

Soldagem Subaquática



Valter Rocha dos Santos

Sobre o curso

Material didático:

- Esta apresentação
- Apostila “Introdução à Soldagem Subaquática”

Bibliografia

AWS Welding Handbook vol 4, cap 10 Underwater welding and cutting, p. 607 - 672

AWS D3.6M:2017 - Underwater Welding Code

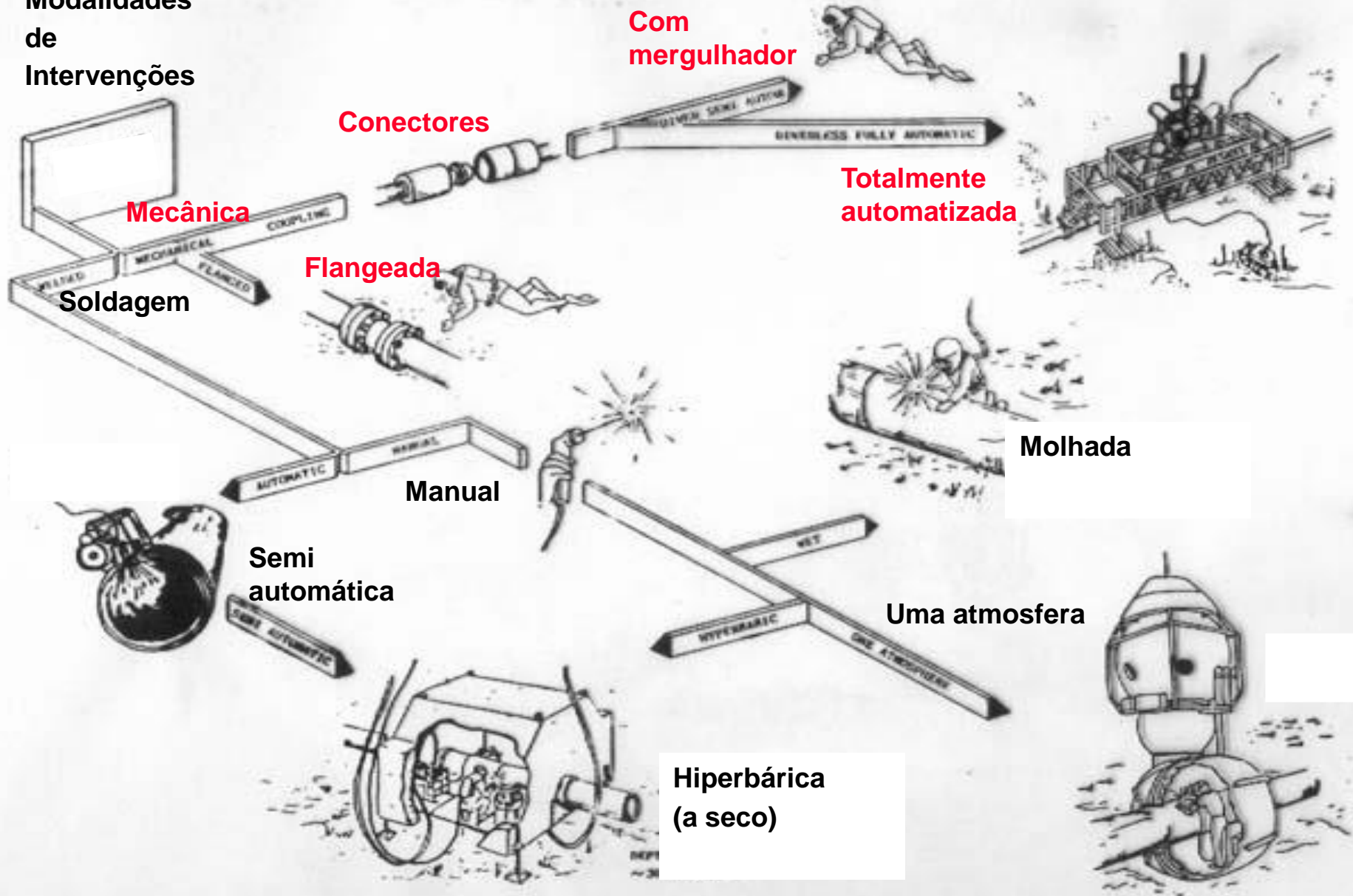
Norma PETROBRAS N 2036 Soldagem Submarina (inclui Práticas Recomendadas)

A avaliação constará de perguntas de múltipla escolha sobre o power point apresentado em aula.

A apostila contém explicações mais detalhadas sobre os temas abordados em aula e deve ser lida. Entretanto, para sua total compreensão, seriam necessários conhecimentos (não serão cobrados) sobre metalurgia da soldagem (páginas 10 a 21) em um nível de profundidade que uma parte dos alunos possivelmente não têm. Isto será considerado na formulação das questões de prova. Mesmo assim, não deixem de ler toda a apostila porque ela contém informações que podem complementar seus conhecimentos sobre a soldagem atmosférica em construção e manutenção de dutos terrestres.

MODALIDADES DE REPAROS EM DUTOS

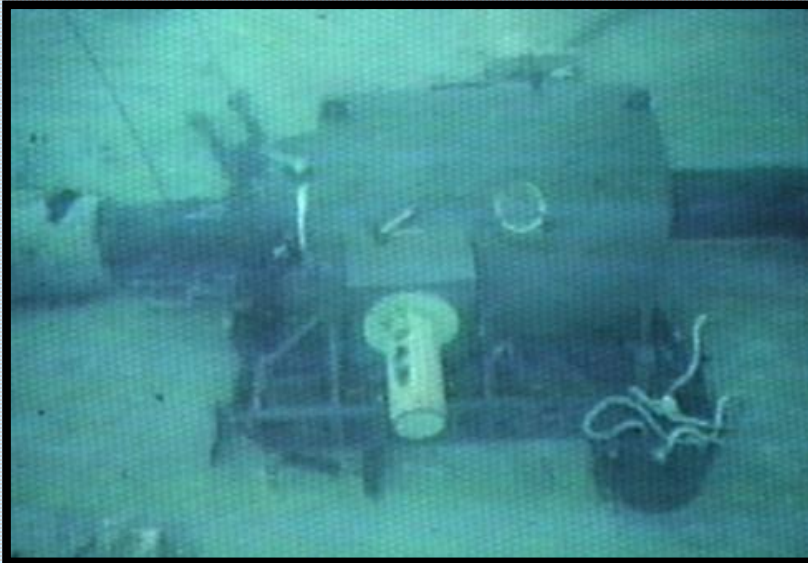
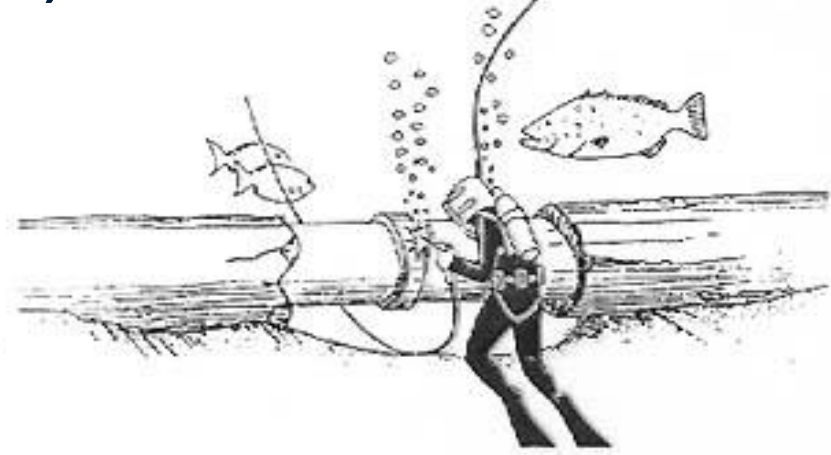
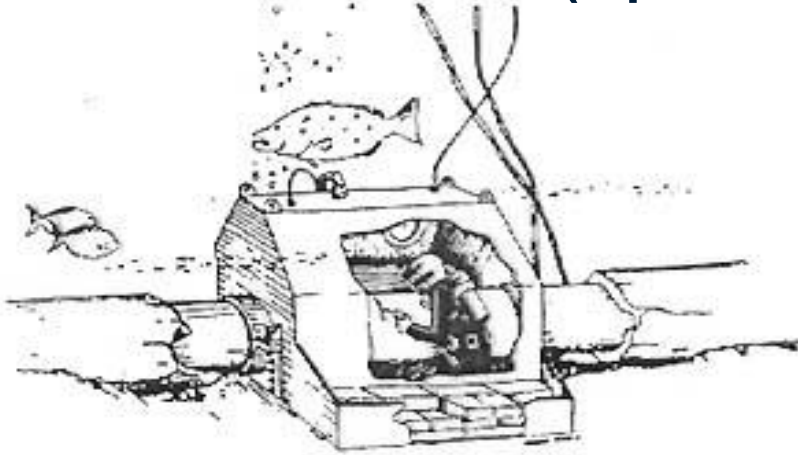
Modalidades de Intervenções



MODALIDADES DE SOLDAGEM SUBAQUÁTICA

SOLDAGEM A SECO (hiperbárica)

SOLDAGEM MOLHADA



- necessidade de um *habitat*
- soldas de melhor qualidade

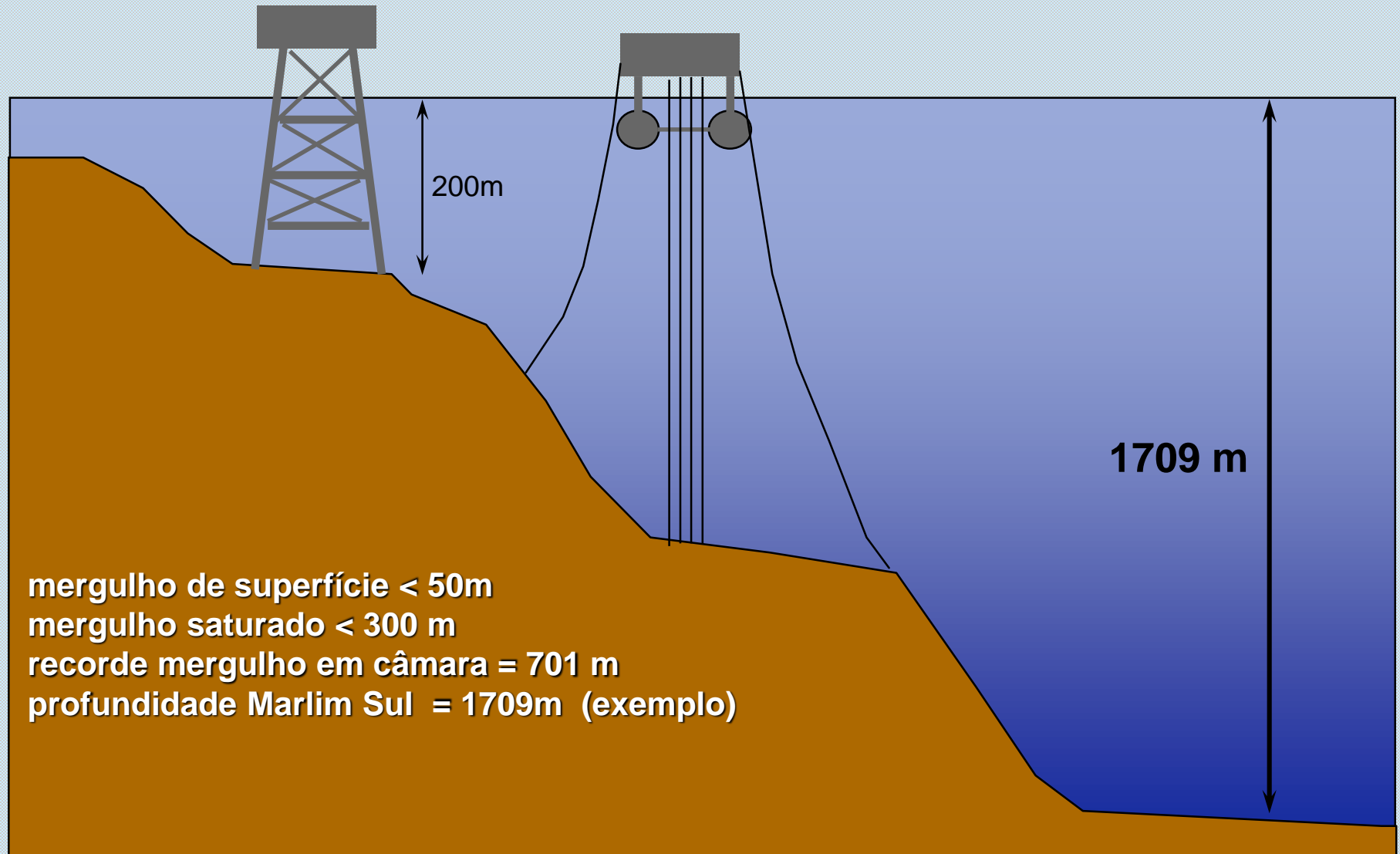


- soldagem diretamente na água
- soldas de menor qualidade

A possibilidade de utilização da soldagem subaquática é dependente da profundidade de trabalho e da tecnologia de mergulho aplicável



Mergulho na Indústria Offshore



Mergulho de superfície

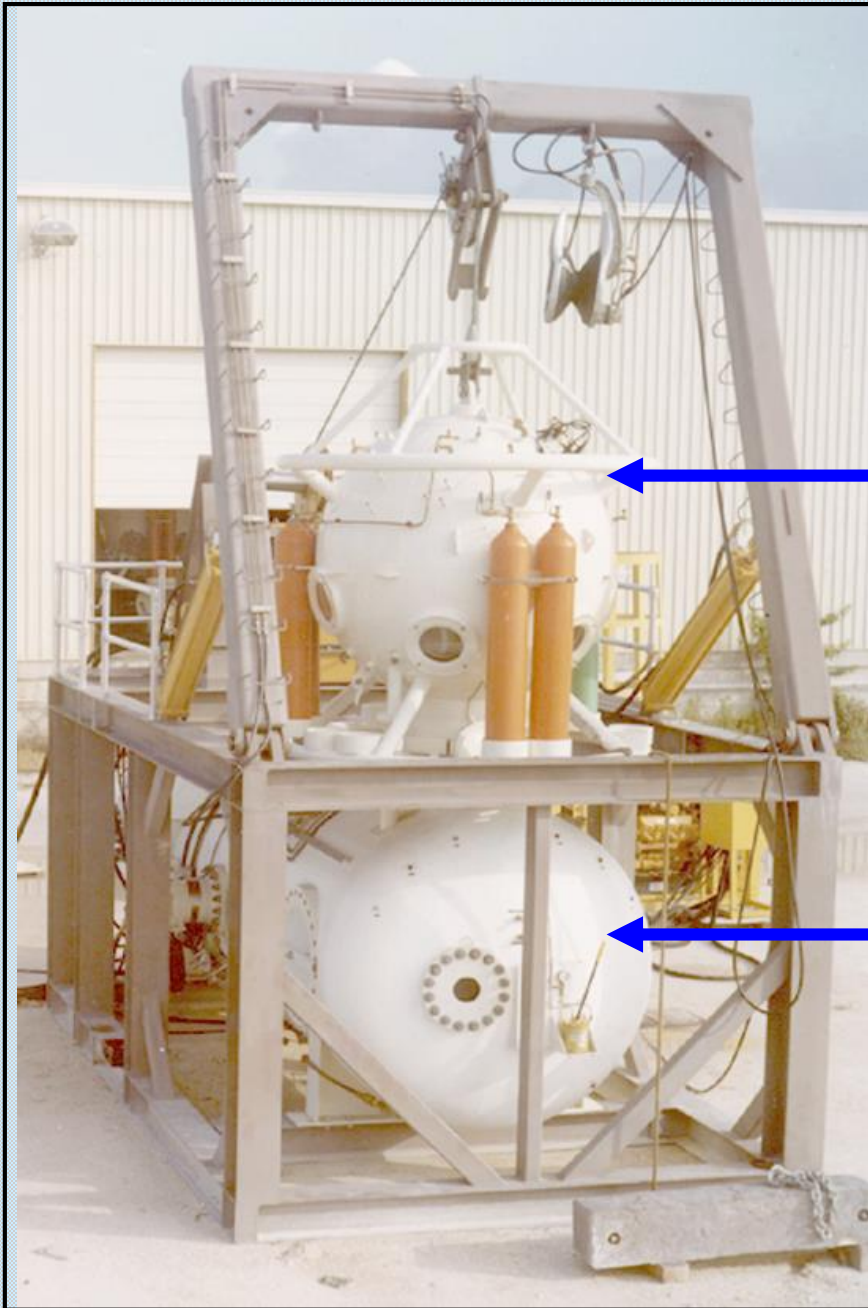


Teste para qualificação de procedimento de soldagem molhada pelo processo “eletrodos revestidos” .

