um gráfico esquemático Tensão x tempo. Este acúmulo de tensões (σ_{res}) acaba elevando a tensão de todo componente ou região analisada.

Figura 8 - Efeito de tensões residuais na tensão média



Fonte: Adaptado de Lassen e Recho (2006).

2.3.2. Fadiga na indústria petrolífera

Na indústria petrolífera, os dois principais órgãos fiscalizadores e responsáveis pela normalização é a API (*American Petroleum Institute*) e a DNV (*Det Norsk Veritas*), cuja responsabilidade é recomendar as melhores práticas no setor de óleo e gás.

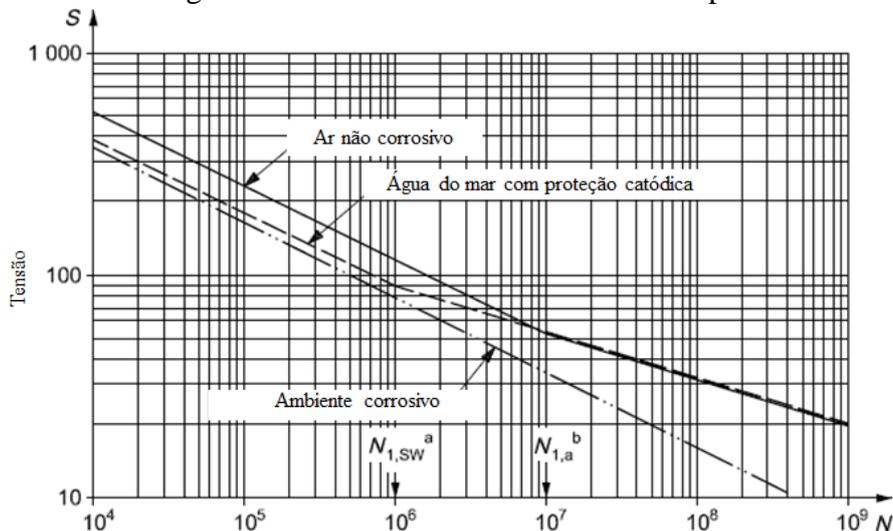
De modo a garantir a integridade estrutural da coluna de equipamentos em um poço de petróleo, a norma API 17G (2011), recomenda que seja elaborado um estudo do comportamento a fadiga de pontos ou componentes que possuem maiores riscos de propagação de trincas. Destacam-se os equipamentos cladeados ou uniões soldadas, de modo a evitar danos catastróficos.

A API, através de sua norma API 17G (2011), considera como estudos de validação de um equipamento ou coluna de petróleo, os seguintes métodos:

- a) Curvas S-N e estudo de dano acumulado conforme regra de *Palmgren-Miner*;
- b) métodos baseados nos conceitos de mecânica da fratura e controle de crescimentos de trincas; e
- c) testes experimentais com o equipamento ou coluna propriamente dito na condição próxima a de trabalho.

Na Figura 9 visualiza-se um exemplo de curvas S-N, consideradas como as primeiras ferramentas para a determinação da vida a fadiga de equipamentos para a indústria de petróleo e por serem consideradas simples e eficazes. Para sua utilização, devem ser considerados os fatores que variam a vida em fadiga, variações que alteram diretamente os valores da curva (API 17G, 2011).

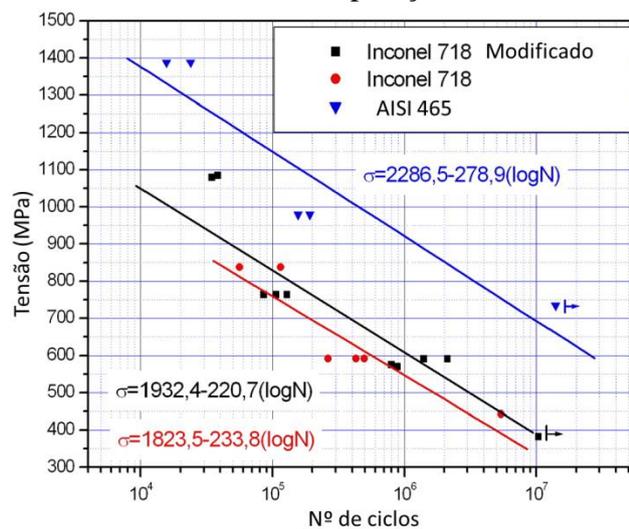
Figura 9 - Curva SN utilizada na indústria petrolífera.



Fonte: Adaptado de API 17G (2011).

Outra utilidade na indústria de petrolífera para as curvas S-N, além de validação de equipamentos é a avaliação de materiais solicitados a cargas cíclicas e em ambientes corrosivos. Conforme Badrak et al. (2013), em um trabalho de pesquisa realizado nas dependências da empresa Weatherford, foram testados e analisados o comportamento a fadiga de três diferentes materiais, o primeiro foi a liga de níquel Inconel 718, o segundo material foi um Inconel 718 com seu tamanho de grão alterado (grão aumentado) e por último como comparação o aço inoxidável AISI 465. Os resultados, ou seja, as curvas S-N podem ser visualizadas na Figura 10. No caso concluiu-se que o aço AISI 465 obteve o melhor comportamento a fadiga e a modificação no tamanho de grão resultou positivamente na vida em fadiga ao ar e relação ao Inconel 718 padrão.

Figura 10 - Curvas S-N na comparação de materiais



Fonte: Adaptado de Badrak et al. (2013),

O método complementar as curvas S-N, conforme a norma DNV-RP-C203 (2010), é o método de dano acumulado de *Palmgren-Miner* para cargas cíclicas variáveis. Onde o fator de dano acumulado é encontrado aplicando-se a equação 1, possuindo as seguintes variáveis:

D = fator de dano acumulado de *Palmgren-Miner*.

K = nº de blocos de tensões diferentes.

n_i = nº total de ciclos em um único bloco de tensões.

N_i = nº de ciclos até a falha em uma determinada tensão.

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

Se o resultado de D for igual a 1, segundo a norma DNV-RP-C203 (2010) e BUDYNAS e NISBETT (2011), a falha ocorrerá.

O método de estudo da vida em fadiga pelos conceitos de mecânica da fratura são utilizados onde pequenas trincas são toleráveis, sendo necessária a execução de diversos passos como: determinação da tensão, seleção da Lei de crescimento de trincas conforme normas BS 7910 ou API RP 579, estimar tamanho da trinca após sua detecção, determinação do tamanho final da trinca e determinação da vida em fadiga do componente considerando-se a trinca. O tamanho máximo aceitável por norma é que a profundidade seja menor que 25% da espessura da parede (API 17G, 2011).

Para o cálculo da vida em fadiga global, ou seja, da coluna de petróleo como um todo, devem-se considerar as cargas impostas pelo ambiente como o choque de ondas ou correntezas na coluna, de maneira a ser possível determinar uma frequência para a aplicação destas cargas (API 17G, 2011).

3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O presente capítulo apresenta a metodologia, equipamentos e ensaios necessários para atingir os objetivos propostos.

3.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.1.1. Corpos de prova

Os corpos de prova, tanto para os ensaios de tração como para os ensaios de fadiga por flexão-rotativa, foram confeccionados com material base SAE 4140 temperado e revenido (temperatura de 690°C) de modo a atender às propriedades mecânicas listadas na Tabela 2. O certificado de composição química da matéria-prima que originou todos os corpos de prova encontra-se no anexo A.

Foram confeccionados corpos de prova para o ensaio de tração, atendendo aos critérios da norma ASTM A370 (2009), sendo estes usinados e possuindo seção retangular.

Para a determinação das propriedades mecânicas do revestimento cladeado e análise da fratura, foram confeccionados oito corpos de provas, distribuídos em quatro condições ou processos de fabricação diferentes. Foi avaliada a influência do alívio de tensões após o processo de soldagem, além do efeito do aporte térmico nos mesmos, por meio da deposição de Inconel 625 em apenas uma face ou nas duas faces de maior área.

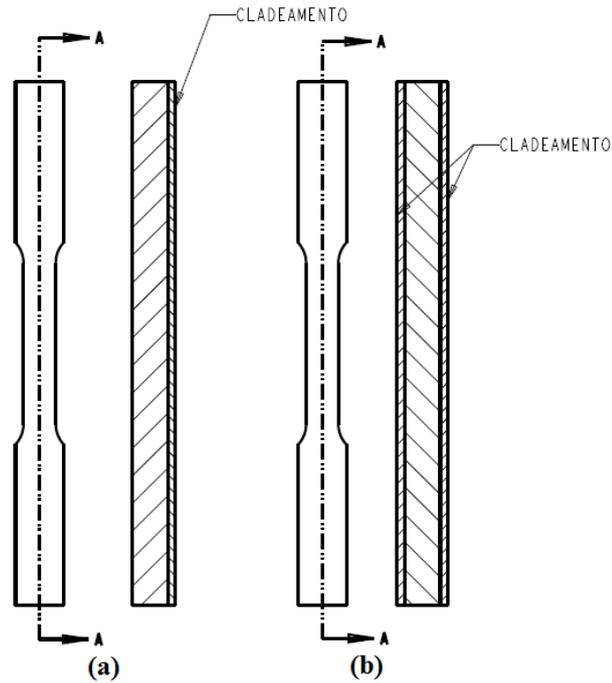
A Figura 11 mostra a geometria do corpo de prova para o ensaio de tração e as faces que receberam o material de adição, Inconel 625. O corpo de prova da Figura 11(a) representa as condições 1 e 3 descritas na Tabela 5 e corpo de prova da Figura 11(b) representa as condições 2 e 4, onde há deposição de Inconel 625 nas duas faces do corpo de prova.

Tabela 5 – Distribuição dos corpos de prova para ensaio tração

Condição	Quantidade	Nº de faces cladeadas	Alívio de tensões
1	2	1	Sim
2	2	2	Sim
3	2	1	Não
4	2	2	Não

Fonte: Autor.