Local: Porto de Salvador



Mergulho saturado



Sino

**Câmara
de vida**

Interior da câmara de vida



Sistema de mergulho

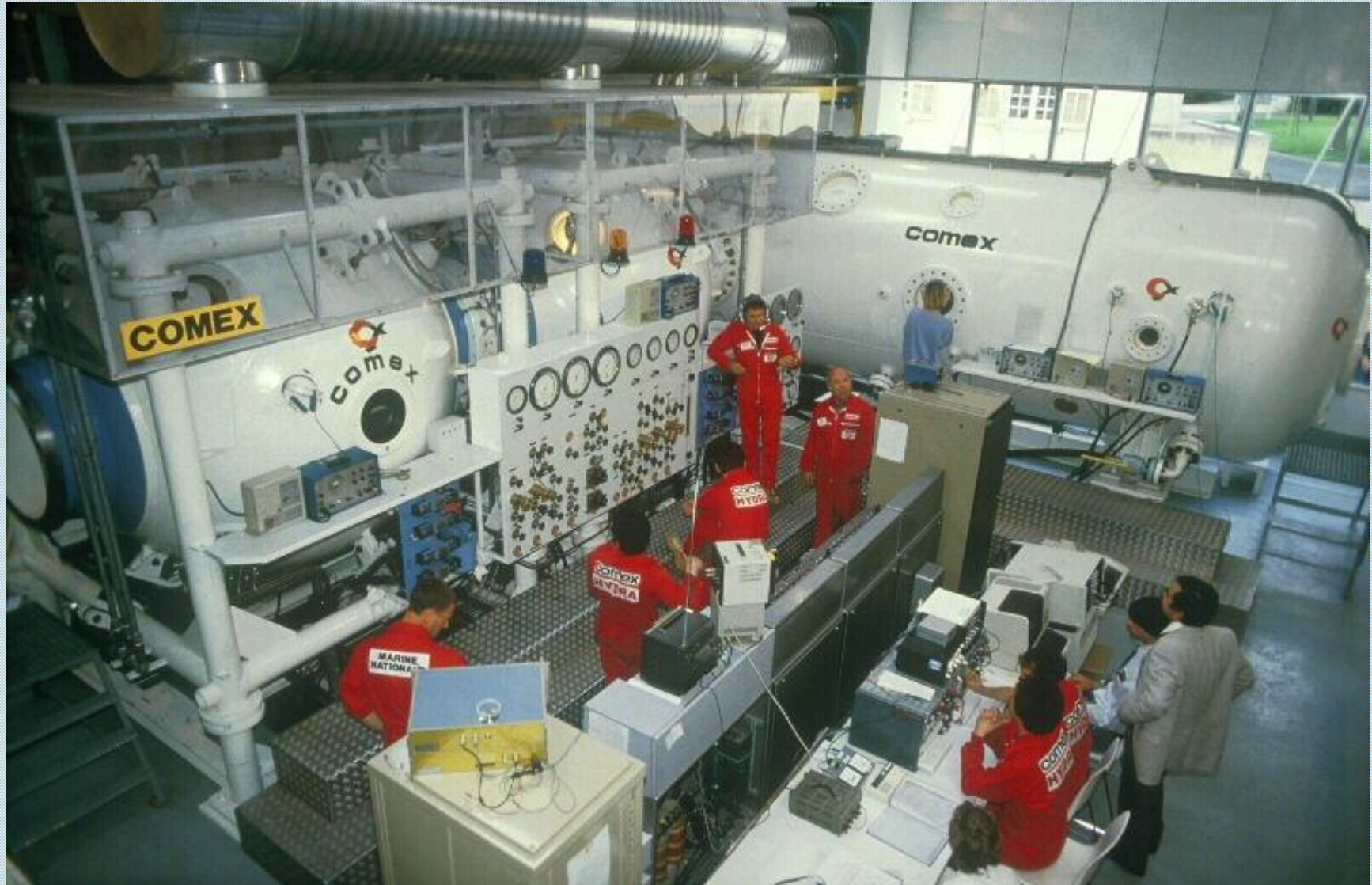
Sino

Câmaras de vida



Mergulho na Indústria de Petróleo

Grande desenvolvimento a partir da década de 70



Comex



1992

HYDRA 10

**Record ainda
não superado.**

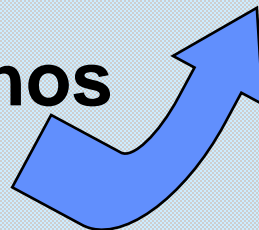
**Respirando
 $H_2 + O_2$**

Mergulho na Indústria de Petróleo



Record mundial

Limite para mergulhos comerciais: 300m



Utilização de robôs

Soldagem Molhada



PRINCIPAIS PROCESSOS DE SOLDAGEM MOLHADA

SOLDAGEM MOLHADA COM ELETRODOS REVESTIDOS

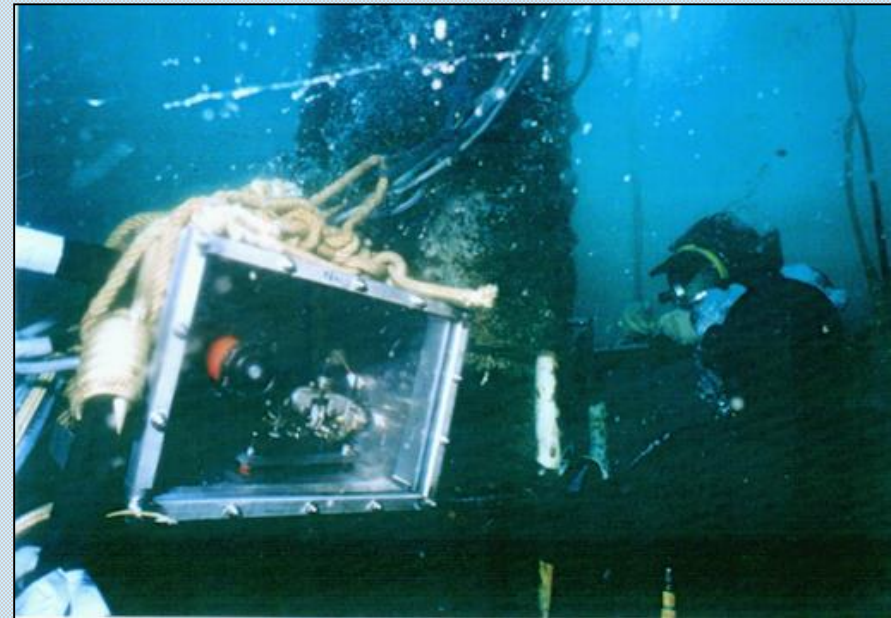
- Largamente aplicada em águas rasas (até ~30m).
- Ainda em estágio de desenvolvimento buscando atingir consistentemente qualidade estrutural (AWS D3.6 classe A).
- Em determinadas situações é possível qualificar procedimentos de soldagem na classe A
- Pouco aplicada em dutos submarinos

ARAME TUBULAR

Ainda em estágio de desenvolvimento buscando atingir operacionalidade e qualidade estrutural. As poucas aplicações de campo conhecidas, todas em águas rasas, ocorreram em estruturas.

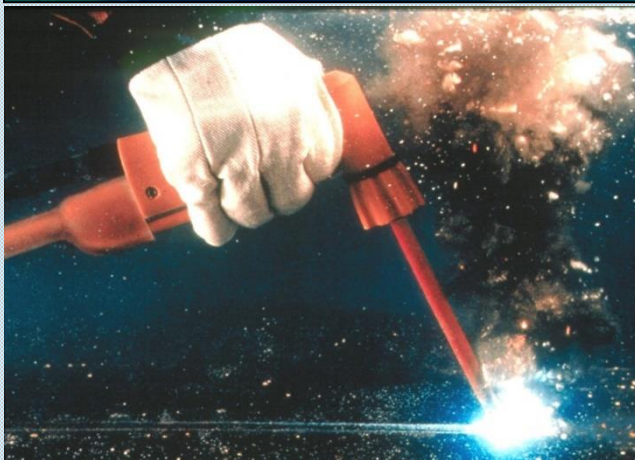
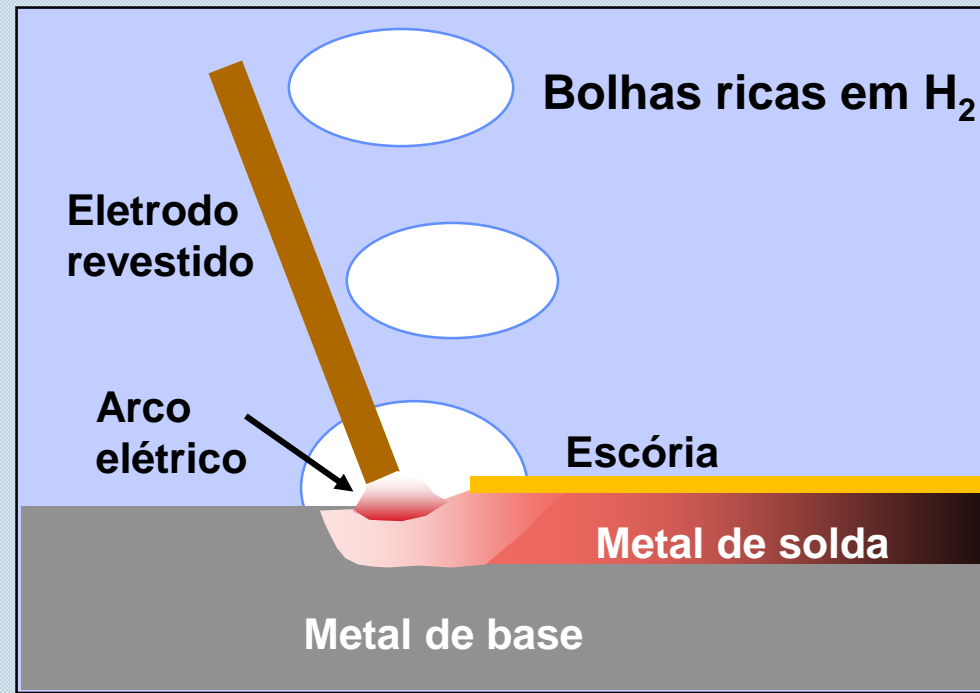
SOLDAGEM POR ATRITO

Empregado na soldagem de estojos em estruturas para fixação de dispositivos temporários ou permanentes. Existem equipamentos e consumíveis comercialmente disponíveis. O processo é pouco sensível ao aumento da pressão e passível de automação.



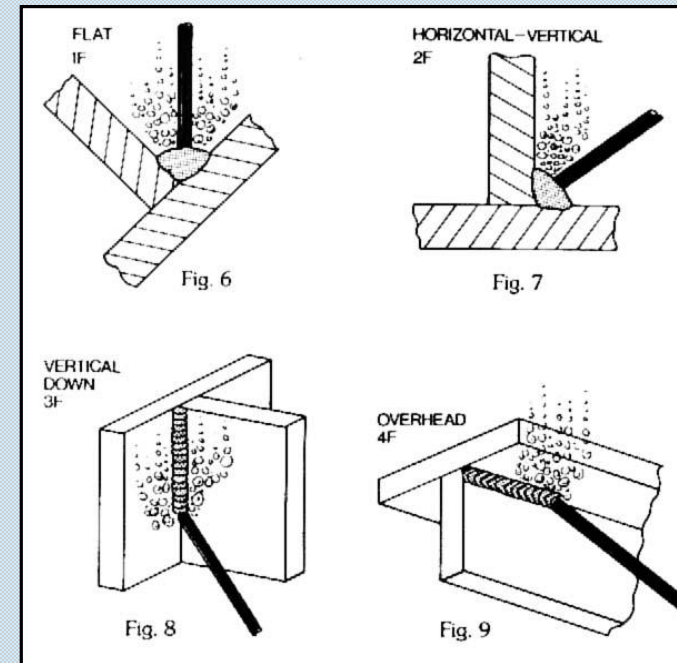
Soldagem Subaquática Molhada

Eletrodos revestidos



**Problema de visibilidade:
Bolhas, fumos e paralaxe.**

**Técnica usual: solda por
arraste do eletrodo.
Contato eletrodo - peça**



Classes de solda subaquática AWS D3.6M: 2017 Underwater Welding Code

Welds class A: Critérios de aceitação semelhantes aos exigidos para soldagem atmosférica

Welds class B: Critérios de aceitação menos rigorosos que os exigidos para class A para viabilizar aplicações de menor responsabilidade e reparos provisórios

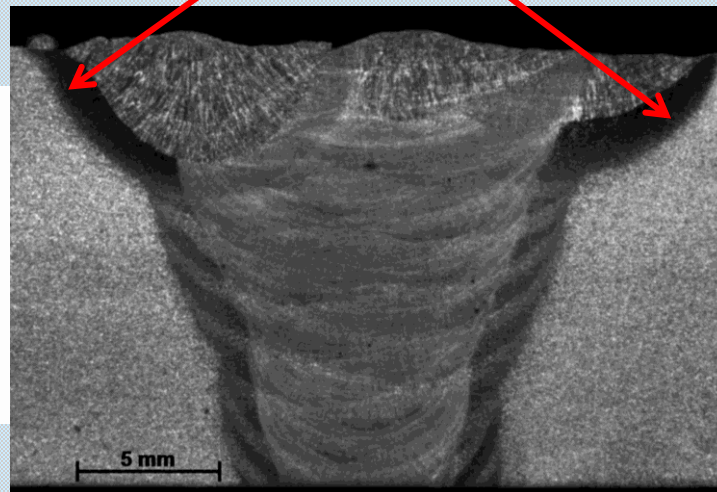
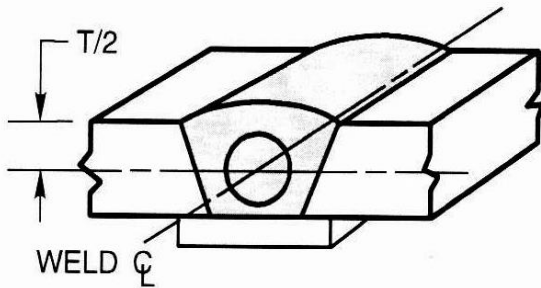
Class A – Qualidade estrutural plena – Requisitos críticos

- Macrografia (5X): ausência de trincas na zona afetado pel calor (ZAC) e no metal de solda (MS)
- Alongamento mínimo no “all-weld-metal tensile test” (tração do metal de solda) de: 14% (higher strength steels) ou 18% (lower strength steels)
- Dureza máxima de 325 HV10 na ZAC e MS
- Aprovação total em 4 ensaios de dobramento com ângulo de 180°

Localização do pontos críticos para dureza

Wraparound guided bend test

all-weld-metal tensile specimen (tração do metal de solda)

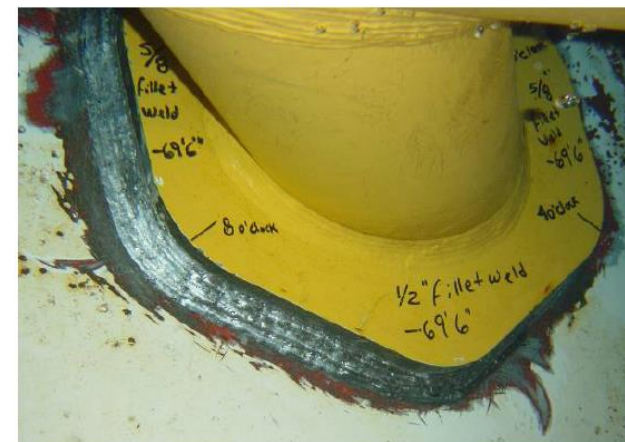


**Reparo simulado por dupla calha de 14 polegadas de diâmetro.
Soldas com eletrodo revestido do tipo oxidante a 12 m de profundidade.
Aprovado em teste de tração e em teste hidrostático.**

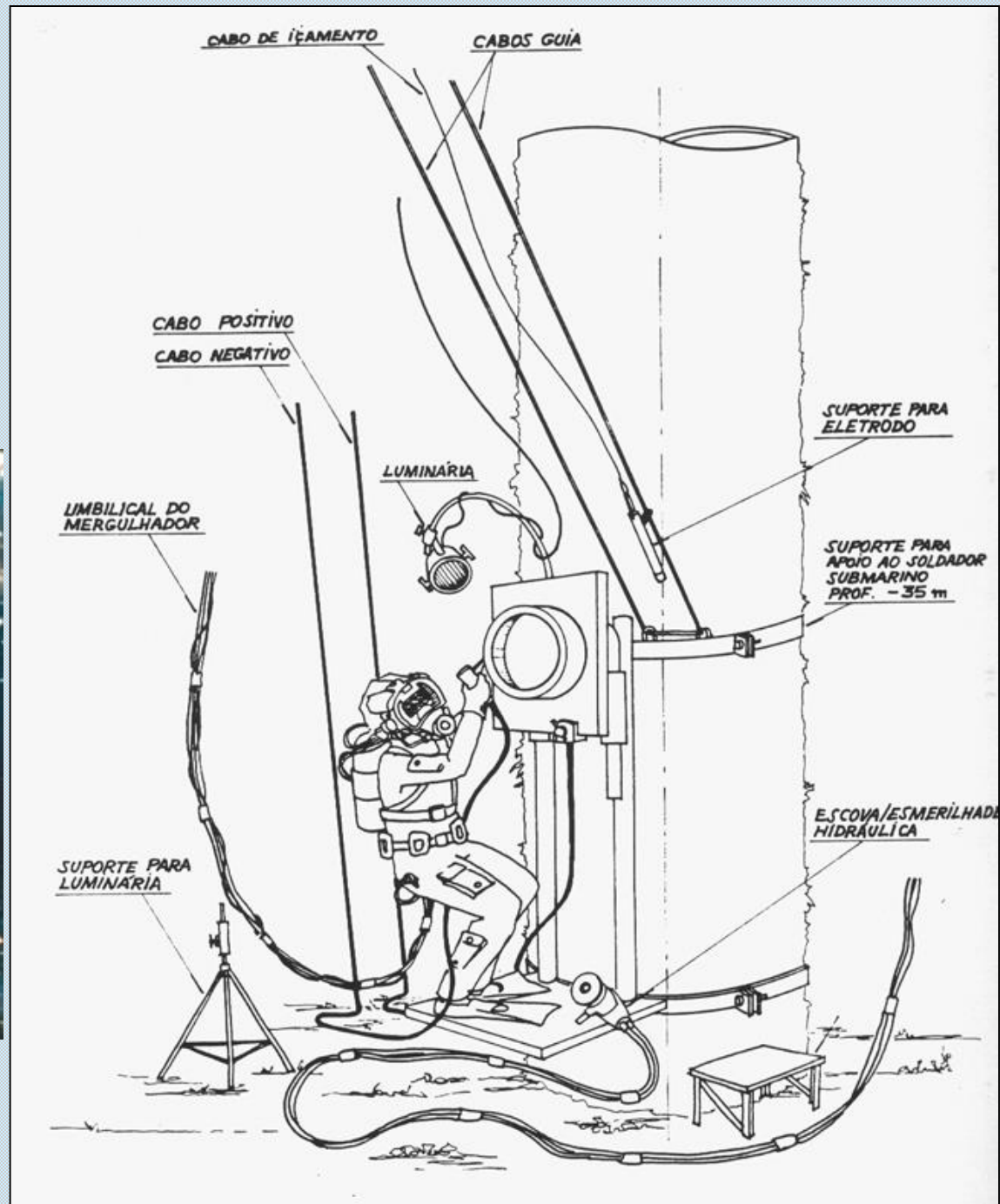
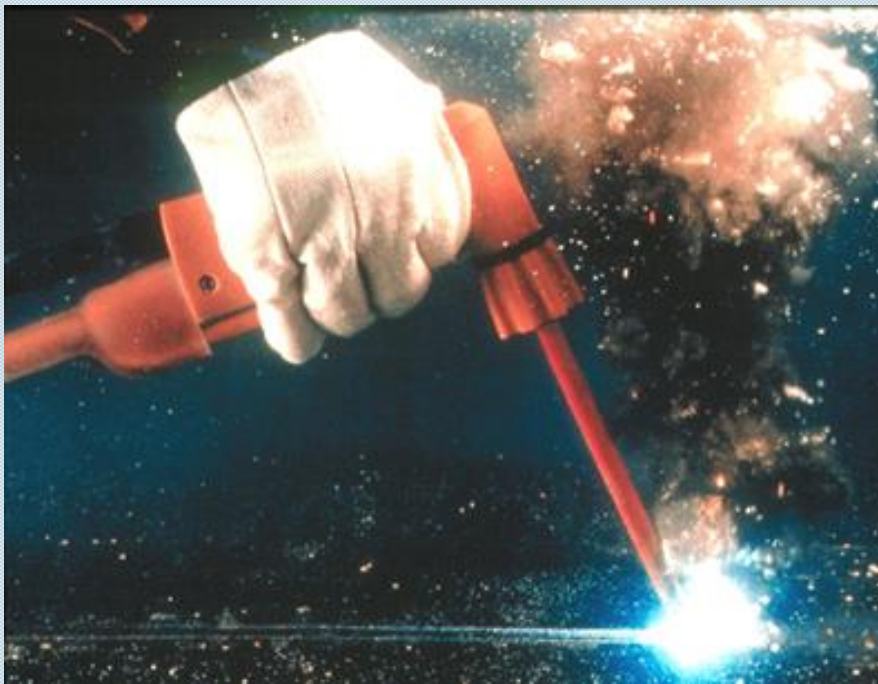


Solda de reparo por reposição de um membro estrutural de uma plataforma fixa do Golfo do México atingida por um furacão

Completed 2003



MATERIAIS E EQUIPAMENTOS PARA SOLDAGEM MOLHADA COM ELETRODOS REVESTIDOS



EQUIPAMENTOS PARA SOLDAGEM MOLHADA



Facilidades de Testes no SENAI – Macaé - RJ

Profundidade 5m



Facilidades de Testes na BELOV - Guapimirim - RJ

Profundidade 10m



Principais eletrodos revestidos comerciais para Soldagem Molhada



Oxidante
ESAB

Rutílicos:

- Hydroweld
- Broco EasyTouch
- Broco SofTouch
- Náutica
- Barracuda

Oxirutílico
ESAB

Os eletrodos do tipo oxidante e oxirutílico da ESAB foram desenvolvidos em parceria com PETROBRAS, PUC-Rio e UFMG no PROJETO CSM 2007 - 2017

Os eletrodos são impermeabilizados com camada de verniz ou parafina

Propriedades do metal de solda (testes de laboratório e informações do fabricante)

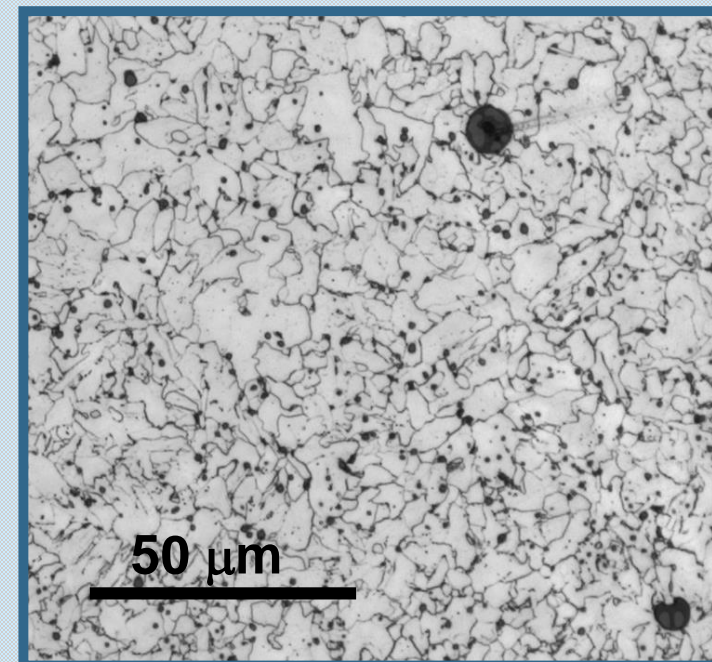
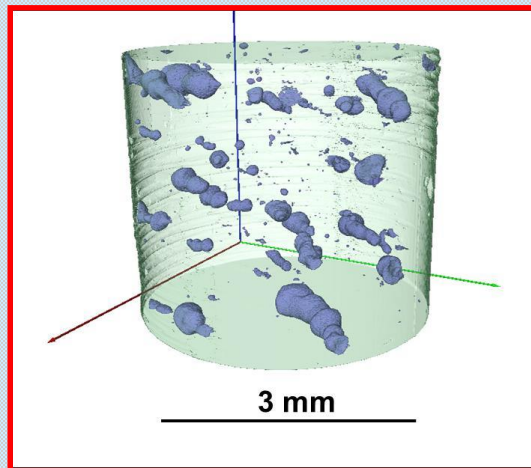
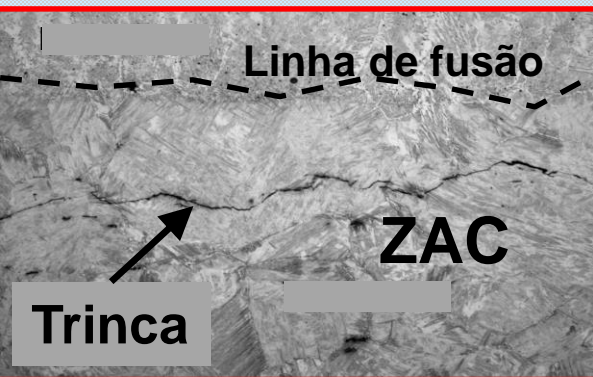
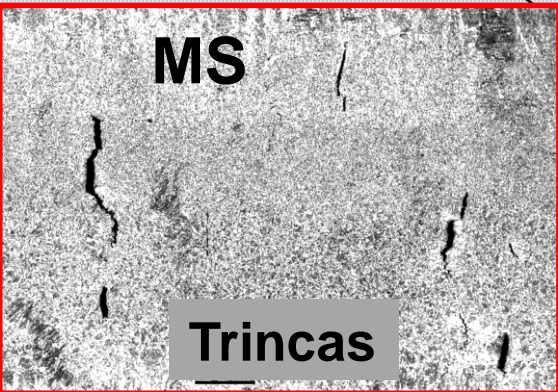
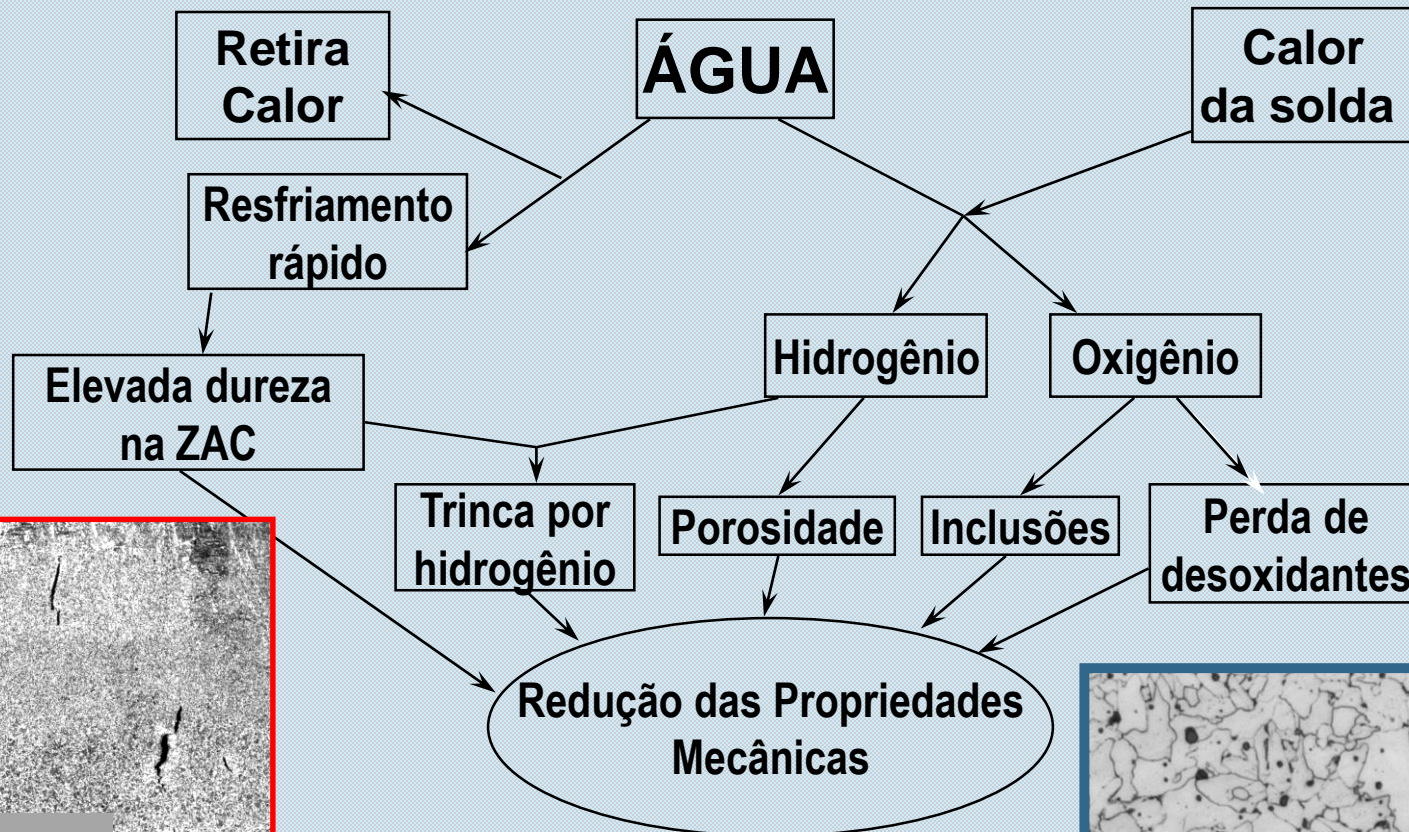
Eletrodo	Dureza	L.R. Mpa	Along %	Hdif ml/100g	Prof m	Trincas* N° /cm ²
BROCO	200	522	6,6	85	0,5	69
BROCO seco	-	803	30		Atmosf	
NAUTICA	221	513	6,0	89	0,5m	100
HYDROWELD	183	515	11,0	97	0,5	22
HYDROWELD (catálogo)	175	510	17,0		-	-
OK WETWELD 70	184	502	18,6	22	10	0
OK 41.10s	183	456	24,0	20	0,5	0