Figura 11 - Corpos de prova de tração com cladeamento

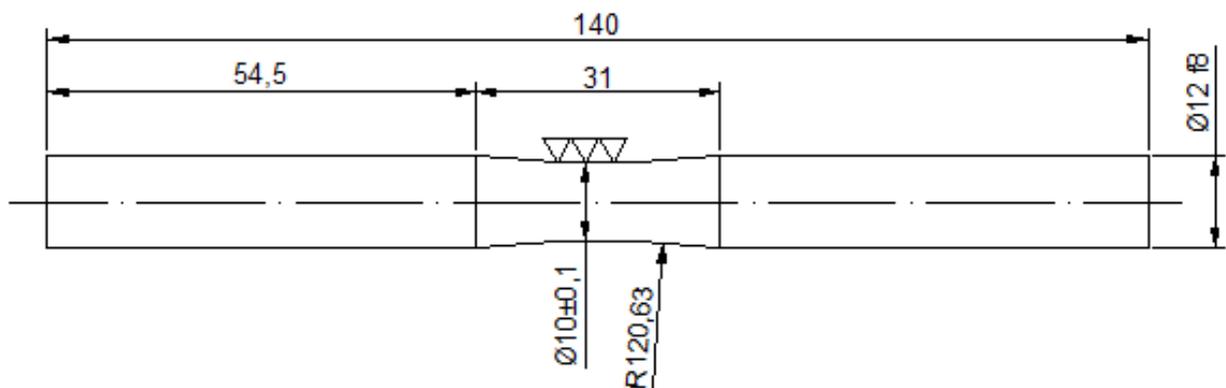


Fonte: Autor.

Para o ensaio de fadiga foram confeccionados trinta corpos de prova conforme a norma ASTM E466-07 (2007). Separados em duas condições diferentes: quinze corpos de prova apenas com o material substrato e quinze corpos de prova com revestimento cladeado de Inconel 625 com espessura de 1,5mm e posterior alívio de tensões ao processo de soldagem. Na Figura 12, pode-se visualizar o corpo de prova pronto para o ensaio de fadiga.

Os corpos de prova foram usinados em torno CNC na forma de ampulheta e posteriormente lixados de modo que o acabamento superficial não interfira no resultado.

Figura 12 - Corpo de prova para ensaio de fadiga por flexão-rotativa



Fonte: Autor.

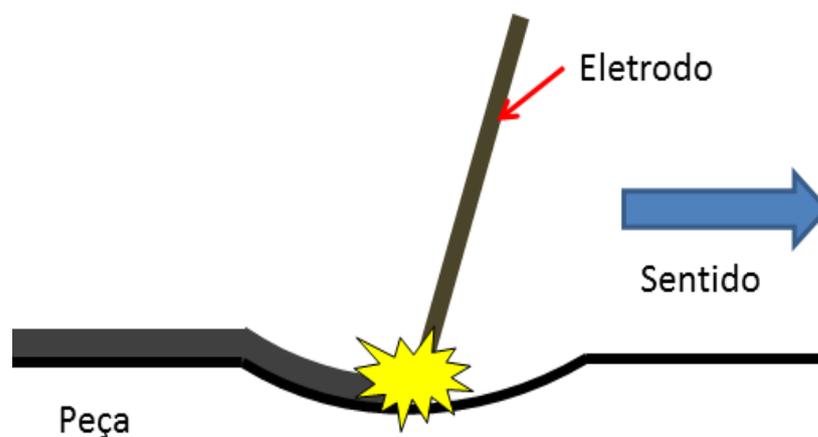
3.1.2. Processo de cladeamento e ciclos térmicos

Para o cladeamento foi utilizado o processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW). Foram utilizados eletrodos com diâmetro de 3,25 mm, material conforme norma *American Welding Society AWS A5.11/A5.11M:2005 (2005) ER NiCrMo-3*, possuindo um limite de resistência a tração de 760 MPa, tensão de escoamento de 450 MPa e porcentagem de ferro de 3%, importante para o efeito de diluição do material de adição.

A deposição de material nos corpos de prova seguiu uma EPS (Especificação de procedimento de soldagem) interna da empresa Weatherford, que se encontra no anexo B deste trabalho.

A deposição de material foi na posição horizontal conforme pode ser visualizado na Figura 13.

Figura 13 - Sentido de deposição de material por soldagem



Fonte: Autor.

Os parâmetros de soldagem do eletrodo revestido no material substrato estão indicadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros de soldagem

Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (cm/min)	Aporte térmico (kJ/cm)
85-110	26-30	≥ 16	13,81-20,63

Fonte: Weatherford EPS W1.12

A corrente utilizada foi contínua e positiva, conforme EPS W1.12, e seguindo indicação do fornecedor do consumível e a norma *AWS A5.11/A5.11M:2005 (2005)* para consumíveis classe ER NiCrMo-3 (Inconel 625).

Outro parâmetro importante no processo de soldagem controlado foi o ciclo térmico dos corpos de prova. Conforme a norma AWS D1.1 (2010) o material substrato utilizado apresenta um carbono equivalente máximo de 0,74, por este motivo e por solicitação da EPS deve-se pré-aquecer a peça a uma temperatura mínima de 150° utilizando-se resistências, maçarico ou como no presente trabalho em um forno.

No momento da soldagem, os corpos de prova permaneceram aquecidos e após o processo foram deixados para resfriar ao ar, porém envoltos em manta térmica (resfriamento lento). Os ciclos térmicos que as peças estavam submetidas foram controlados utilizando-se de pirômetro óptico.

O alívio de tensões é um processo de redução das tensões residuais do processo de soldagem (WAINER, BRANDI E DE MELLO, 2010). Para os corpos de prova foi realizado com uma temperatura de patamar (temperatura máxima) entre 620°C a 640°C por, no mínimo, 180 minutos.

3.1.3. Equipamentos

Na Tabela 7 são informados os principais equipamentos que foram utilizados, sejam para etapas de confecção dos corpos de prova, sejam para as etapas de análise de resultados.

Tabela 7 – Listagem de principais equipamentos utilizados

Etapa	Descrição
Usinagem	Torno CNC Daewoo Puma 320®
Pré-aquecimento	Forno Thermosolda modelo FM75 1950 Watts
Soldagem	Fonte de solda Miller XMT 350 MPa Auto-line
Ensaio de tração	Máquina de ensaio universal de tração cap. 200kN.
Ensaio de fadiga	Máq. Ensaio de fadiga por flexão-rotativa
Microscopia	Microscópio óptico Nikon com ampliação de 1000x
Medição de dureza	Microdurômetro Vickers Shimadzu

Fonte: Autor.

3.2. METODOLOGIA

De modo a alcançar os objetivos deste trabalho, seguiu-se o fluxograma de projeto, visualizado na Figura 14.

Figura 14 - Fluxograma de atividades



Fonte: Autor.

A primeira etapa descrita é estruturar como os resultados foram alcançados e analisados, desde a etapa de criação de corpos de prova como protótipo para testar os parâmetros iniciais, até a análise dos ensaios e a geração de uma conclusão.

3.2.1. Ensaios

Inicialmente, foram confeccionados dois corpos de prova para fadiga conforme norma ASTM E466 (2007), do tipo ampulheta cladeados com espessura de 1,5 mm de material de adição. O objetivo desta produção inicial foi gerar espécimes para o levantamento da curva de microdureza e verificar por meio de ensaio metalográfico as estruturas resultantes.

Após a confecção dos corpos de prova de validação de processo foram realizados o ensaios de microdureza Vickers no entorno entre o material substrato e o revestimento. Este ensaio foi realizado conforme recomendado pela norma API 6A (2011), tendo como objetivo a geração do perfil de dureza e a garantia que o processo de cladeamento não reduziu a dureza do substrato.

Posteriormente a este ensaio, foram confeccionados os corpos de prova para o ensaio de tração conforme norma ASTM A370 (2009). Os ensaios de tração tiveram como objetivo levantar as propriedades mecânicas dos revestimentos assim como ser a fonte para o limite de resistência à tração dos diversos corpos de prova. Esta informação foi utilizada para a determinação das cargas utilizadas no ensaio de fadiga, na análise da fratura após o ensaio, de modo a compreender o comportamento do material cladeado, e na verificação da influência do alívio de tensões no limite de resistência da peça.

Foram realizados ensaios de fadiga rotativa para corpos de prova confeccionados apenas com o material de substrato e para corpos de prova cladeados com Inconel 625 com o tratamento térmico de alívio de tensões após o processo de cladeamento, seguindo a especificação de procedimento de soldagem W1.12. O meio em que o ensaio ocorreu foi ao ar, caracterizando um meio livre de corrosão conforme a norma API 6A (2011).

3.2.2. Organização dos dados e resultados

Como resultado do ensaio de tração, conforme norma ASTM A370 (2009), foram gerados dados de força e deslocamento, bem como valor de alongamento máximo, estrição, limite de escoamento e limite de resistência à tração (ASTM A370, 2009).

Para o ensaio de fadiga, obtém-se o número de ciclos que um determinado espécime resiste a uma determinada tensão. De acordo com a norma ASTM E739 (2010), se forem realizados diversos ensaios em níveis diferentes de tensões ou solicitações mecânicas, pode-se plotar um gráfico com a tensão em que o corpo de prova apresentou dano catastrófico *versus* a quantidade de ciclos suportados. Deste modo obtém-se a curva S-N e a referida norma recomenda que se utilize do processo de linearização estatística para o gráfico gerado.

De posse de todos os gráficos gerados nos ensaios, do perfil de dureza e das propriedades mecânicas foi possível analisar a influência em peças que passam pelo processo de cladeamento com consumível de Inconel 625 em uma material base SAE 4140 temperado e revenido (temperatura mínima 690°C).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são abordados e mostrados os resultados dos ensaios realizados conforme descrito na metodologia do presente trabalho.