OK WETWELD 70 – Oxirutílico ESAB

OK 41.10s – Oxidante ESAB

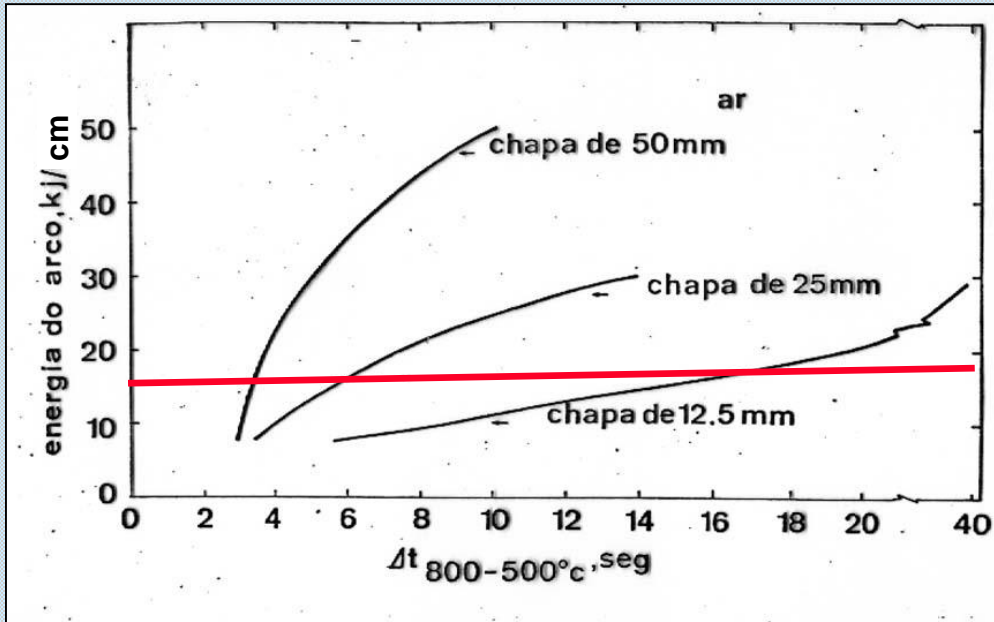
Os demais são rutílicos E6013 ou E7024

Efeitos do Meio Aquoso na Qualidade das Soldas

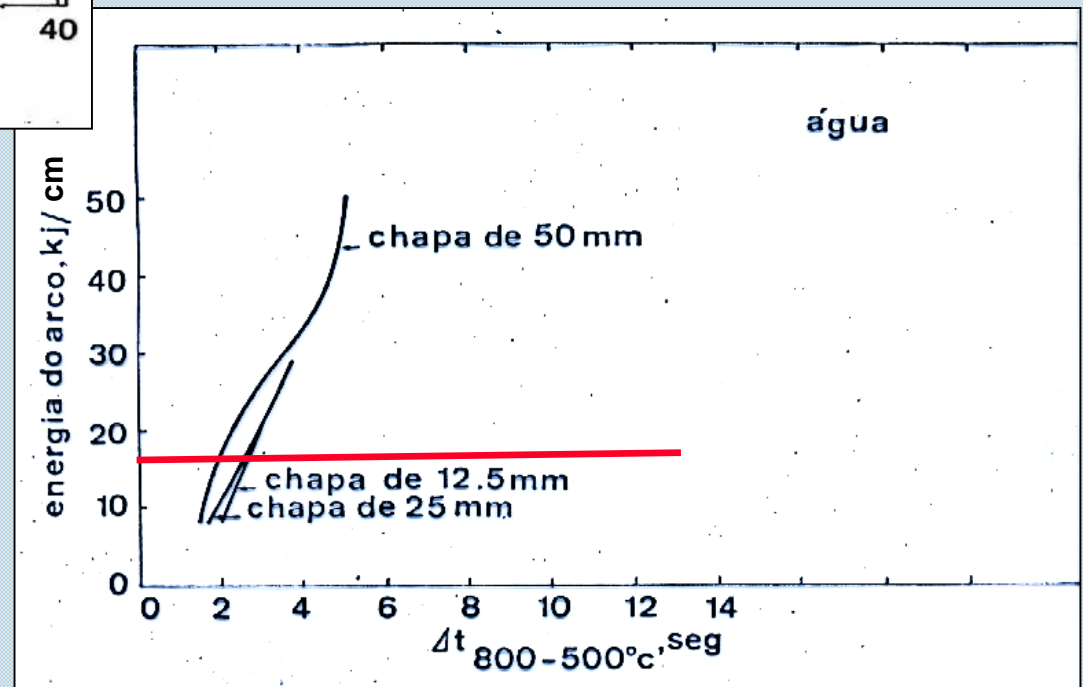


VELOCIDADE DE RESFRIAMENTO

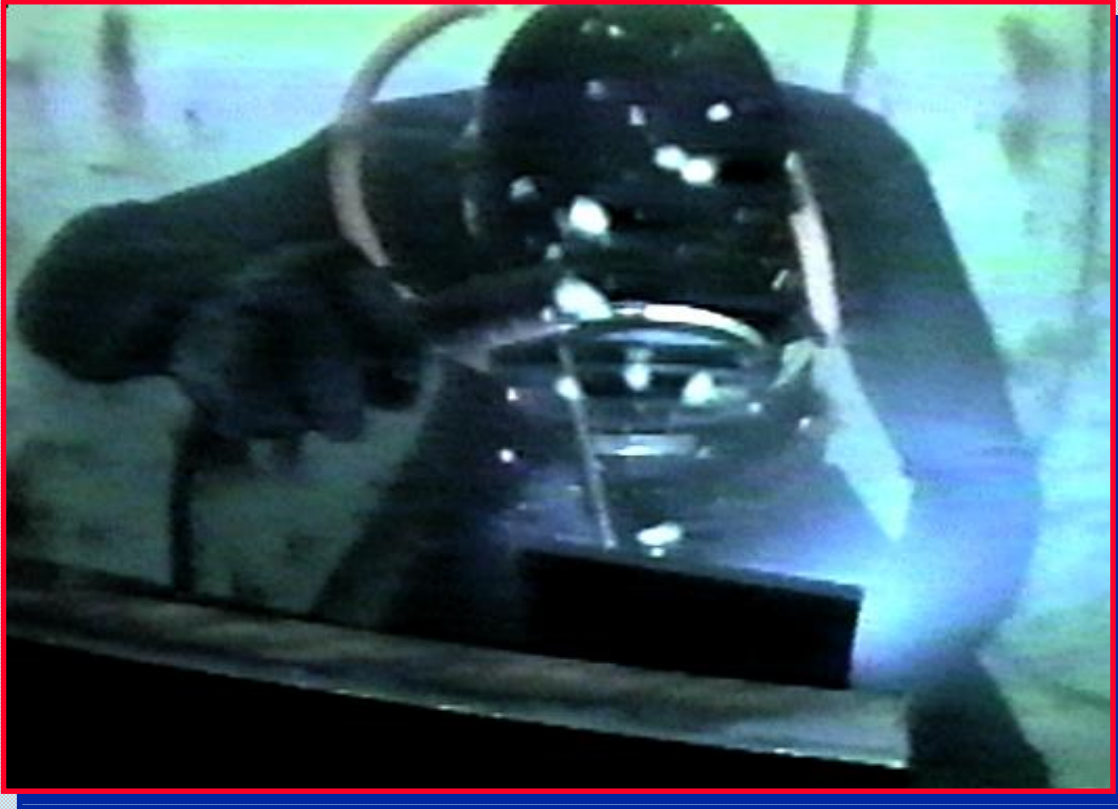
SOLDAGEM ATMOSFÉRICA



SOLDAGEM MOLHADA



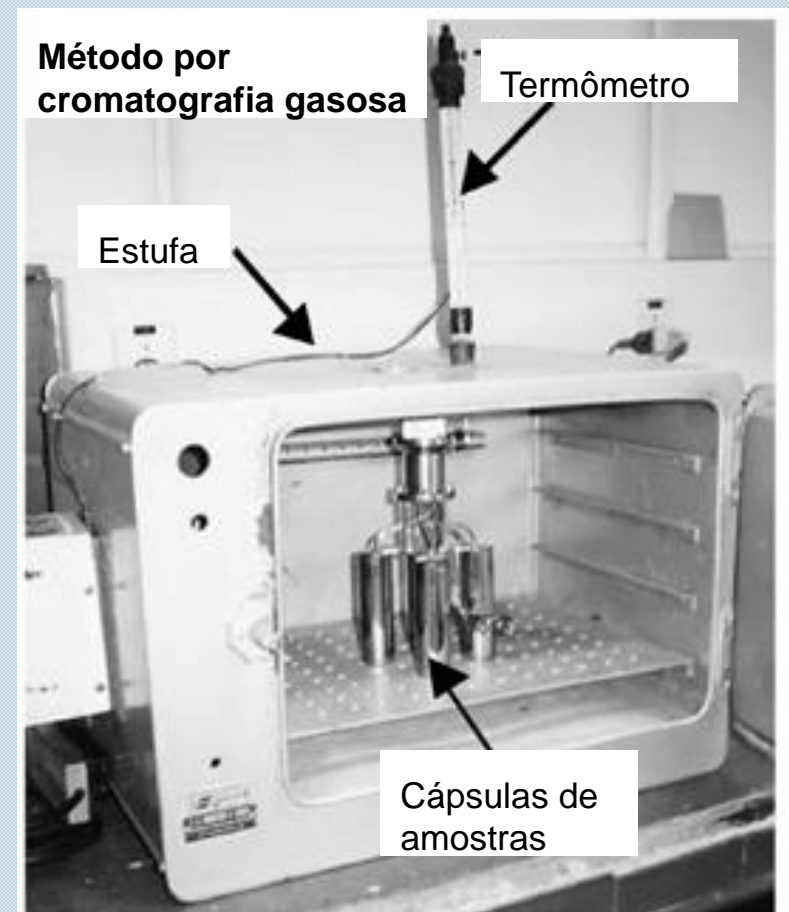
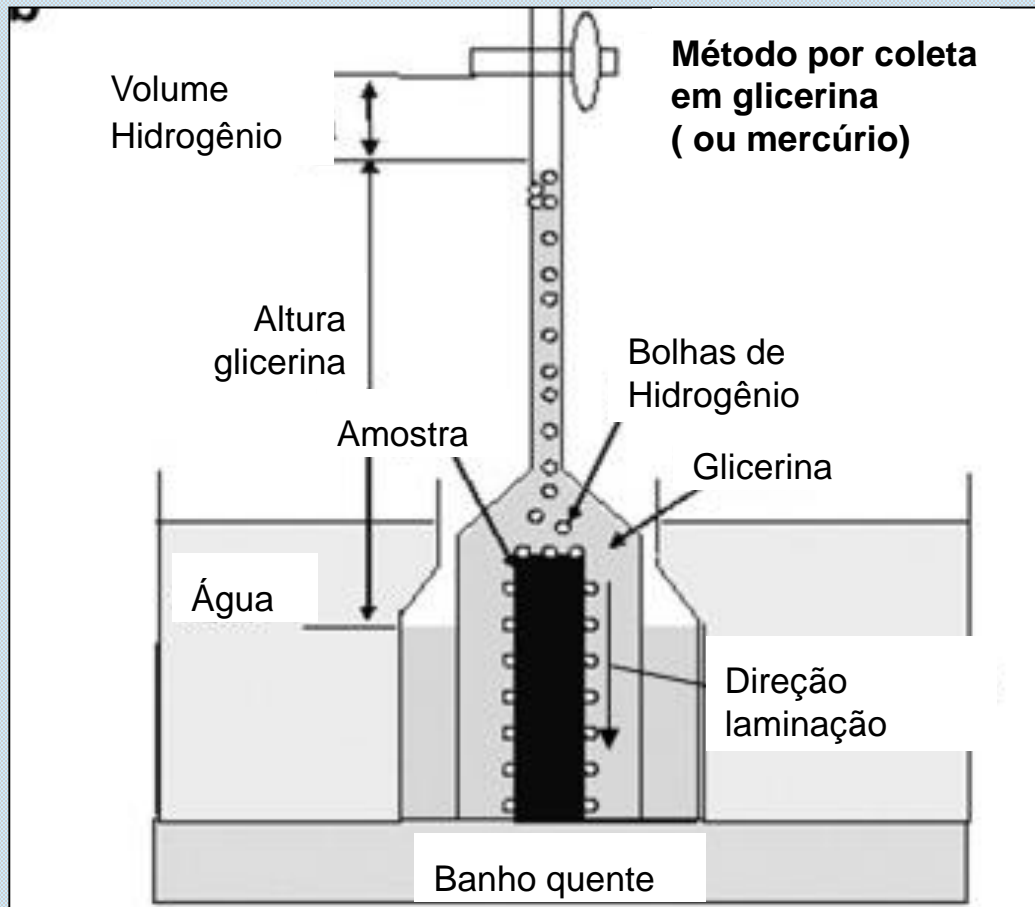
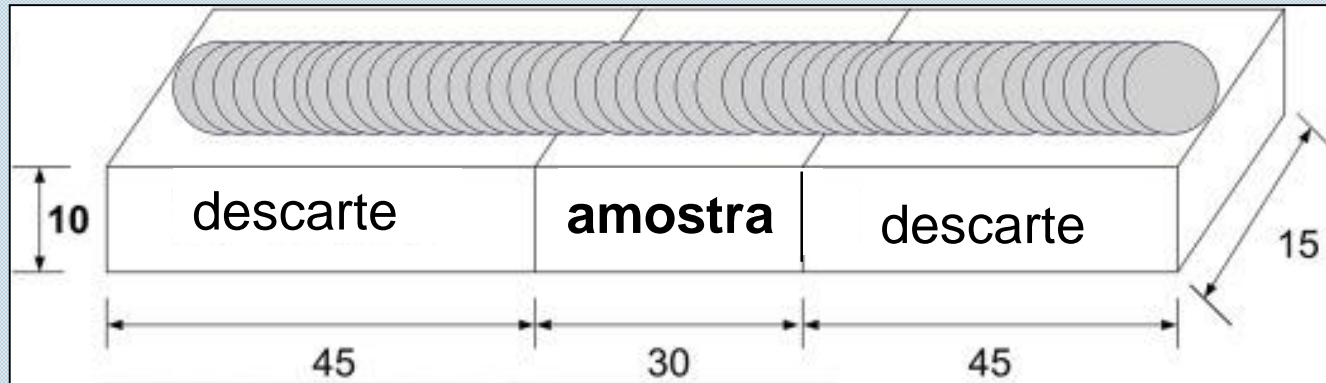
Absorção de Gases



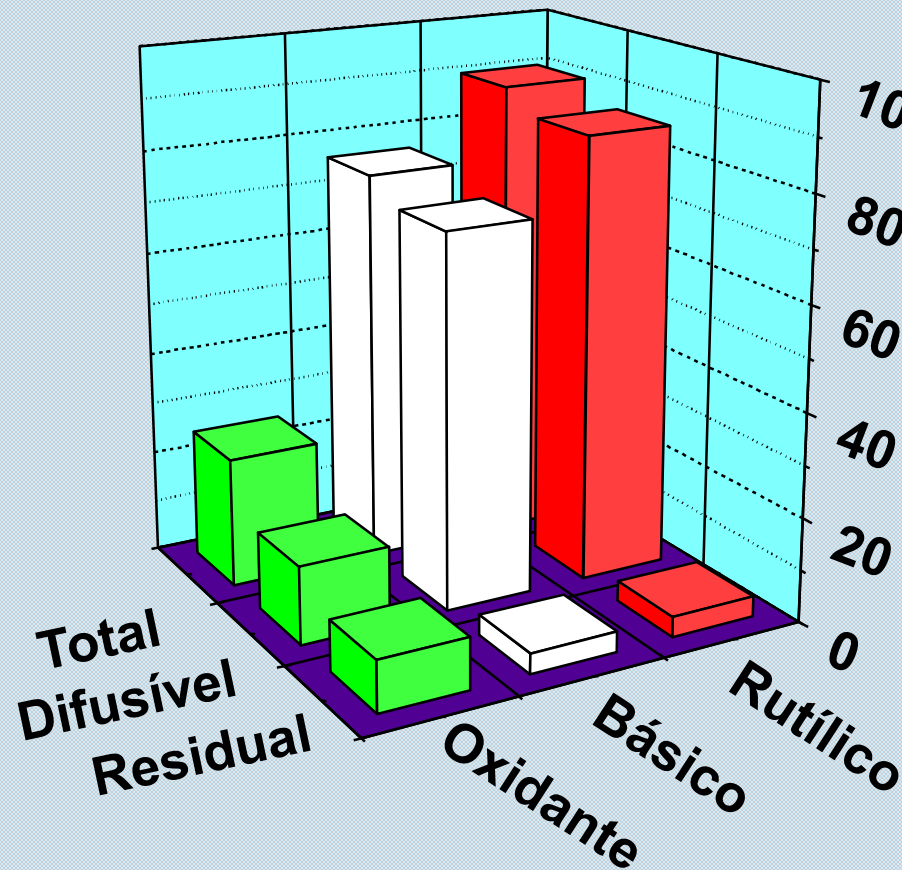
- poça fundida fica sempre coberta por bolhas de vapor
- no plasma o vapor se decompõe em hidrogênio e oxigênio
- oxigênio reage com desoxidantes ou com o próprio ferro
- hidrogênio é absorvido pelo metal líquido