4.1. ENSAIO DE MICRODUREZA E METALOGRAFIA

4.1.1. Ensaio de microdureza Vickers

Os ensaios de microdureza *Vickers* ou levantamento do perfil de dureza e os ensaios metalográficos tiveram como objetivos a validação da soldagem conforme norma API 6A (2011) e o entendimento sobre a microestrutura do processo de cladeamento.

Para ambos os ensaios foram utilizados corpos de prova semelhantes aos utilizados nos ensaios de fadiga, separando-os em duas categorias: com alívio de tensões e sem o tratamento de alívio de tensões após o processo de cladeamento.

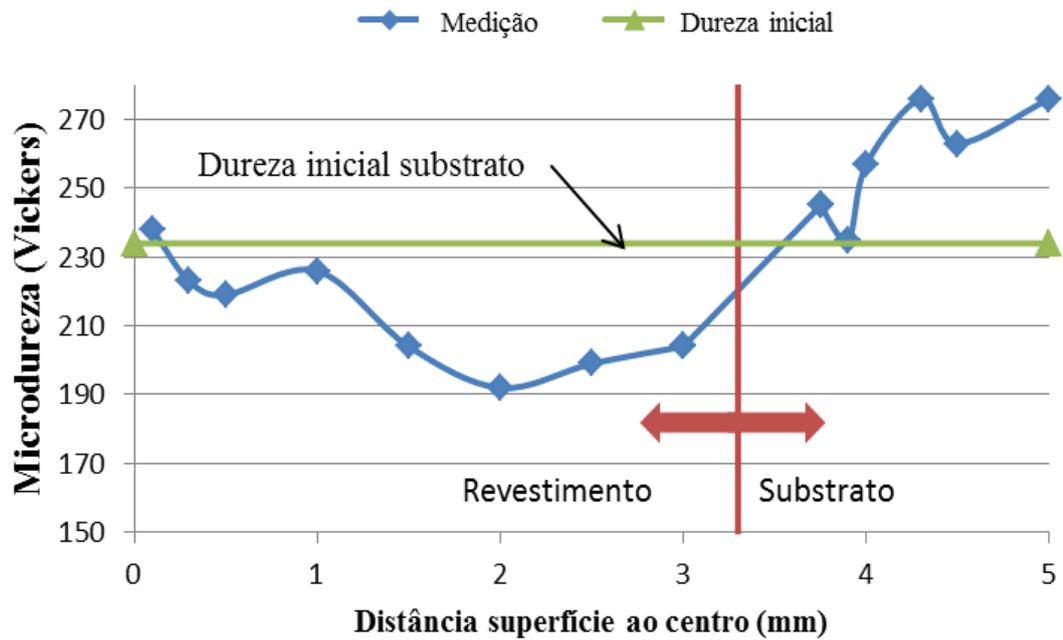
O ensaio de microdureza *Vickers* foi realizado no Laboratório de Metalografia da Universidade de Caxias do Sul, utilizando-se do equipamento da marca Shimadzu, sendo que o material substrato apresentou uma dureza de 234 HV_{0,3} e a camada aplicada de Inconel 625 foi de 1,5mm (após a usinagem).

Entretanto, conforme Figura 15 e Figura 16, verificou-se que a camada de revestimento alcançou espessura de 3,3 a 3,6mm, Esta diferença na camada de projeto e a encontrada, deve-se principalmente pela polaridade inversa do processo de soldagem, conforme a EPS qualificada para o processo de cladeamento, que propicia maior penetração do material de adição (WAINER, BRANDI E DE MELLO, 2010).

Outra informação importante que valida os ensaios conforme API 6A (2011) é que a dureza do material substrato não foi reduzida pelo processo de cladeamento. Sendo que a máxima dureza encontrada no substrato da amostra sem o alívio de tensões foi de 276 HV_{0,3} enquanto que na amostra que passou pelo tratamento de alívio de tensões apresentou máxima dureza no substrato de 252 HV_{0,3} apresentando uma diferença percentual no substrato de 18,1%.

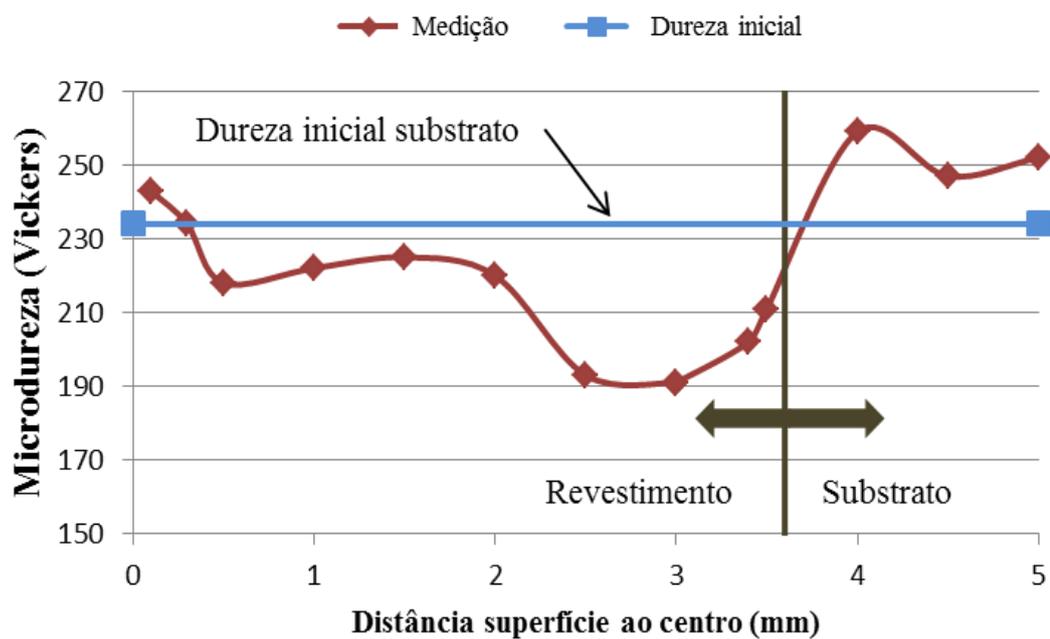
O perfil de dureza na região do revestimento tanto para a amostra em que foi realizado o alívio de tensões com na amostra em que este tratamento não foi realizado apresentam similaridades como podem ser visualizadas nas figuras 15 e 16. Os perfis apresentam uma redução da dureza ao longo da espessura, provavelmente ocasionada pelo processo de soldagem de multipasses, deste modo o último passe não foi afetado pelo aporte térmico das etapas anteriores.

Figura 15 - Perfil de dureza amostra sem alívio de tensões



Fonte: Autor.

Figura 16 - Perfil de dureza amostra com alívio de tensões



Fonte: Autor.

4.1.2. Análise metalográfica

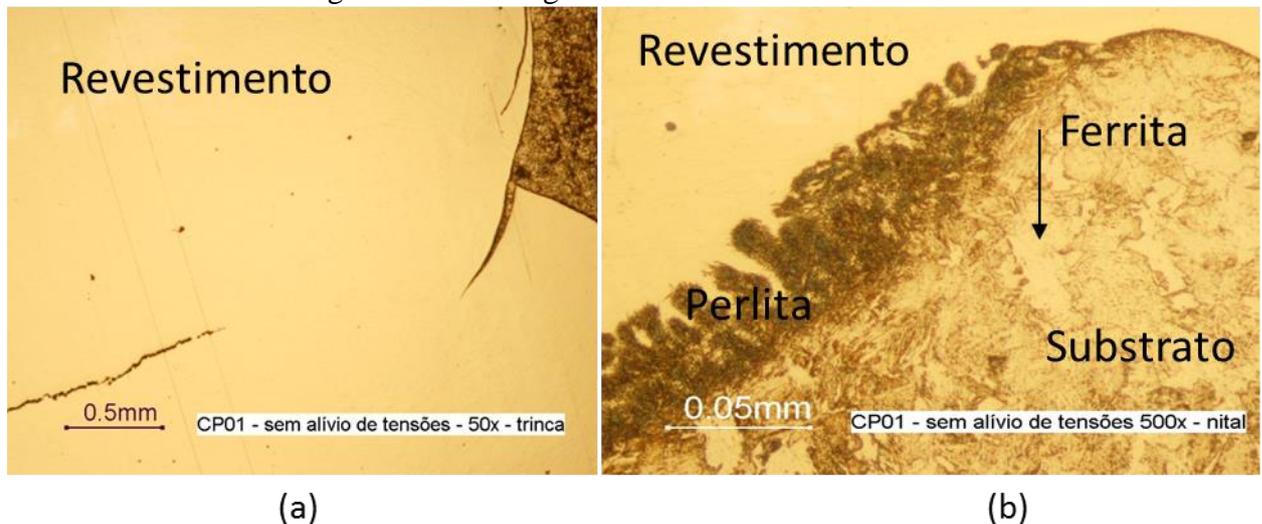
A preparação metalográfica também foi realizada no Laboratório de Metalografia da Universidade de Caxias do Sul. Os corpos de prova foram distribuídos em duas categorias: com e sem o alívio de tensões após o processo de cladeamento.

Para a visualização da microestrutura presente no material substrato foi utilizado o reativo Nital em uma concentração de 2% (ácido nítrico diluído a 2% em álcool etílico) enquanto que para a visualização da microestrutura do Inconel 625, por se tratar de uma liga resistente a corrosão conforme API 6A (2011), foi necessário o ataque com um agente de maior agressividade, neste caso o *Kallings* número 2 (5g $CuCl_2$, 100ml HCl e 100ml C_2H_5OH).

Na Figura 17(a), pode-se visualizar a região do revestimento do corpo de prova sem o alívio de tensões após o processo de cladeamento. Um fato a observar nesta figura, é a presença de trinca, conforme Wainer, Brandi e De Mello (2010), que pode estar associada a solidificação do material, já que o processo de soldagem foi controlado com o auxílio de mantas isolantes e termopares minimizando a possibilidade de trincas a frio.

Pode-se visualizar na Figura 17(b) a microestrutura do material substrato, que apresentou na interface com o revestimento uma estrutura perlítica e em seu interior estrutura ferrítica com a presença de martensita revenida.

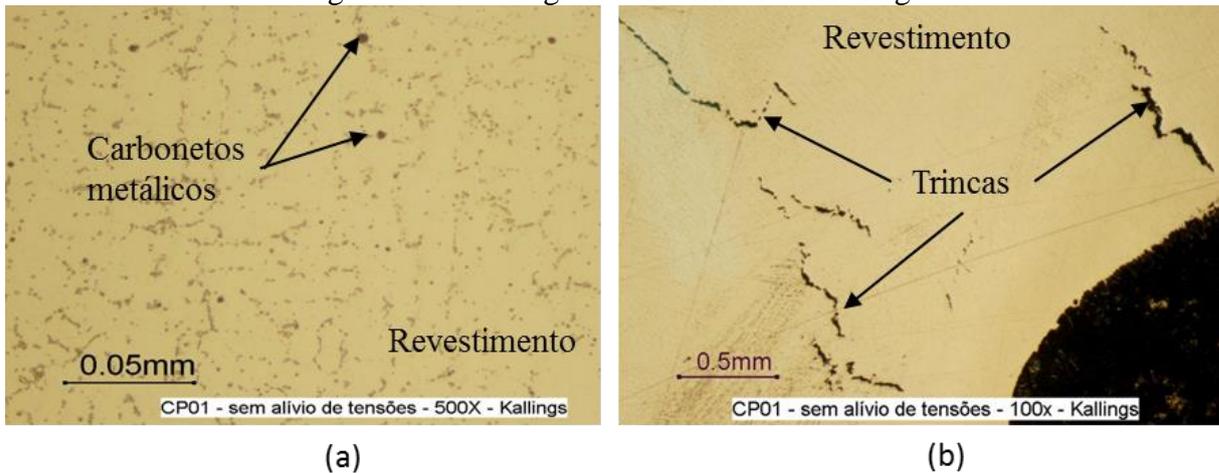
Figura 17 - Metalografia CP sem alívio Nital 2%



Fonte: Autor.

Por meio da Figura 18(a) visualiza-se a microestrutura do material Inconel 625, neste caso o material de adição, consiste de uma estrutura com matriz de solução sólida gama contendo carbonetos metálicos (MC), em um arranjo dendrítico (ASM Metal Handbook, 2004). Na Figura 18(b) observa-se a trinca mencionada anteriormente no ataque com Nital.

Figura 18 - Metalografia CP sem alívio Kallings

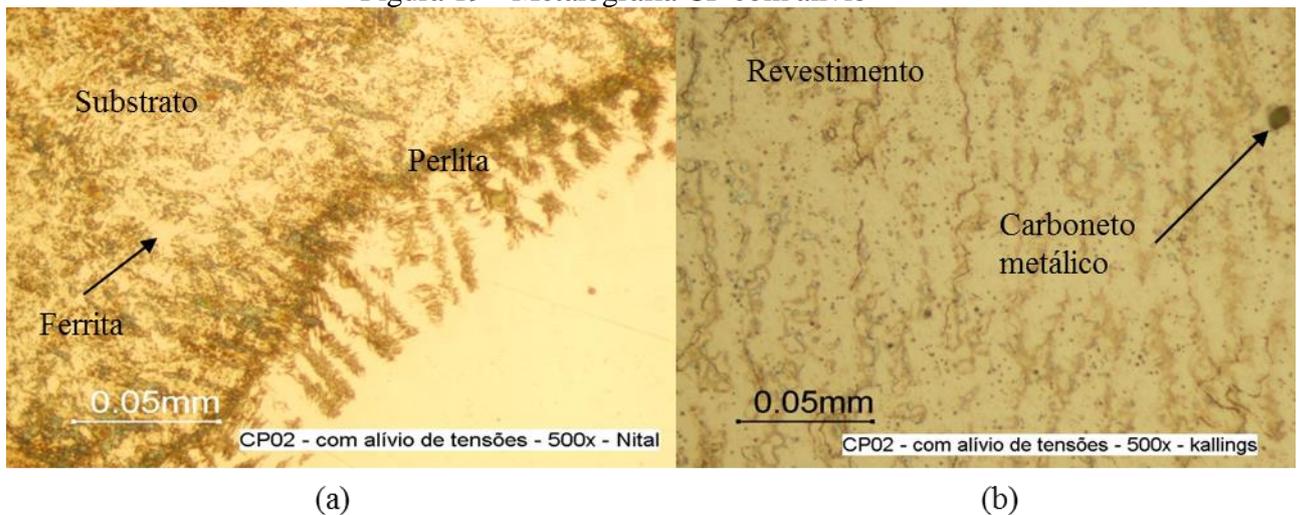


Fonte: Autor

Na Figura 19 pode-se verificar que o tratamento de alívio de tensões não afetou a microestrutura do corpo de prova. Na Figura 19(a), é apresentada a metalografia atacada com o agente Nital 2%, percebe-se a presença de uma estrutura ferrítica com martensita revenida no material substrato, na interface entre o material de adição e o substrato, como na análise anterior, há o acúmulo de perlita.

Na Figura 19(b), observa-se o material de adição atacado com o agente *Kallings*, a microestrutura como citado no ensaio anterior, consiste de uma matriz de solução sólida gama com presença de carbonetos metálicos.

Figura 19 - Metalografia CP com alívio



Fonte: Autor.

4.2. ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração teve dois principais objetivos, primeiro a determinação do limite de resistência à tração que os corpos de prova cladeados. Segundo, análise e compreensão da fratura que esta união soldada iria demonstrar às solicitações de tração.

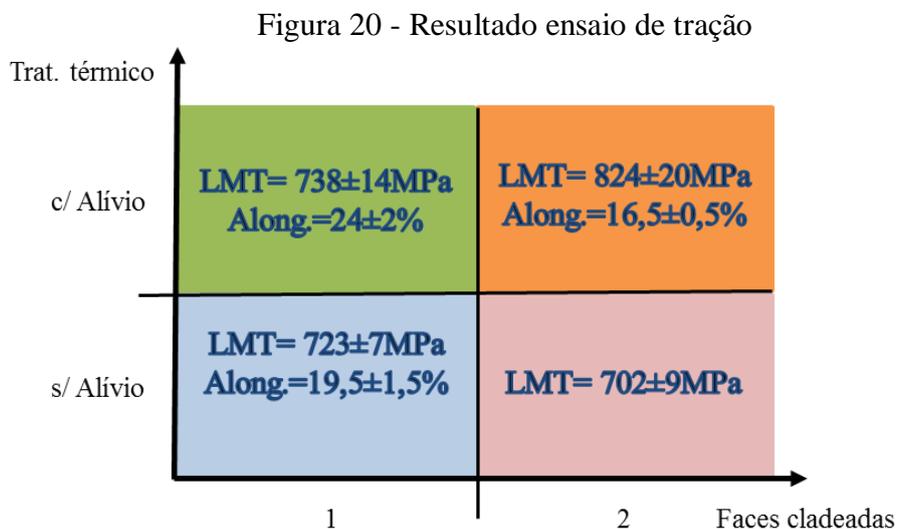
4.2.1. Resultados ensaio de tração

Foram realizados oito ensaios seguindo a norma ASTM A370 (2009) e metodologia proposta no capítulo anterior.

Verificou-se através destes ensaios a influência do alívio de tensões após soldagem e do número de faces cladeadas tanto no limite de resistência à tração como no alongamento dos corpos de prova, sendo que estes resultados podem ser visualizados na Figura 20.

Através da análise dos resultados fica evidente a variação das propriedades entre os corpos de prova que foram submetidos ao tratamento de alívio de tensões e cladeados em diferentes faces. Os espécimes cladeados nas duas faces apresentaram um aumento no limite de resistência à tração de 10%, entretanto seu alongamento reduziu em 31% em comparação com os espécimes cladeados apenas em uma face.

A mesma consideração não pode ser realizada nos corpos de prova que não foram submetidos ao alívio de tensões. Pela redução do limite de resistência a tração nos corpos de prova cladeados nas duas faces e pela posição onde ocorreu a ruptura, isto é, fora da marcação realizada para medição do alongamento e próximo ao raio do mesmo, constatou-se que o material apresentou maior fragilização.



Fonte: Autor.

Os relatórios originais dos ensaios de tração podem ser visualizados no anexo C.