A parte do hidrogênio total absorvido que escapa para a atmosfera nas primeiras 72 horas é definida como “Hidrogênio Difusível”.
A parte restante é definida como “Hidrogênio Residual”

Medição do Hidrogênio difusível



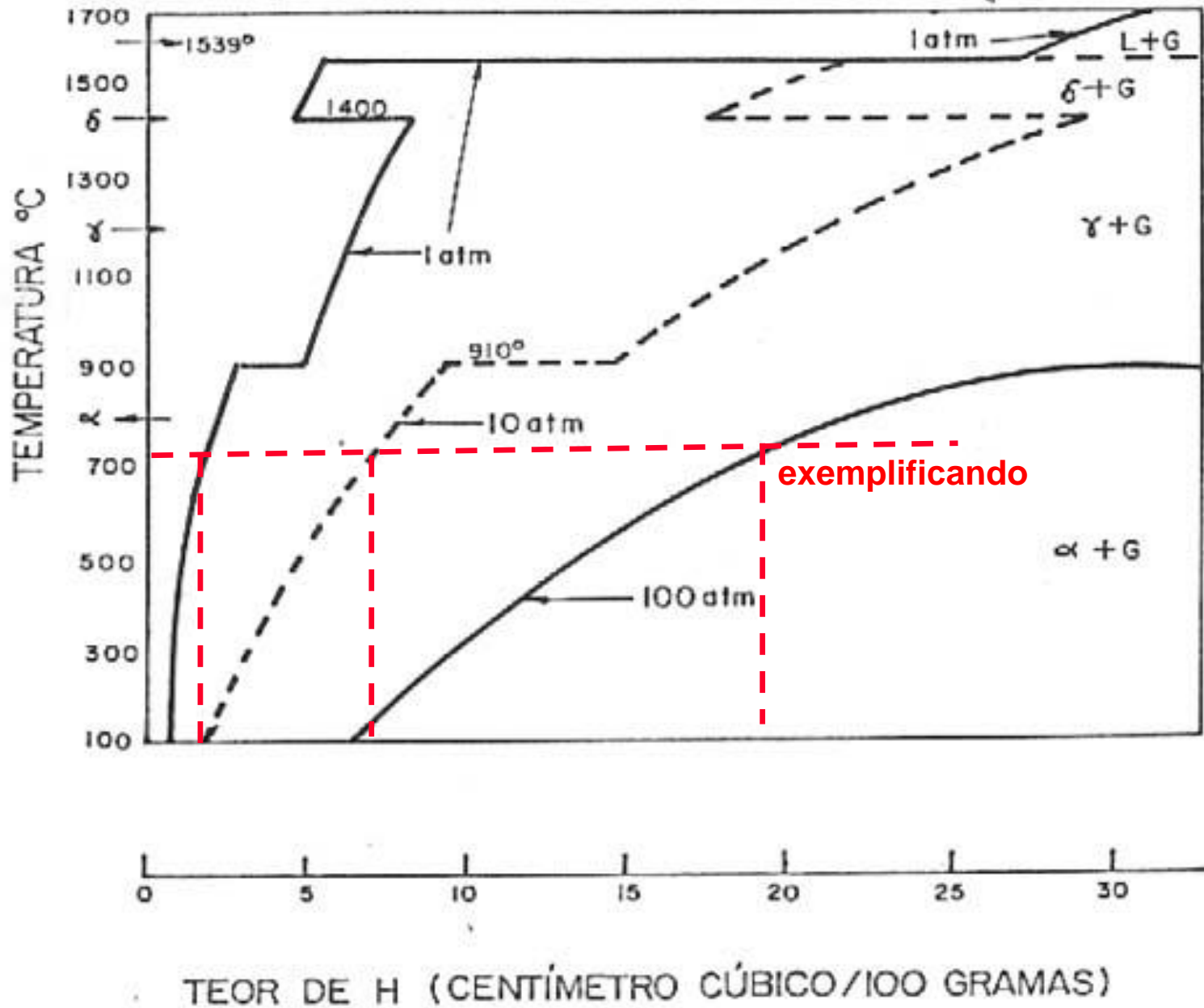
Teor de Hidrogênio em Soldas Molhadas



- O teor de hidrogênio das soldas molhadas varia com o tipo de revestimento do eletrodo
 - Eletrodos oxidantes depositam soldas com o mais baixo teor de hidrogênio difusível
- (Gooch, 1983)

Eletrodos rútilicos – melhores em aspectos operacionais: remoção de escória, aspecto do cordão, estabilidade do arco

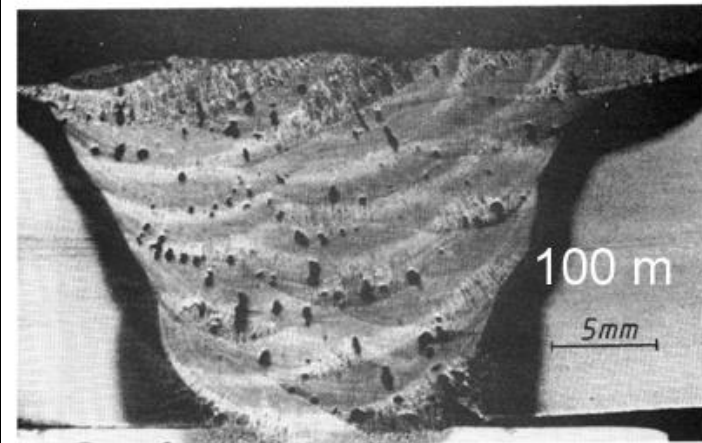
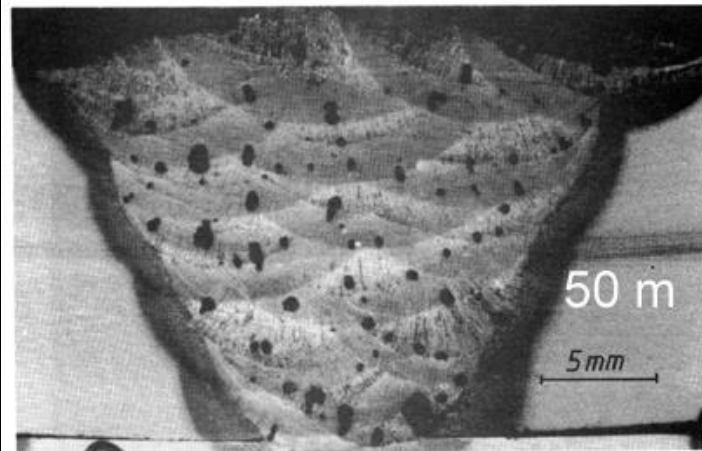
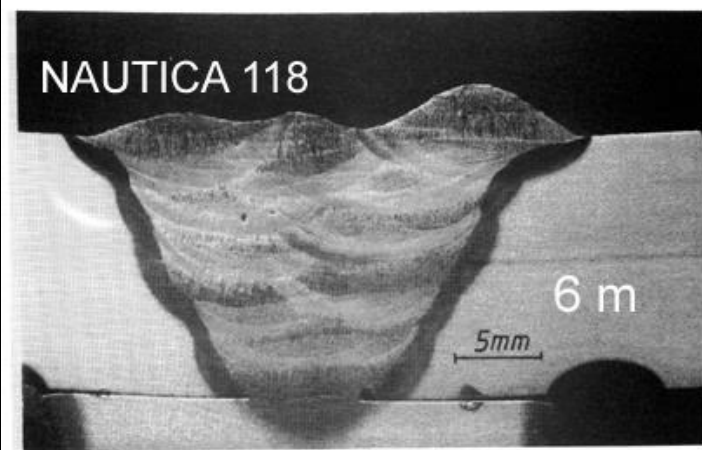
Diagrama Fe-H



Porosidade em Soldagem Molhada

Influência da Profundidade de Soldagem

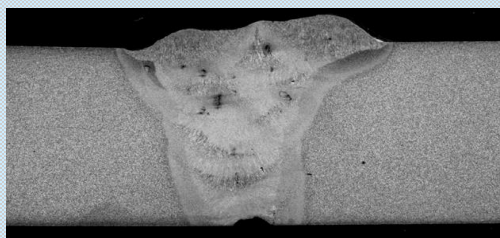
- A porosidade no metal de solda aumenta com o aumento da profundidade de soldagem
- o gás contido nos poros é constituído principalmente de hidrogênio