4.2.2. Análise da fratura

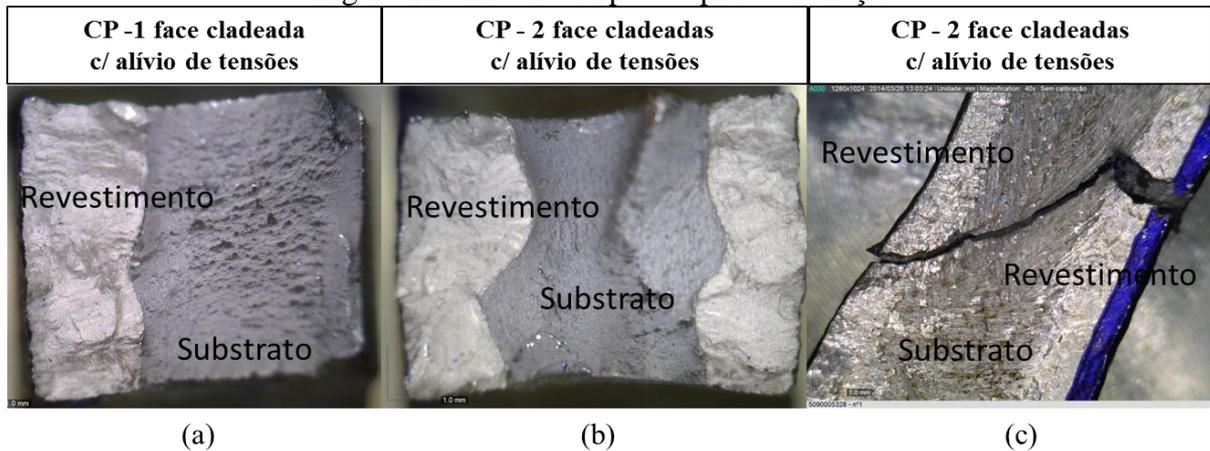
A análise da fratura dos corpos de prova em conjunto com os dados de acompanhamento dos ensaios mostra que o material substrato apesar de temperado e revenido apresentou uma fratura dúctil como pode ser visualizado na Figura 21(c), onde o material SAE 4140 deformou-se e plastificou até romper.

O revestimento também apresentou comportamento semelhante ao substrato deformando-se até o ponto em que se iniciou o rompimento do mesmo. A apresentação de alongamento no ensaio de tração e a presença de um limite de escoamento através das curvas geradas no ensaio (ver anexo C) comprovam que o revestimento apresentou uma fratura dúctil.

Outra característica analisada pelos corpos de prova e na realização do ensaio foi que em todos os corpos de prova a ruptura se iniciou no revestimento, ou seja, na região cladeada.

A redução de área, estrição, como pode ser visualizada na Figura 21(a) e Figura 21 (b) em todos os corpos de prova não foi totalmente aparente de modo a dificultar a sua mensuração.

Figura 21 - Fratura corpos de prova de tração



Fonte: Autor.

4.3. ENSAIO DE FADIGA

Os ensaios de fadiga tiveram por objetivo gerar as curvas S-N dos materiais e assim determinar a influência do processo de cladeamento em corpos de prova de aço SAE 4140.

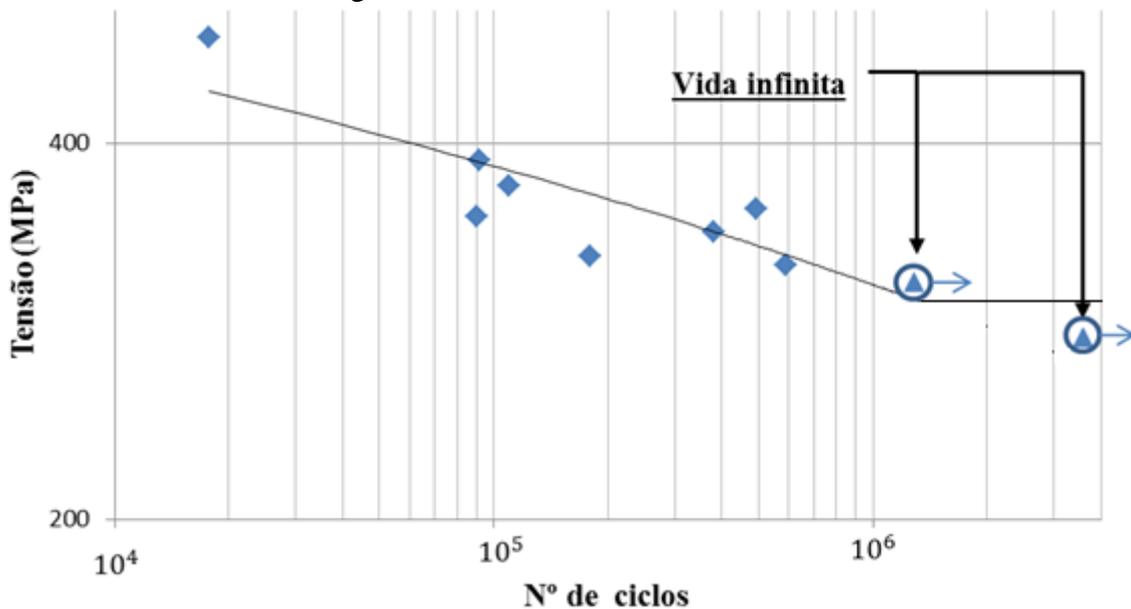
4.3.1. Ensaio de fadiga: substrato

Por meio do limite de resistência a tração obtido em ensaio após os tratamentos de têmpera e revenimento, o material substrato utilizado em todos os ensaios apresentou o valor de 760 MPa, ver anexo C. Esta tensão foi utilizada como referência para o início dos ensaios de fadiga por flexão-rotativa.

Entretanto, utilizando-se tensões muito próximas do limite de resistência a tração do material, percebeu-se que os espécimes não chegavam a resistir a 10^3 ciclos. Deste modo foi reduzida a carga na máquina em 50%, deste modo como pode ser visualizado na figura 22, os espécimes romperam próximos de 10^4 ciclos. A partir deste início foram reduzidas gradativamente as tensões de modo a gerar a curva S-N do material.

Foram testados quinze corpos de prova, destes cinco apresentaram rompimento inesperado, devido principalmente à má fixação nos mancais da máquina. A vida infinita segundo BUDYNAS e NISBETT (2011), ou seja, a tensão em que os corpos de prova tendem a não sofrer rompimento por fadiga é de 10^6 ciclos. Conforme a figura 22 para o material substrato a vida infinita foi de aproximadamente 300 MPa.

Figura 22 - Curva S-N do material substrato



Fonte: Autor.

Conforme norma ASTM E739 (2007), é recomendado que os valores obtidos nos ensaios de fadiga sejam tratados matematicamente, neste caso foram linearizados os dados de modo a obter uma reta, esta linearização conforme norma é possível considerando que todos

os logaritmos dos dados obtidos experimentalmente obedecem a uma distribuição normal e que a sua variação seja constante. Para a curva visualizada na figura 22 a equação (2) é:

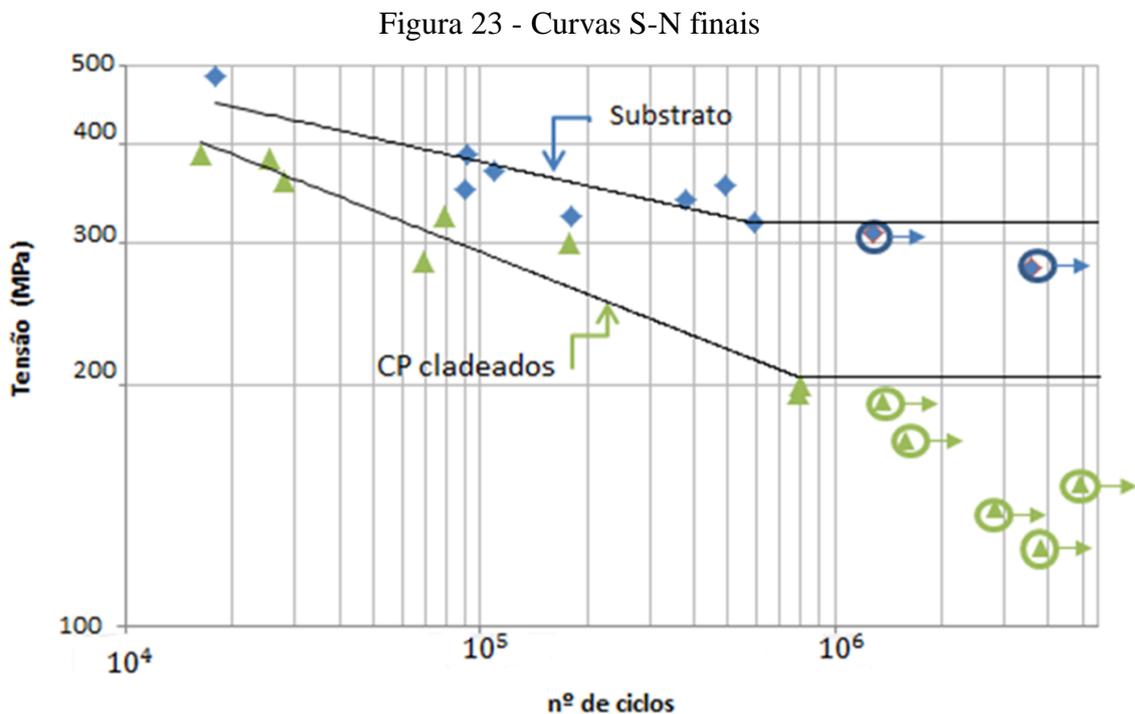
$$\log N = 3,018 - 0,0881 \times \log S \quad (2)$$

Onde a variável independente é o log da tensão ($\log S$) e a variável dependente é o logaritmo do número de ciclos ($\log N$).

4.3.2. Ensaio de fadiga: corpo de prova cladeado

Após a realização dos ensaios apenas com o material substrato, de modo a obter o comparativo para análise da influência do processo de cladeamento, foram realizados os ensaios de fadiga por flexão-rotativa com os corpos de prova cladeados e que passaram pelo processo de alívio de tensões.

Pela figura 23, pode-se visualizar o resultado final dos ensaios de fadiga. Os marcadores azuis são dos ensaios realizados apenas com o material substrato, os marcadores verdes são dos ensaios realizados com os espécimes cladeados.



Fonte: Autor.

Por meio da análise dos resultados finais, verificou-se uma queda na resistência a fadiga dos corpos de prova cladeados, a vida infinita para o ensaio com os corpos de prova cladeados foi de 190 MPa sendo interrompido o ensaio com 1.372.100 ciclos, isto representa uma redução percentual em relação ao ensaio apenas com o material substrato de 36,7%.

A tensão máxima que resistiu no mínimo 10^4 ciclos também foi menor, foi registrado a tensão de 389 MPa a 16.200 ciclos, em relação a tensão máxima suportada apenas pelo material substrato foi constatado uma redução percentual de 19%.

Esta redução à cargas cíclicas, caso de um ensaio de fadiga, deve-se principalmente ao aporte térmico do processo de cladeamento em uma seção considerada pequena em relação a sua aplicação na indústria petrolífera, paredes maiores. Outro fator para a redução na resistência à fadiga foram às trincas encontradas no ensaio metalográfico, sendo considerados pontos de maior concentração de tensão e regiões preferenciais para o início de fraturas, conforme Lassen e Recho (2006).

Ainda conforme a norma ASTM E739 (2010), foi realizado o tratamento matemático de linearização onde se encontrou a equação (3):

$$\log N = 3,4535 - 0,1973 \times \log S \quad (3)$$

5. CONCLUSÕES

É evidente o benefício econômico que o processo de cladeamento trás em comparação com a confecção de peças totalmente em superligas. Na produção de equipamentos para a indústria de óleo e gás em Inconel 625. Pelo cladeamento as empresas podem reduzir custos na aquisição de grande parte da matéria-prima utilizada como substrato, pois apenas um pequeno percentual desta será em um material relativamente mais nobre, de maior custo de aquisição.

Entretanto como foi visto é necessário uma análise criteriosa por parte das empresas, pois o processo de cladeamento por soldagem influencia diretamente na resistência mecânica e no comportamento a fadiga. Podendo um equipamento ter o seu ciclo de vida reduzido.

Podem-se tirar deste trabalho as seguintes considerações sobre o cladeamento de Inconel 625 no aço SAE 4140:

- a) Resistência à fadiga: pelos resultados gerados dos ensaios mecânicos, em específico pela geração das curvas S-N, verificou-se uma queda na resistência a fadiga dos corpos de prova cladeados. A presença de pequenas trincas no revestimento, constatadas nas metalografias, afetaram diretamente no comportamento mecânico destes corpos de prova cladeados através do processo SMAW.
- b) Processo SMAW no cladeamento: devido a grande probabilidade de haver defeitos no revestimento, como trincas, conforme Robinson (2010) e Smith(2012) o processo de soldagem com eletrodo revestido vem sendo substituído pelas empresas do ramo petrolífero por outros processos que permitam uma menor geração de tensões residuais as quais tendem a reduzir a vida do equipamento ou que possam causar danos catastróficos.
- c) Alívio de tensões: de acordo com o ensaio de tração ficou evidente o benefício que o tratamento térmico proporciona após o processo de cladeamento. A diferença no ensaio de tração de praticamente 100 MPa mostrou que trata-se de um tratamento que todas as empresas que venham a produzir equipamentos com o revestimento cladeado, principalmente pelo processo de soldagem, devam utilizar ou pelo menos estudar a sua implementação. Mesmo porque para empresas do ramo petrolífero a norma API 6A (2011) recomenda que todo processo de cladeamento seja seguido por um processo de alívio de tensões, salvo aplicações de manutenção em equipamentos que não estarão submetidos a ambientes de grande corrosão ou fragilização principalmente pelo hidrogênio e a grandes cargas mecânicas (cíclicas ou estáticas).

d) Estudo e foco na aplicação: nem todas as condições propiciam a utilização de revestimentos cladeados por soldagem. Em determinadas aplicações os custos podem não compensar as consequências, deste modo exigindo outros meios para o aumento na resistência à corrosão. Mas se o mesmo for possível de ser utilizado verificar se os parâmetros estão muito bem estabelecidos e se o processo é controlado.

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, os seguintes tópicos podem ser estudados em trabalhos futuros:

- a) O efeito do alívio de tensões na vida em fadiga em corpos de prova cladeados.
- b) Testar outros processos de soldagem na deposição de Inconel 625 e comparar o seu comportamento com os resultados obtidos no presente trabalho.
- c) Verificar a influência de diferentes meios na curva S-N de corpos de prova revestidos através do cladeamento.

REFERÊNCIAS

- ALAM, MM; KAPLAN, A.F.H.; TUOMINEN, J.; VUORISTO, P.; MIETTINEN, J.; NÄKKI, J.; JUNKALA, J.; PERTOLA, T.; BARSOUM, Z. Analysis of the stress raising action of flaws in laser clad deposits. **Materials and Design**, v. 46, 2012.
- ALBUQUERQUE, V.H.C., SILVA, C.C., NORMANDO, P.G., MOURA, E.P., TAVARES, J.M.R.S. Thermal aging effects on the microstructure of Nb-bearing nickel based superalloy weld overlays using ultrasound techniques. **Materials and Design**, v. 36, 2012.
- API. **API 17G Recommended Practice for Completion/Workover Risers**. 2.ed. 2011.
- API. **API 6A Specification for Wellhead and Christmas tree equipmen**. 20.ed. 2011.
- ASM Metal Handbook. **Metallography and Microstructures**. ASM International. Volume 9, Materials Park EUA, 2004.
- ASTM. **B444 Annual book of ASTM standards: Nonferrous Metal products**, v.2.04, West Conshocken EUA, 1998.
- ASTM. **A370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products**, West Conshocken EUA, 2009.
- ASTM. **E466 Standard Practice for conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials**. West Conshocken EUA, 2007.
- ASTM. **E739 Standard Practice for statistical analysis of linear or linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) fatigue data**. West Conshocken EUA, 2007.
- AWS A5.11/A5.11M:2005. **Specification for Nickel and Nickel-Alloy welding eletrodes for shielded metal arc welding**. American Welding Society, Miami EUA, 2005.
- AWS D1.1/D1.1M:2010. **Structural welding code-steel**. American Welding Society, Miami EUA, 2010
- BADRAK, R.; KOLESOV, S.; LAWSON, C.; MINETT-SMITH, D. **Fatigue and 718 Nickel Base Alloy**. Weatherford International, 2013.
- BUDYNAS, R.G; NISBETT, J.K. **Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. 8. Ed. Nova Iorque: McGraw-Hill Companies, Inc., 2011.
- BYUN, T.S.; FARRELL, K., Tensile properties of Inconel 718 after low temperature neutron irradiation. **Journal of Nuclear Materials**, v. 318, pp.292-299, 2003.
- CALLISTER, William. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 275 p.
- CATARIN, T.N.; DAS NEVES, M.D.M. Caracterizações Mecânicas e Microestruturais do aço AISI 8630 modificado Revestido com a liga de Níquel 625 pelo processo de Soldagem

TIG após vários ciclos térmicos de Alívio de Tensões. **XXXVII Congresso Nacional de Soldagem**, Natal, 2011.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 2008. 217-234p.

COOPER, K.P.; SLEBONDNICKB, P.; THOMASB, E.D. Seawater corrosion behavior of laser surface modified Inconel 625 alloy. **Materials Science and Engineering**, v. A206, pp.138-149, 1996.

DALCIN, R. L. Estudo da soldagem multipasses entre os aços Dissimilares AISI 4140 e ASTM A36 sem tratamento térmico posterior. **Trabalho final de curso graduação engenharia mecânica**. Horizontina: Fahor, 2012.

DENG, D.; OGAWA, K.; KIYOSHIMA, S.; YANAGIDA, N.; SAITO, K. Prediction of residual stresses in a dissimilar metal welded pipe with considering cladding, buttering and post weld heat treatment. **Computational Materials Science**, v. 47, pp.398-408, 2009.

DNV. **Recommended practice DNV-RP-C203: Fatigue design of offshore steel structures**, Noruega, 2010.

DUPONT, J.; LIPPOLD, J.C.; KISER, S.M. **Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

GANESH, P.; KAUL, R.; PAUL, C.P.; TIWARI, P.; RAI, S.K.; PRASAD, R.C.; KUKREJA, L.M. Fatigue and fracture toughness characteristics of laser rapid manufactured Inconel 625 structures. **Materials Science and Engineering A**, v A527, 2010.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 248p.

KANG,H.G.; KIM, J.K.; HUH, M.Y.; ENGLER, O. A combined texture and FEM study of strain states during roll-cladding of five-ply stainless steel/aluminum composites. **Materials Science and Engineering**, 2007.

KULKA, M.; DZIARSKI, N.; MAKUCH, N.; PIASECKI, A.; MIKLASZEWSKI, A. Microstructure and properties of laser-borided Inconel 600-alloy 2013. **Applied Surface Science**, 2013.

LASSEN, T; RECHO, N. **Fatigue life analyses of welded structures**. Londres: ISTE Ltd, 2006.

MAMALIS, A.G.; SZALAY, A.; VAXEVANIDIS, N.M.; MANILAKOS, D.E. Fabrication of bimetallic rods by explosive cladding and warm extrusion. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 83, 1998.

NOBILI, A. Explosion bonding process. **Nobelclad Technical Bulletin NT 200**, Nobelclad. França 1999.

PALANI, P.K.; MURUGAN, N. Sensitivity analysis for process parameters in cladding of Stainless steel by flux cored arc welding. **Journal of Manufacturing Process**, v.8, nr.2, 2006.

PFINGSTAG, M.E.; SCHROEDER, R.M.; MÜLLER, I.L., Avaliação do comportamento à fadiga e à corrosão-fadiga de juntas soldadas da liga Inconel 625 testada para uso em plataformas off-shore. **17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 2006.

RAO, N.V.; REDDY, G. M.; NAGARJUNA, S., Weld overlay cladding of high strength low alloy steel with austenitic stainless steel – Structure and properties. **Materials and Design**, v. 32, 2010.

RAJANI, H.R.Z.; MOUSAVI, S.A.A.A.; SANI, F.M., Comparison of corrosion behavior between fusion cladded and explosive cladded Inconel 625/plain carbon steel bimetal plates. **Materials and Design**, v. 43, 2013.