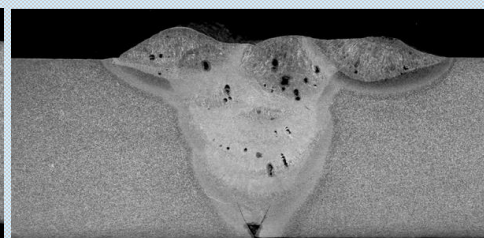
Projeto CSM

testes a 10m Porosidade testes a 20m

Rutílico
o



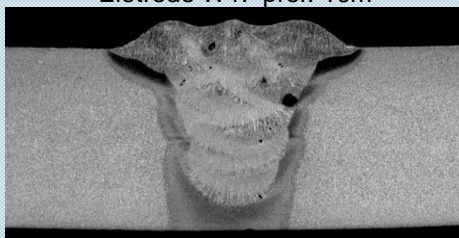
Eletrodo W1. prof: 10m



Eletrodo W1. prof: 20m

W1

Rutílico
o



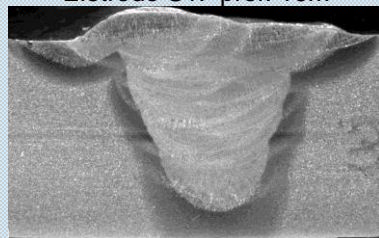
Eletrodo S1. prof: 10m



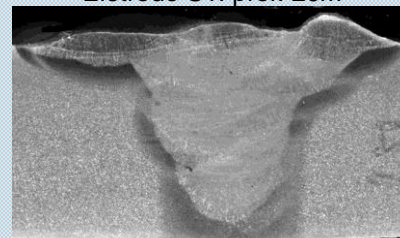
Eletrodo S1. prof: 20m

S1

Oxirutílico
o



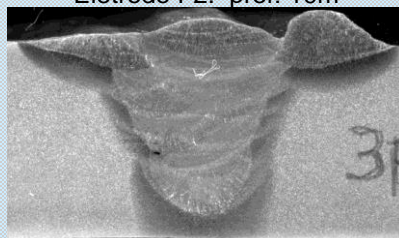
Eletrodo F2. prof: 10m



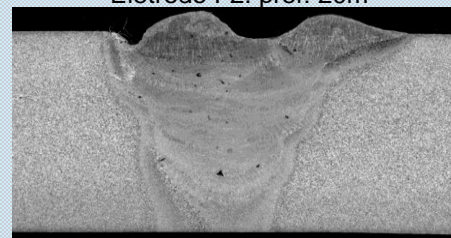
Eletrodo F2. prof: 20m

F2

Oxirutílico
o



Eletrodo F4. prof: 10m



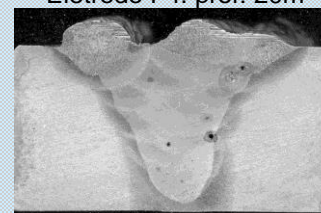
Eletrodo F4. prof: 20m

F4

Oxidante



Eletrodo A1. prof: 10m

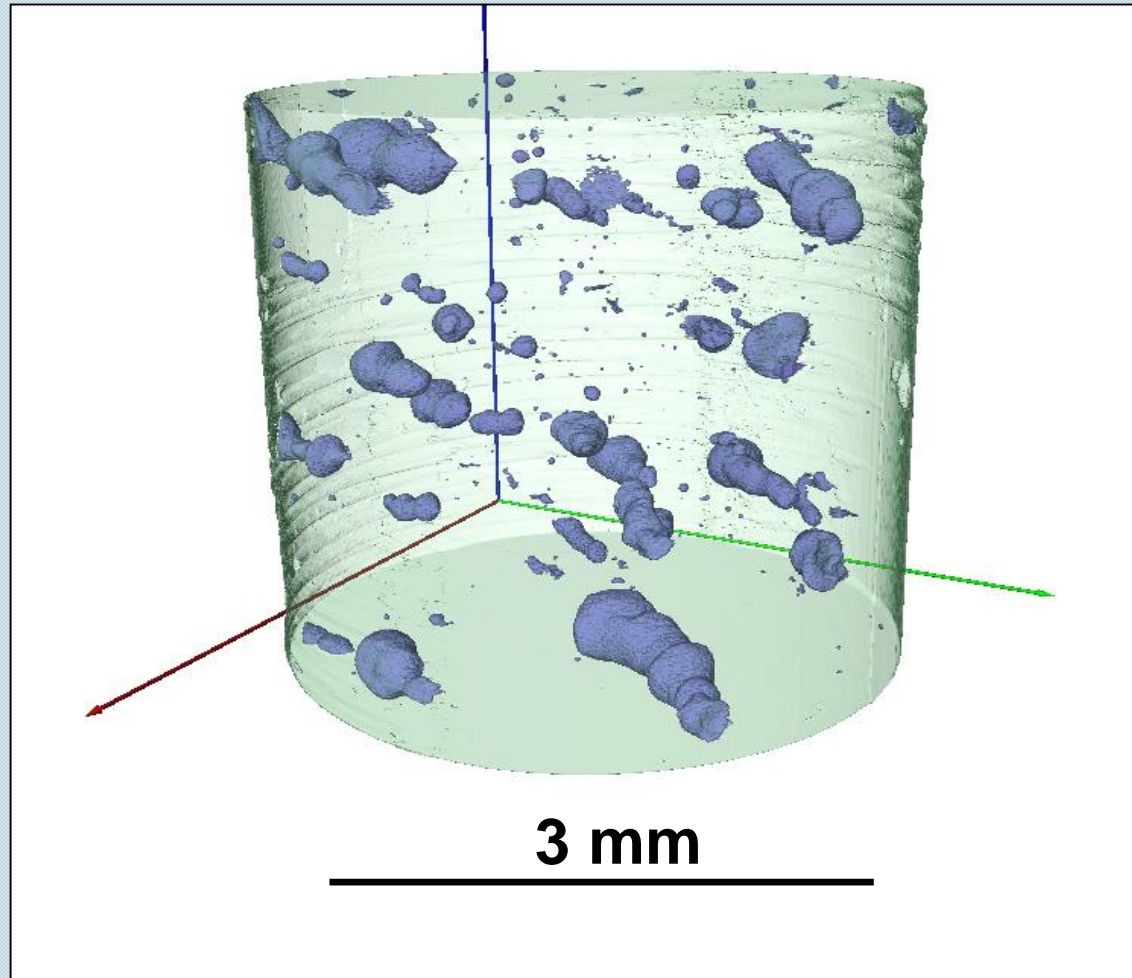


Eletrodo A1. prof: 20m

A1

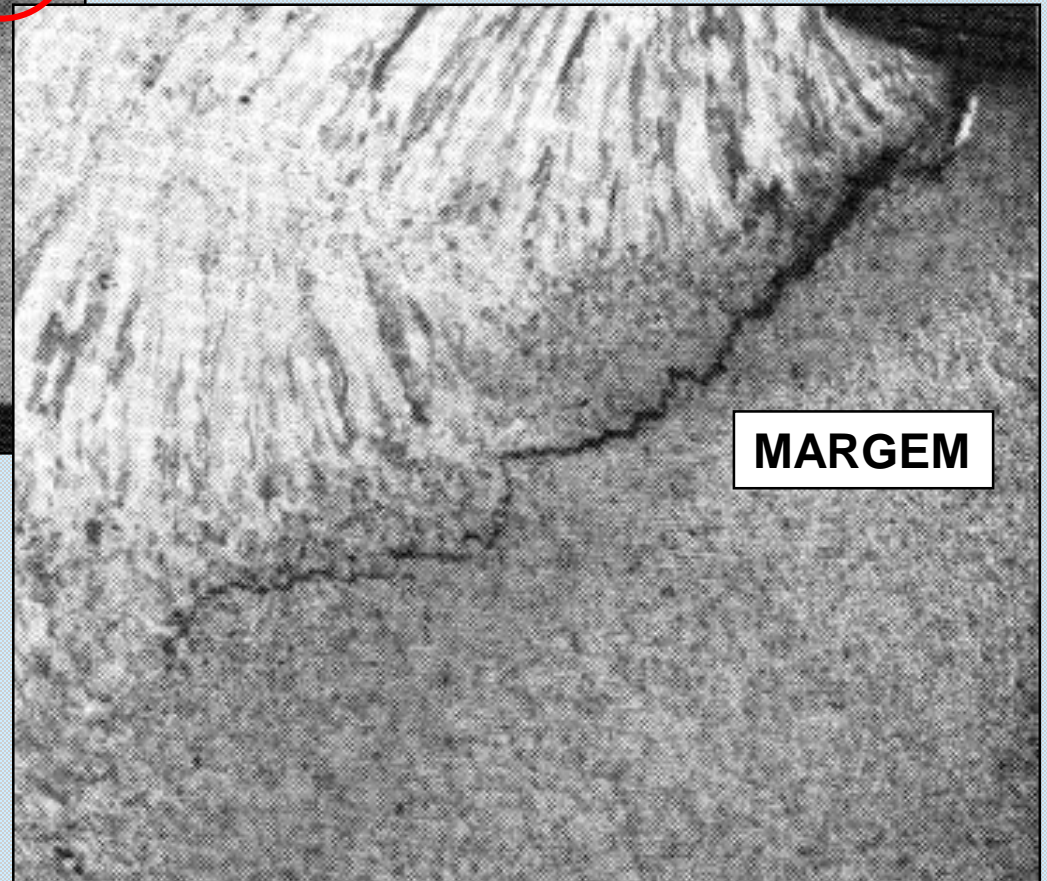
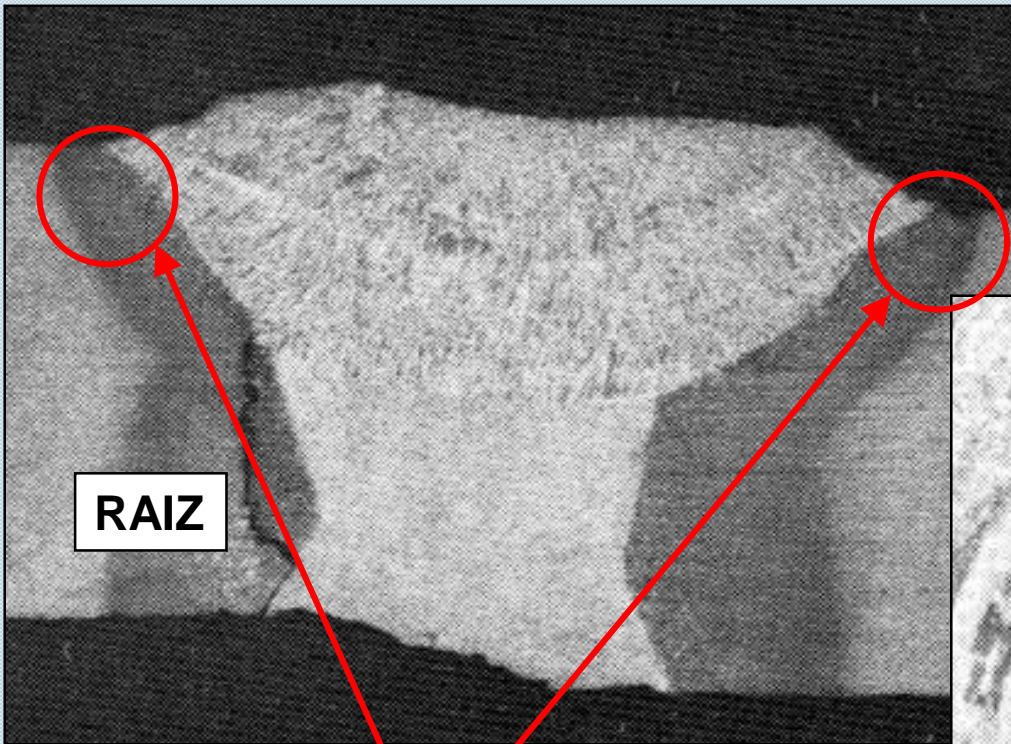
Porosidade em Soldagem Molhada

Microtomografia de Raios X



Fissuração Induzida por Hidrogênio

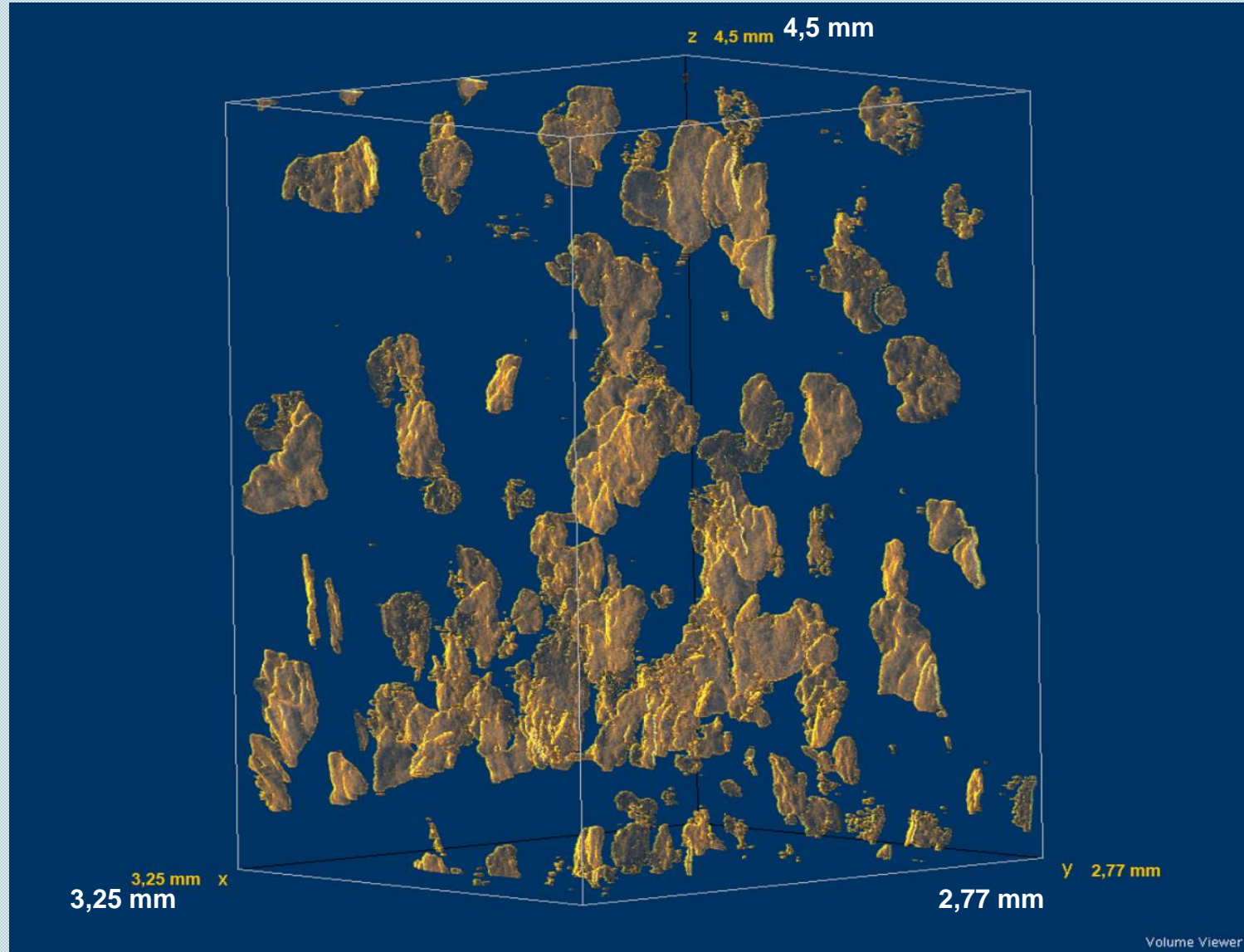
Trincas na zona afetada pelo calor (ZAC ou ZTA)



Nestas regiões da ZAC de aços ferríticos a dureza pode atingir valores muito superiores a 325 HV que é o máximo admissível em juntas soldadas classe A

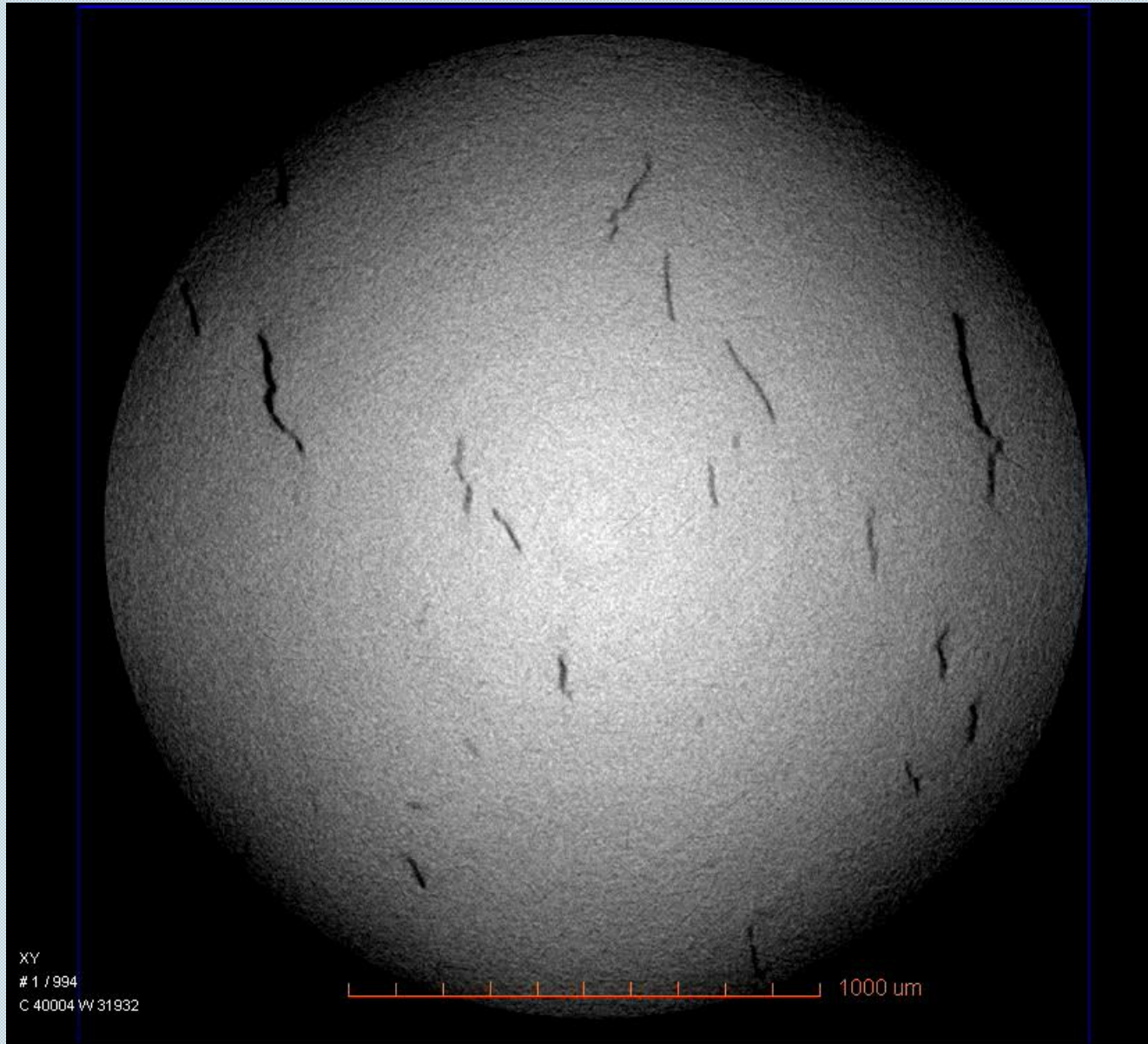
Trincas no metal de solda

microtomografia de Raios X
Eletrodo comercial rutílico E 6013
Prof : 0,5m - Alongamento: 6%



Trincas no metal de solda

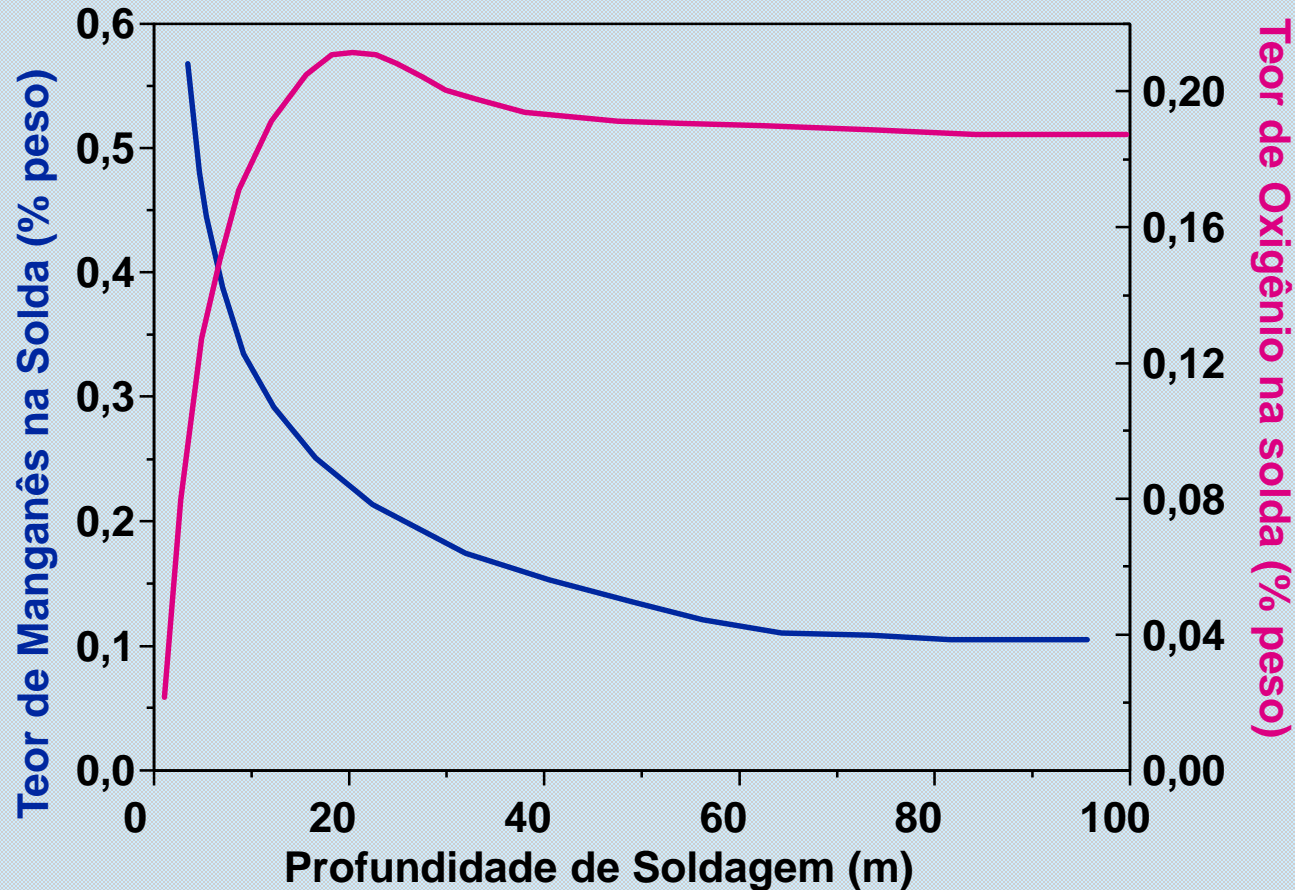
Microtomografia de Raios X
Eletrodo comercial rutílico E 6013
Prof : 0,5m - Hdif = 90 ml/100g