ROBINSON, A. Longer life with welded cladding. **World pumps**. Elsevier, Setembro de 2010.

SAE. **HS-30 - Ferrous material standards manual**. Warrendale EUA: SAE, 1997.

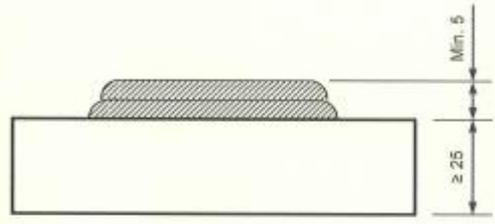
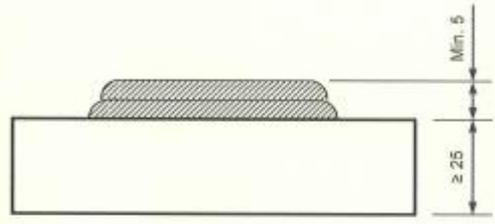
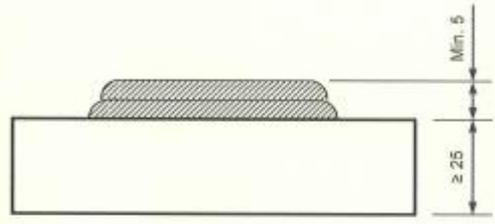
SHANKAR, V., BHANU SANKARA RAO, K., MANNAN, S.L. Microestrutura and the mechanical properties of Inconel 625 superalloy. **Journal of Nuclear Material**, v. 288, 2000.

SMITH, L. Engineering with clad steel. **Nickel Institute Technical Series**, nº 10064, 2012.

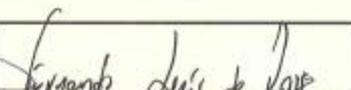
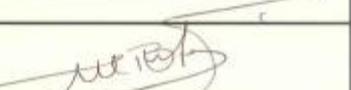
WAINER, Emilio; BRANDI, Sergio D.; DE MELLO, Fábio D.H.. **Soldagem processos e metalurgia**. 7ª reimpressão. São Paulo: Edgard Blüncher, 2010.

ANEXO B

Figura 25 - Especificação de procedimento de soldagem Cladeamento

	ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (REVESTIMENTO RESISTENTE À CORROSÃO)	EPS: <u>W1.12</u> Data: <u>15 / 01 / 12</u> Folha: <u>1 / 1</u> Revisão: <u>0</u>																																																																															
Processo: SMAW Tipo: Manual EPS: W1.12																																																																																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2">METAL DE BASE (QW-403)</td> </tr> <tr> <td>Especificação, tipo e grau:</td> <td>AISI 4130 Modificado</td> </tr> <tr> <td>P-Nº.:</td> <td>NA</td> </tr> <tr> <td>Espessura, (mm):</td> <td>≥ 25</td> </tr> <tr> <td colspan="2">METAL DE ADIÇÃO (QW-404)</td> </tr> <tr> <td>Especificação SFA:</td> <td>5.11</td> </tr> <tr> <td>Classificação AWS:</td> <td>ENiCrMo-3</td> </tr> <tr> <td>Forma do produto:</td> <td>Eletrodo Revestido</td> </tr> <tr> <td>Marca comercial:</td> <td>Tech-Rod 112</td> </tr> <tr> <td>Metal de adição suplementar:</td> <td>NA</td> </tr> <tr> <td>Espessura do revestimento:</td> <td>Mínimo 5 mm</td> </tr> <tr> <td>F-Nº.:</td> <td>43</td> </tr> <tr> <td>A-Nº.:</td> <td>NA</td> </tr> <tr> <td colspan="2">POSIÇÃO (QW-405)</td> </tr> <tr> <td>Posição de soldagem:</td> <td>Plana</td> </tr> <tr> <td>Progressão:</td> <td>NA</td> </tr> <tr> <td colspan="2">PRÉ-AQUECIMENTO (QW-406)</td> </tr> <tr> <td>Pré-aquecimento, min., (°C):</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td>Interpasse, max., (°C):</td> <td>250</td> </tr> <tr> <td colspan="2">TRATAMENTO TÉRMICO (QW-407)</td> </tr> <tr> <td>Temperatura de patamar, (°C):</td> <td>620 – 640</td> </tr> <tr> <td>Tempo de patamar, minutos:</td> <td>Mínimo 180</td> </tr> <tr> <td colspan="2">GÁS (QW-408)</td> </tr> <tr> <td>Gás de proteção:</td> <td>NA</td> </tr> <tr> <td>Composição da mistura:</td> <td>NA</td> </tr> <tr> <td>Vazão (L/min.):</td> <td>NA</td> </tr> </table>	METAL DE BASE (QW-403)		Especificação, tipo e grau:	AISI 4130 Modificado	P-Nº.:	NA	Espessura, (mm):	≥ 25	METAL DE ADIÇÃO (QW-404)		Especificação SFA:	5.11	Classificação AWS:	ENiCrMo-3	Forma do produto:	Eletrodo Revestido	Marca comercial:	Tech-Rod 112	Metal de adição suplementar:	NA	Espessura do revestimento:	Mínimo 5 mm	F-Nº.:	43	A-Nº.:	NA	POSIÇÃO (QW-405)		Posição de soldagem:	Plana	Progressão:	NA	PRÉ-AQUECIMENTO (QW-406)		Pré-aquecimento, min., (°C):	150	Interpasse, max., (°C):	250	TRATAMENTO TÉRMICO (QW-407)		Temperatura de patamar, (°C):	620 – 640	Tempo de patamar, minutos:	Mínimo 180	GÁS (QW-408)		Gás de proteção:	NA	Composição da mistura:	NA	Vazão (L/min.):	NA	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">DETALHE DA PEÇA DE TESTE (QW-402)</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">  </td> </tr> <tr> <td colspan="2">CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS (QW-409)</td> </tr> <tr> <td>Tipo de corrente e polaridade:</td> <td>CCEP</td> </tr> <tr> <td>Energia de soldagem, (kJ/cm)</td> <td>12.920 (para a 1a. camada)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">TÉCNICA (QW-410)</td> </tr> <tr> <td>Passe retilíneo ou oscilado:</td> <td>Retilíneo</td> </tr> <tr> <td>Ø do bocal, (mm):</td> <td>NA</td> </tr> <tr> <td>Método de limpeza:</td> <td>Esmerilhamento / Escovamento</td> </tr> <tr> <td>Oscilação:</td> <td>NA</td> </tr> <tr> <td>Distância bico-peça, (mm):</td> <td>NA</td> </tr> <tr> <td>Martelamento:</td> <td>NA</td> </tr> <tr> <td>Número de camadas:</td> <td>Mínimo 2</td> </tr> <tr> <td>Número de eletrodos:</td> <td>NA</td> </tr> </table>	DETALHE DA PEÇA DE TESTE (QW-402)				CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS (QW-409)		Tipo de corrente e polaridade:	CCEP	Energia de soldagem, (kJ/cm)	12.920 (para a 1a. camada)	TÉCNICA (QW-410)		Passe retilíneo ou oscilado:	Retilíneo	Ø do bocal, (mm):	NA	Método de limpeza:	Esmerilhamento / Escovamento	Oscilação:	NA	Distância bico-peça, (mm):	NA	Martelamento:	NA	Número de camadas:	Mínimo 2	Número de eletrodos:	NA
METAL DE BASE (QW-403)																																																																																	
Especificação, tipo e grau:	AISI 4130 Modificado																																																																																
P-Nº.:	NA																																																																																
Espessura, (mm):	≥ 25																																																																																
METAL DE ADIÇÃO (QW-404)																																																																																	
Especificação SFA:	5.11																																																																																
Classificação AWS:	ENiCrMo-3																																																																																
Forma do produto:	Eletrodo Revestido																																																																																
Marca comercial:	Tech-Rod 112																																																																																
Metal de adição suplementar:	NA																																																																																
Espessura do revestimento:	Mínimo 5 mm																																																																																
F-Nº.:	43																																																																																
A-Nº.:	NA																																																																																
POSIÇÃO (QW-405)																																																																																	
Posição de soldagem:	Plana																																																																																
Progressão:	NA																																																																																
PRÉ-AQUECIMENTO (QW-406)																																																																																	
Pré-aquecimento, min., (°C):	150																																																																																
Interpasse, max., (°C):	250																																																																																
TRATAMENTO TÉRMICO (QW-407)																																																																																	
Temperatura de patamar, (°C):	620 – 640																																																																																
Tempo de patamar, minutos:	Mínimo 180																																																																																
GÁS (QW-408)																																																																																	
Gás de proteção:	NA																																																																																
Composição da mistura:	NA																																																																																
Vazão (L/min.):	NA																																																																																
DETALHE DA PEÇA DE TESTE (QW-402)																																																																																	
																																																																																	
CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS (QW-409)																																																																																	
Tipo de corrente e polaridade:	CCEP																																																																																
Energia de soldagem, (kJ/cm)	12.920 (para a 1a. camada)																																																																																
TÉCNICA (QW-410)																																																																																	
Passe retilíneo ou oscilado:	Retilíneo																																																																																
Ø do bocal, (mm):	NA																																																																																
Método de limpeza:	Esmerilhamento / Escovamento																																																																																
Oscilação:	NA																																																																																
Distância bico-peça, (mm):	NA																																																																																
Martelamento:	NA																																																																																
Número de camadas:	Mínimo 2																																																																																
Número de eletrodos:	NA																																																																																
PARÂMETROS DE SOLDAGEM																																																																																	
Camada	Processo	Consumíveis		Corrente		Tensão (V)	Velocidade (cm/min)																																																																										
		Marca Comercial	Ø (mm)	Tipo	(A)																																																																												
1a. camada	SMAW	Tech-Rod 112	3,25	CCEP	85 – 110	28 – 30	≥ 16																																																																										
Outras	SMAW	Tech-Rod 112	4,00	CCEP	110 – 140	28 – 32	Ilimitada																																																																										

EPS elaborada de acordo ASME B31.3: 2008 e ASME IX: 2010 e Addenda 2011a.