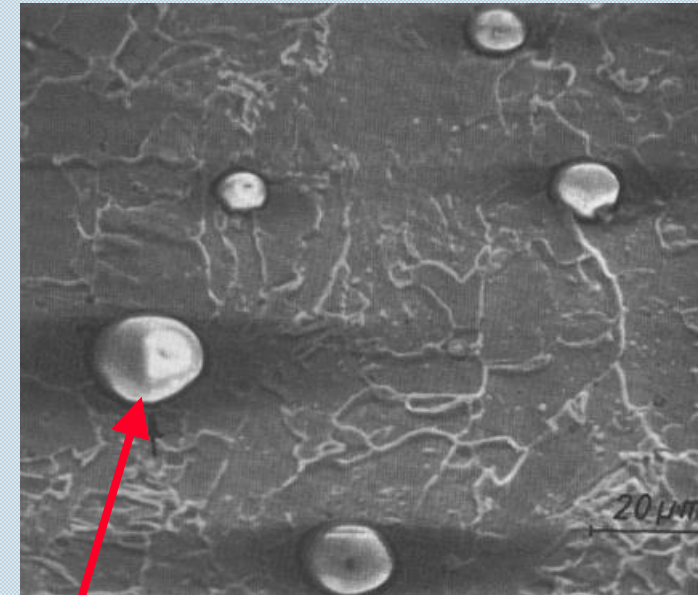
Absorção de Gases

Aumento do teor de oxigênio

e perda de elementos de liga desoxidantes tais como Si e Mn



(Ibarra, Grubbs e Olson, 1987)



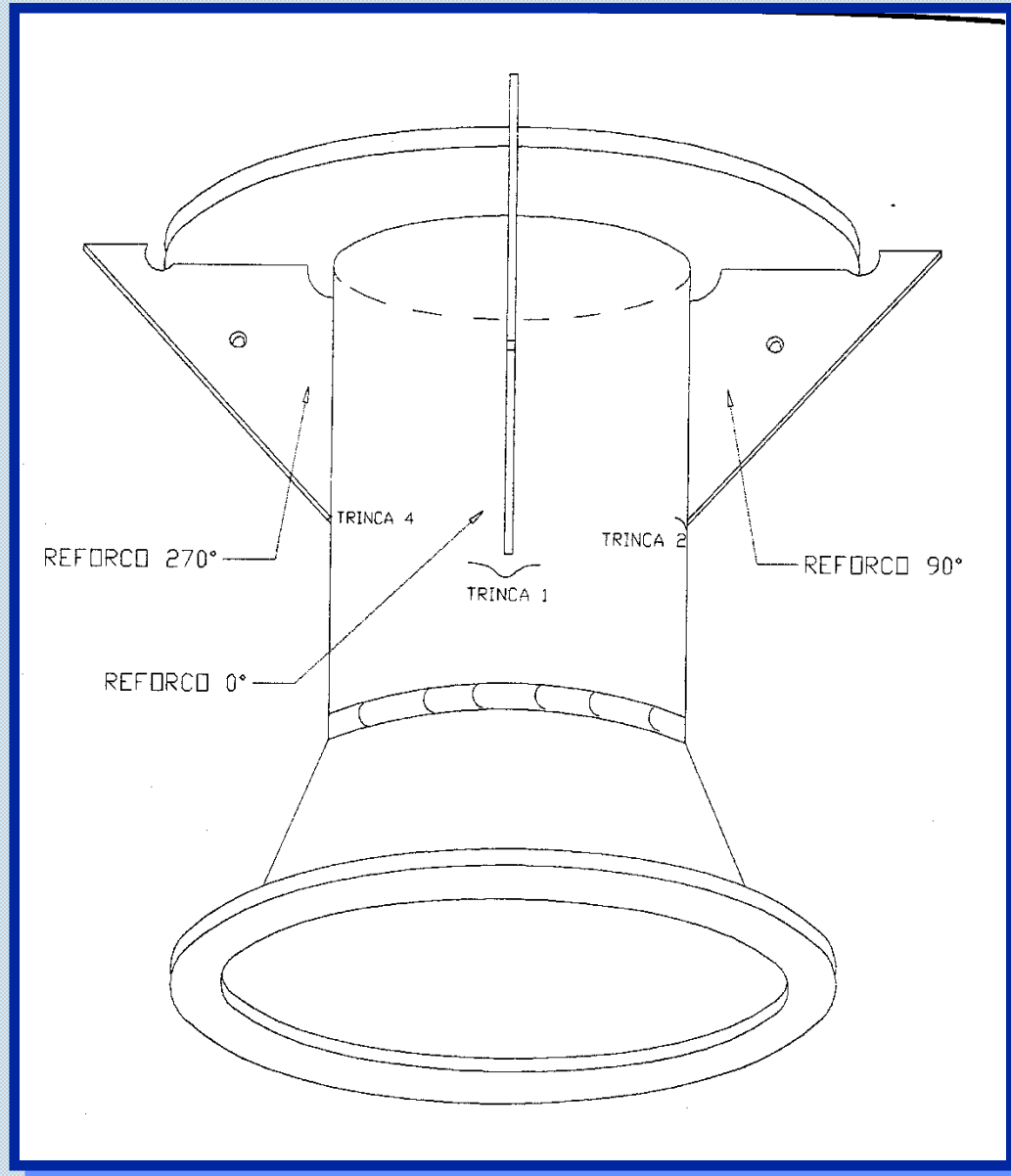
Aumento da quantidade de óxidos de Al, Si, Mn, Fe, Ti

ALICAÇÕES

MONOBÓIA DE MARIMBÁ OUTUBRO 1996

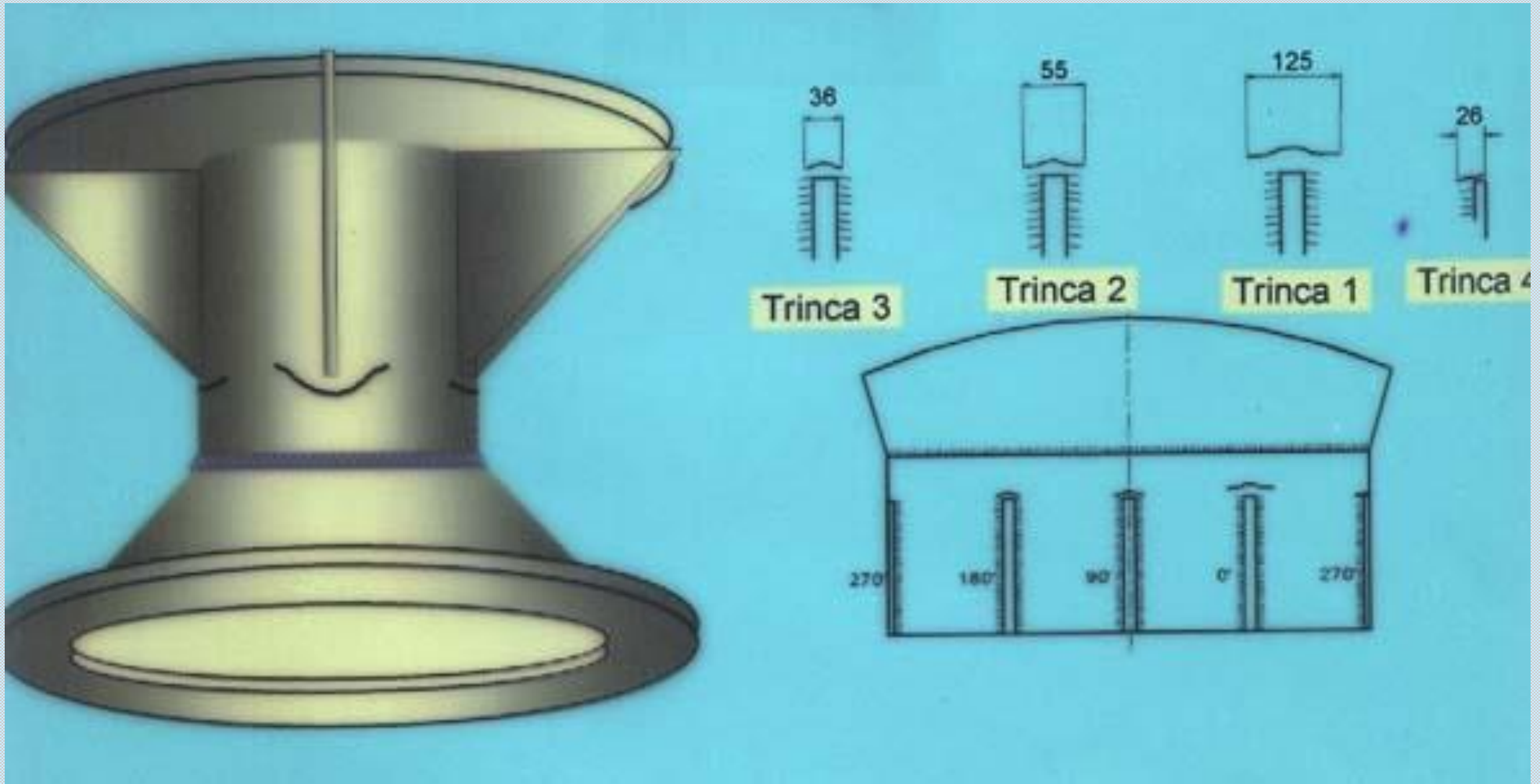


MONOBÓIA DE MARIMBÁ



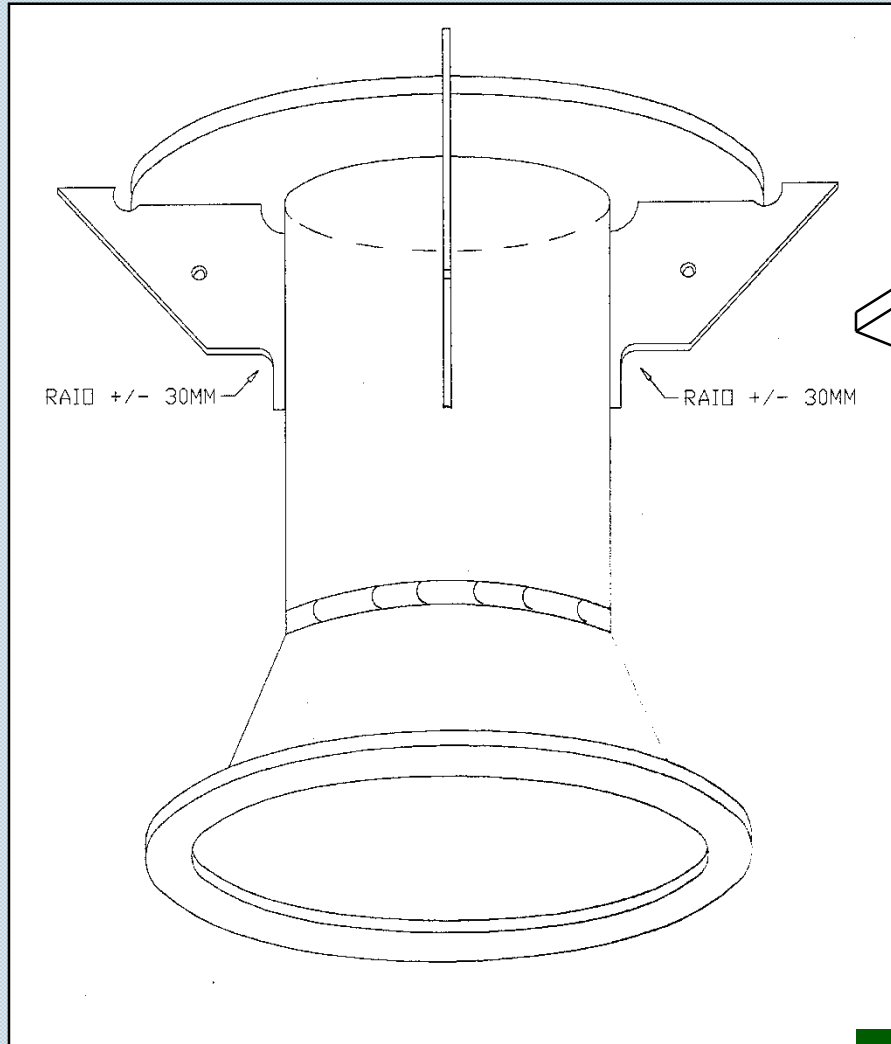
- trinca passante foi detectada por pequeno vazamento de óleo
- causa: fadiga
- inspeção revelou presença de outras trincas