 Weatherford Indústria e Comércio Ltda. Francis Danilewski Quality Supervisor Weatherford - CXS	 Fernando Luis de Roso Inspetor de Soldagem – SNQC IS 2360.N4	 Eng. José de Deus Brito Inspetor de Soldagem – SNQC IS 0207.N2
---	---	--

Fonte: Weatherford.

ANEXO C

Figura 26 - Relatório ensaio de tração 1

UCS - Laboratório de Ensaio Mecânicos
REGISTRO DE ENSAIO LAMEC - FE102 REVISÃO - 00 (SET/2007)

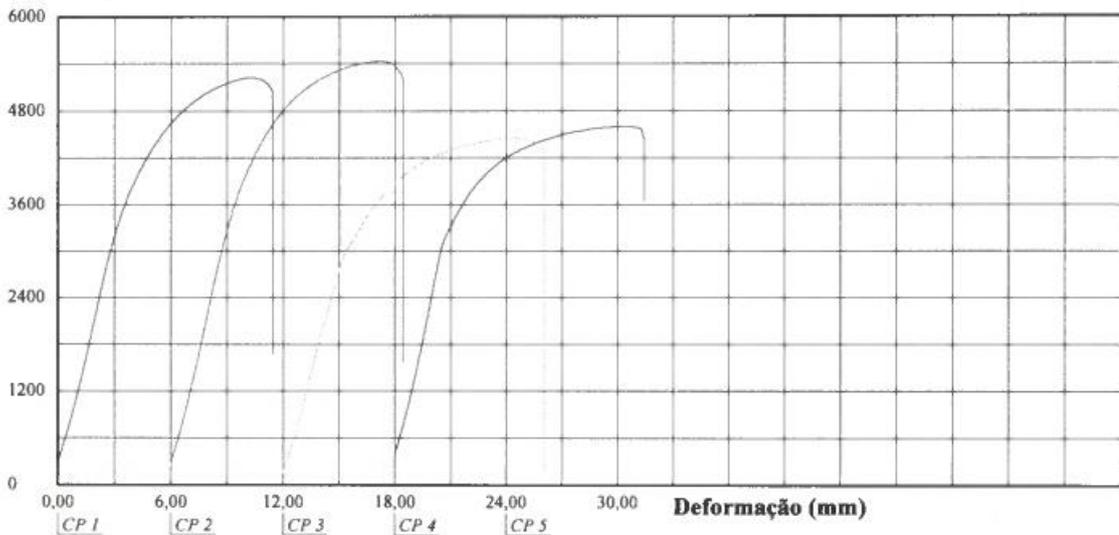
Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL20000** Célula: **Trd 12** Extensômetro: - Data: **20/03/2014** Hora: **14:56:00** Trabalho n° **0071**
Programa: **Tesc versão 3.01** Método de Ensaio: **20T_TRAÇÃO RETANGULAR**
Ident. Amostra: > Cliente: **TCC Daniel Brist** (Temp.(°C): **23,7** - Ident. n°: **4.1, 4.2, 8.1 e 8.S.S. : 257253/2** - Folha: **02 de 02**

Corpo de Prova	Ident. n°:	Esp. (mm)	Larg. (mm)	Velocidade de Ensaio (mm/min)	Força *Escoam. (kgf)	Força Máxima (kgf)	Comp. Inicial (Lo) (mm)	Comp. Final (Lf) (mm)
CP 1	4.1	10,09	6,32	8	3131	5225	25	29,90
CP 2	4.2	10,08	6,27	8	3191	5436	25	30,18
CP 3	8.1	10,00	6,31	8	2420	4458	25	32,21
CP 4	8.2	10,06	6,32	8	3106	4605	25	32,13

*Escoam. - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: 0,2%: 0
Método de ensaio segundo norma ASTM A-370: 0
Paquímetro utilizado P(): 7

Força (kgf)



Observação:

☐☐ IDENTIFICAÇÃO DO CLIENTE: Ensaio para TCC Daniel Bristot material 4140 + inonel (níquel 54% e cromo 25%) orientador Alexandre Vieceli.

Figura 27 - Relatório ensaio de tração 2

UCS - Laboratório de Ensaio Mecânicos
REGISTRO DE ENSAIO LAMEC - FE102 REVISÃO - 00 (SET/2007)

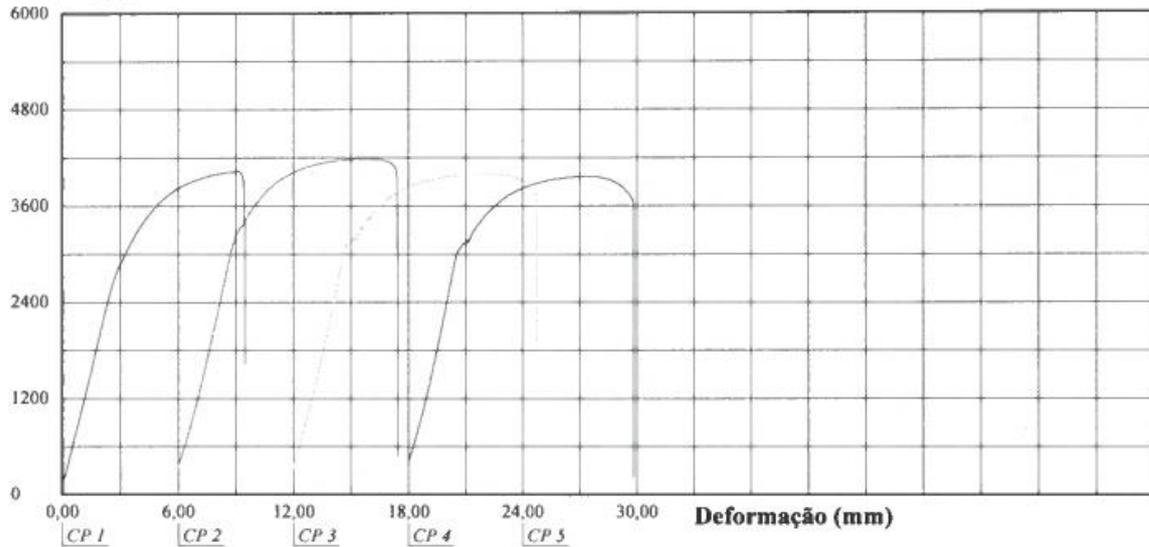
Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL20000** Célula: **Trd 12** Extensômetro: - Data: **20/03/2014** Hora: **14:05:55** Trabalho n° **0069**
 Programa: **Tesc versão 3.01** Método de Ensaio: **20T_TRAÇÃO RETANGULAR**
 Ident. Amostra: > Cliente: **TCC Daniel Bristot** Temp.(°C): **23,7** - Ident. n°: **3.1, 3.2, 5.1 e 5.2** S.S.: **257253** - Folha: **02 de 02**

Corpo de Prova	Ident. n°	Esp. (mm)	Larg. (mm)	Velocidade de Ensaio (mm/min)	Força *Escoam. (kgf)	Força Máxima (kgf)	Comp. Inicial (Lo) (mm)	Comp. Final (Lf) (mm)
CP 1	3.1	8,60	6,35	8	2643	4036	25	30,42
CP 2	3.2	8,58	6,34	8	3193	4190	25	31,81
CP 3	5.1	8,57	6,38	8	3116	4003	25	33,85
CP 4	5.2	8,58	6,37	8	3019	3969	25	32,24

*Escoam. - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: 0,2%: 0
 Método de ensaio segundo norma ASTM A-370: 0
 Paquímetro utilizado P(): 7

Força (kgf)



Observação:

IDENTIFICAÇÃO DO CLIENTE: Ensaio para TCC Daniel Bristot orientador Alexandre Vieceli.

Figura 28 - Ensaio de tração substrato

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 08104/13

Laboratório de ensaio acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL 0302

Resultados do ensaio de tração

Identificação da amostra:	581083/ 581084/ 581085/ 581086
Formato da amostra:	Cilíndrico
Material da amostra:	SAE 4140

Resultado do ensaio de tração	Valor	Incerteza	Unidade	k
Diâmetro inicial da amostra:	5,92	0,09	mm	2,00
Diâmetro final da amostra:	3,24	0,11	mm	2,00
Comprimento inicial da amostra:	24,00	0,13	mm	2,00
Comprimento final da amostra:	30,47	0,13	mm	2,00
Área inicial da amostra:	27,53	0,8	mm ²	2,00
Área final da amostra:	8,24	0,6	mm ²	2,00
Força máxima (F _m):	20931	242	N	2,00
	2134	25	kgf	
Força de escoamento (F _e):	18308	242	N	2,00
	1867	25	kgf	
Resistência à tração (R _m):	760	25	MPa	2,00
	78	3	kgf/mm ²	
Resistência ao escoamento (R _e):	665	21	MPa	2,00
	68	2	kgf/mm ²	
Alongamento percentual após a ruptura (A):	27	1	%	2,00
Redução percentual de área (Z):	70	2	%	2,00

Simbologia e fatores de conversão

ND quando informado, a propriedade mecânica não foi determinada

k representa o fator de abrangência que é empregado no cálculo da incerteza de medição

Unidades em acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI)

Fator de conversão para comprimento: 1 m = 1000 mm

Fator de conversão para força: 1 N = 0,102 kgf

Fator de conversão para resistência mecânica: 1 MPa = 0,102 kgf/mm²

Fonte: Autor.