O PROBLEMA: TRINCAS DE FADIGA

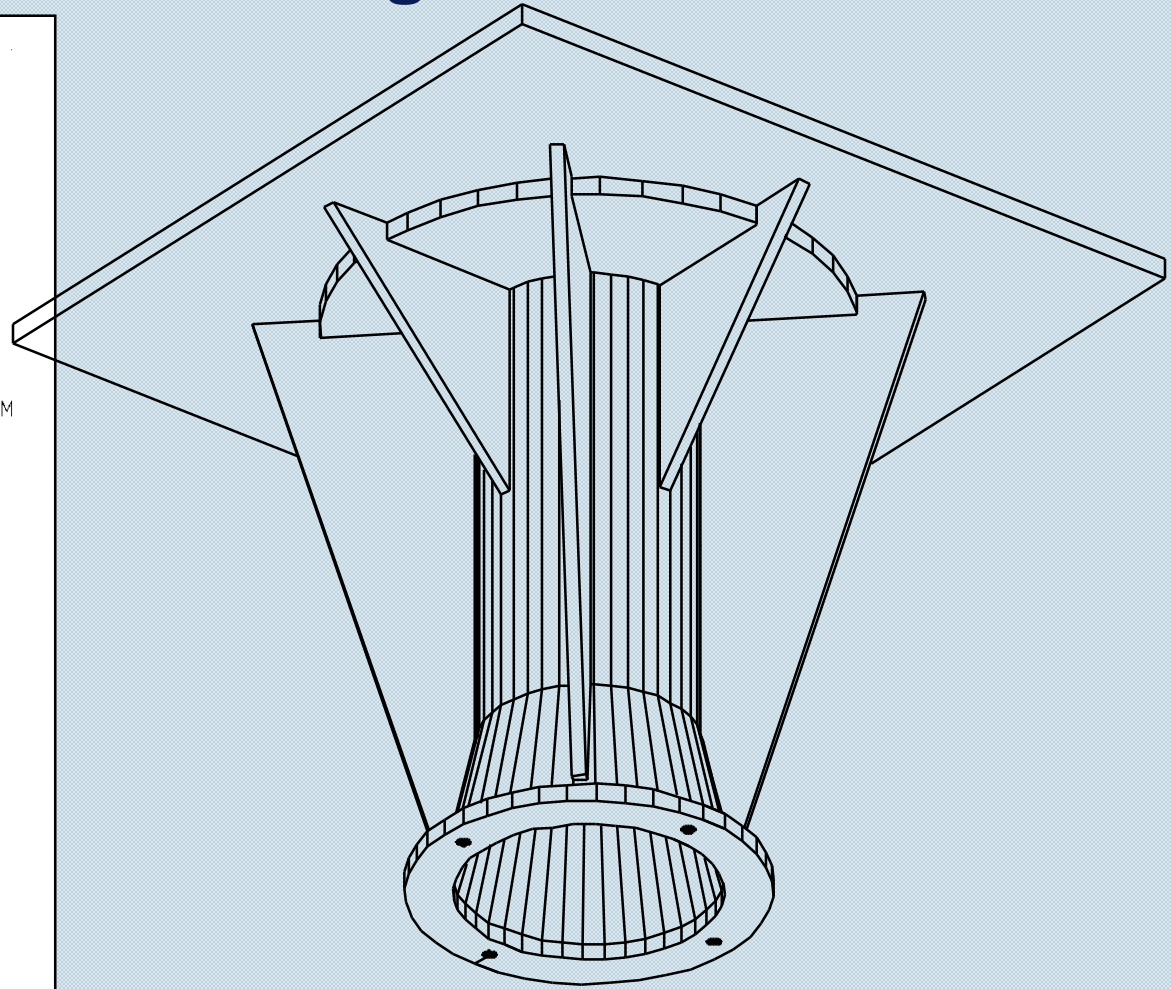


Solução: Reparos e reforços com soldagem molhada

Primeira Fase



Segunda Fase

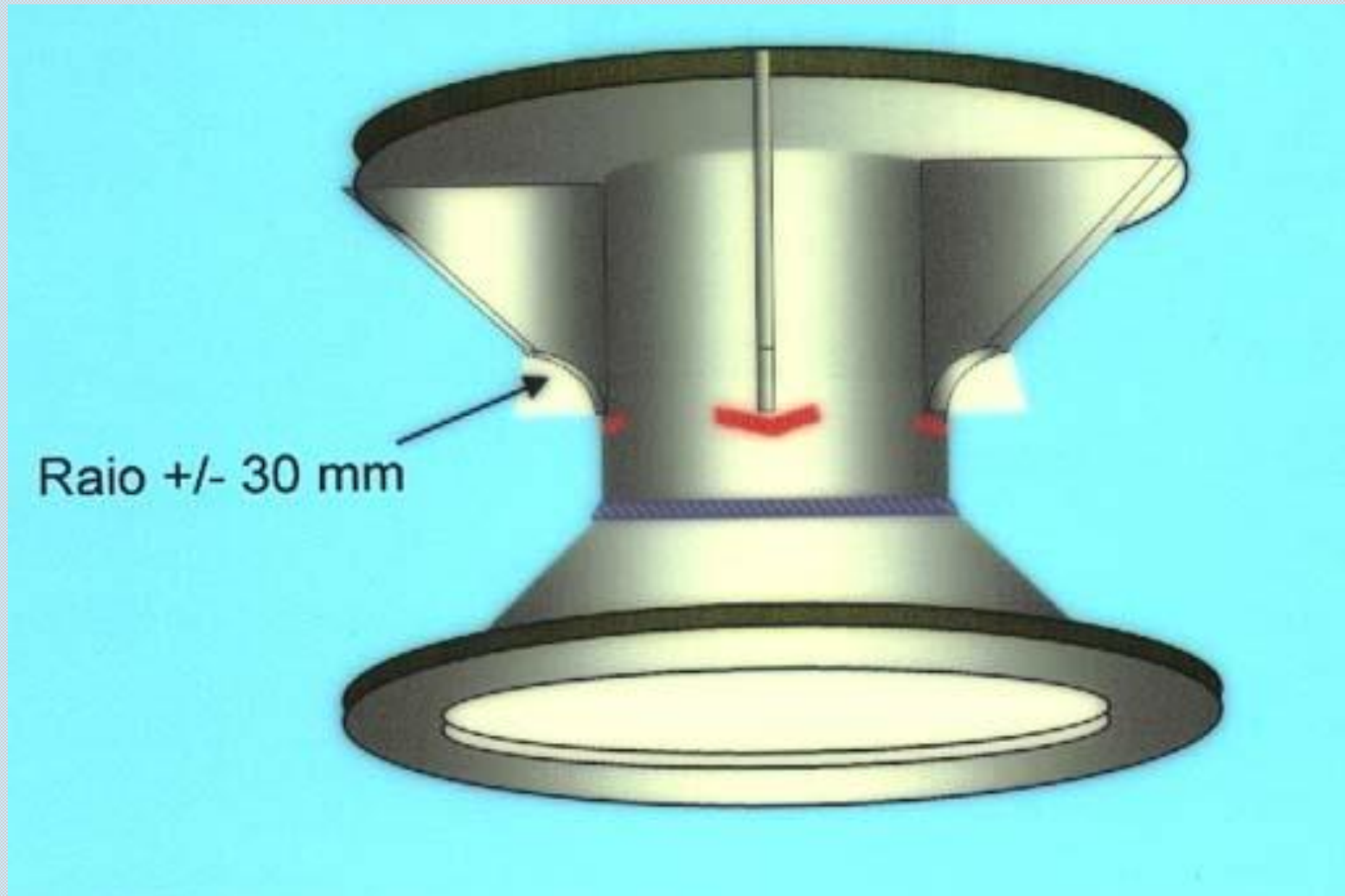


benefício: US\$ 6,5 milhões

PROCEDIMENTO DE REPARO – FASE 1

1 – Adoçamento dos engraxadores

2 – Reparos com solda e martelamento

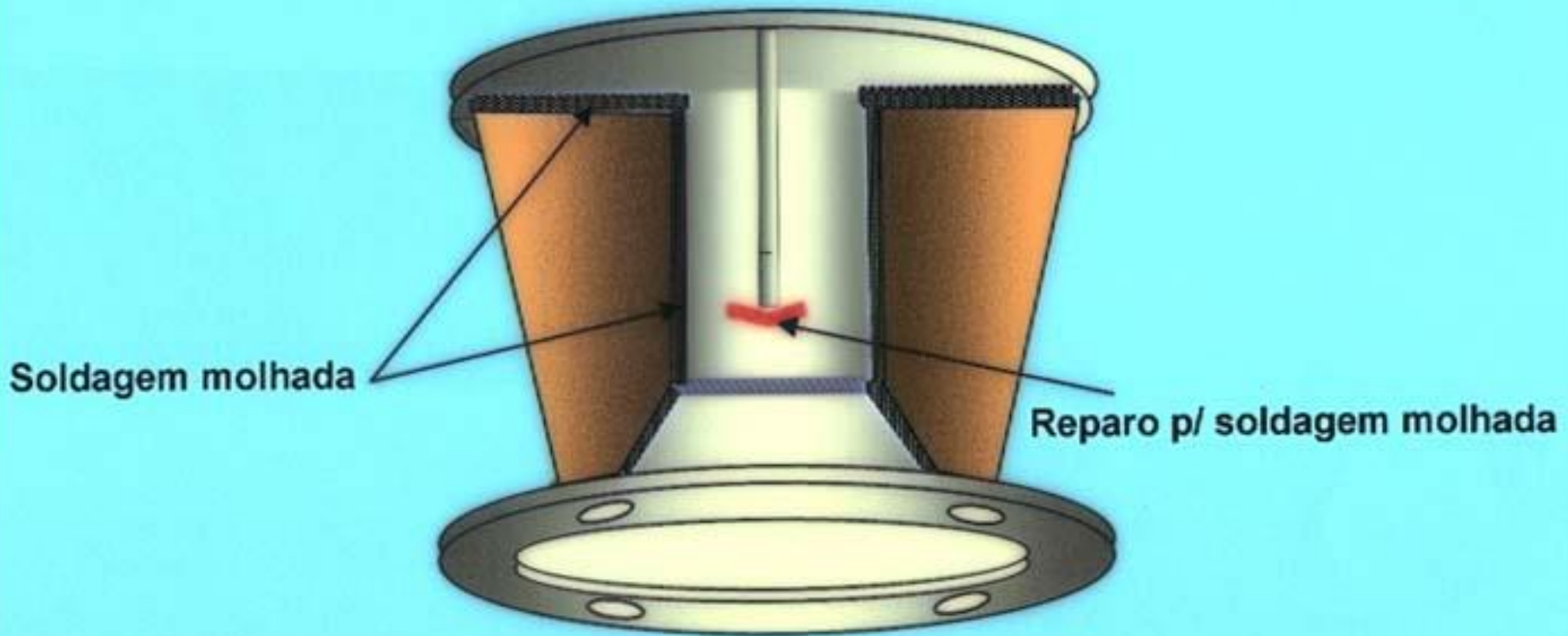


DETALHES DOS REPAROS POR SOLDAGEM MOLHADA



PROCEDIMENTO DE REPARO – FASE 2

Soldagem de novos enrijecedores



Aplicações – Golfo do México

Mais de 30 reparos por soldagem molhada devido a furacões



Main Pass 281 – Structure Damaged by Hurricane Ivan, 2004

- Installed in 1998
- Four pile design
- Water depth is 310 ft
- Extent of Damage
 - 2 - 100% Leg Breaks
 - -10 ft
 - -65 ft
 - 2 Buckled / Broken VD / X Braces
 - Both at -40 ft

Repairs were 60% Complete when Hurricane Katrina struck platform



Aplicações – Golfo do México



Main Pass 281 – Structure Damaged by Hurricane Ivan, 2004

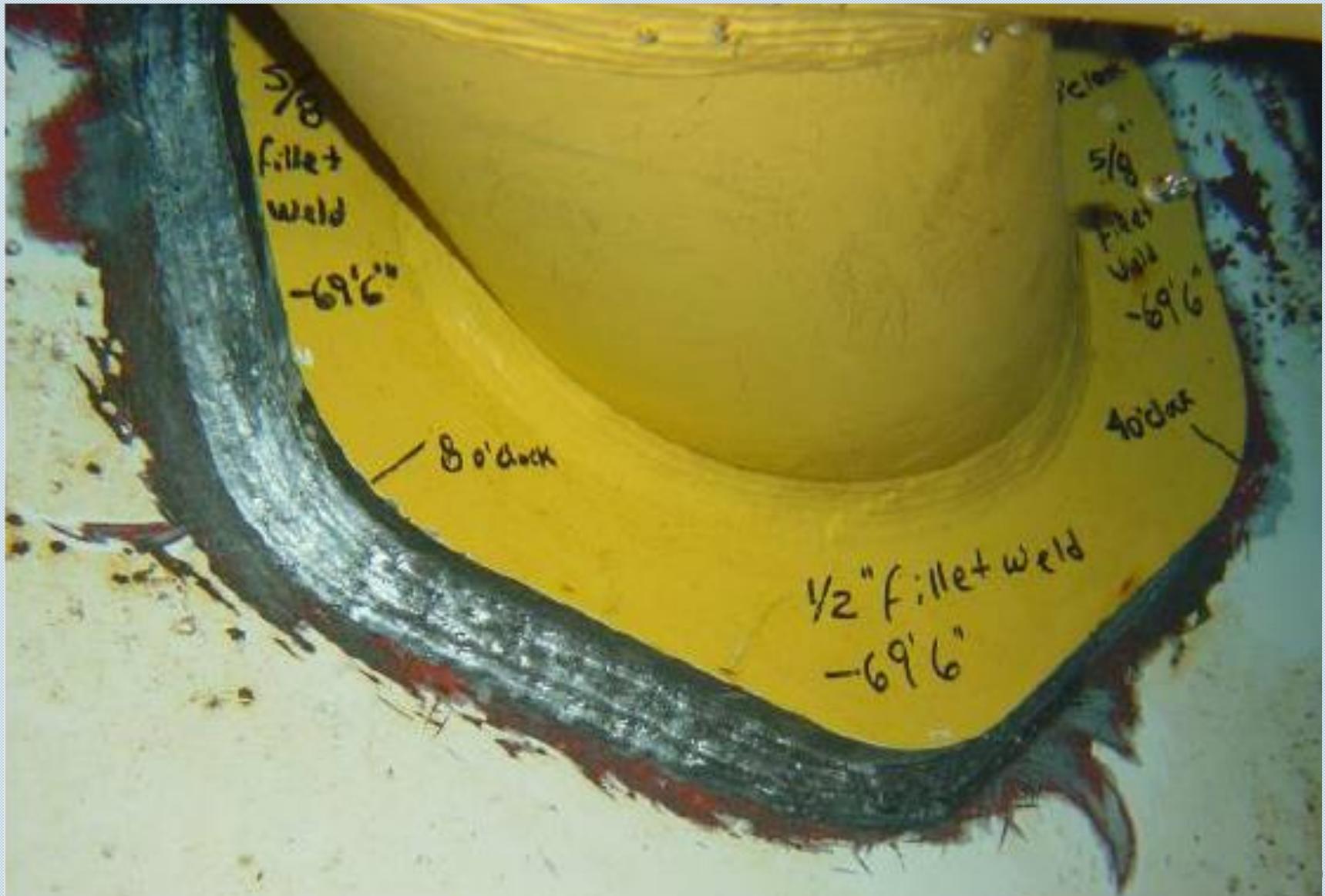
Reforço estrutural com luvas



Aplicações – Golfo do México



Main Pass 281 – Structure Damaged by Hurricane Ivan, 2004



Desenvolvimentos Recentes – 2007 a 2017 PUC-Rio, UFMG, ESAB, PETROBRAS

Desenvolvimento de eletrodo oxi-rútílico OK WETWELD 70

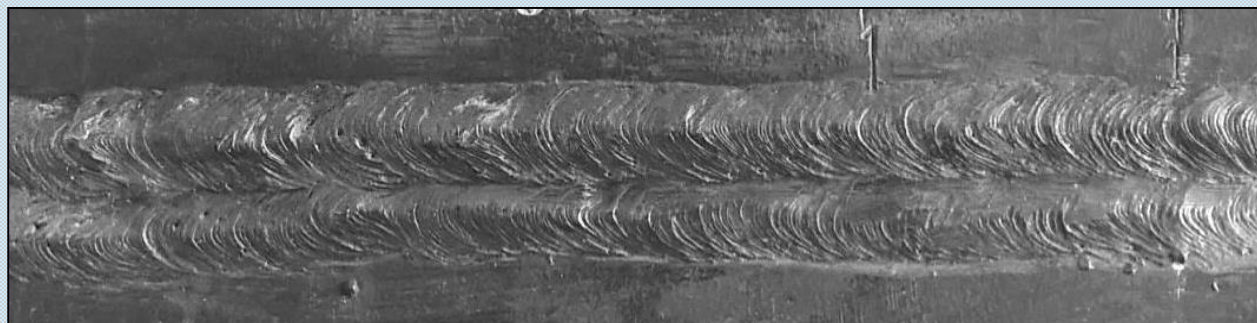
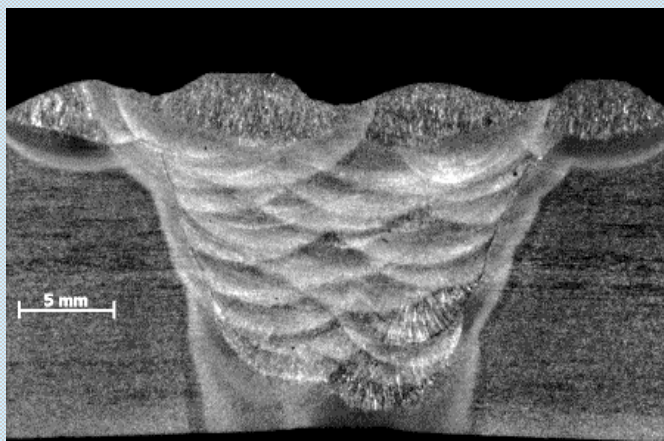
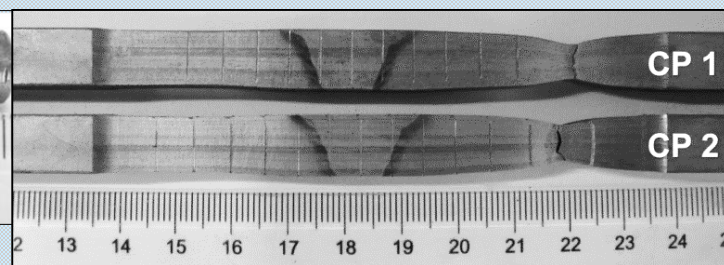
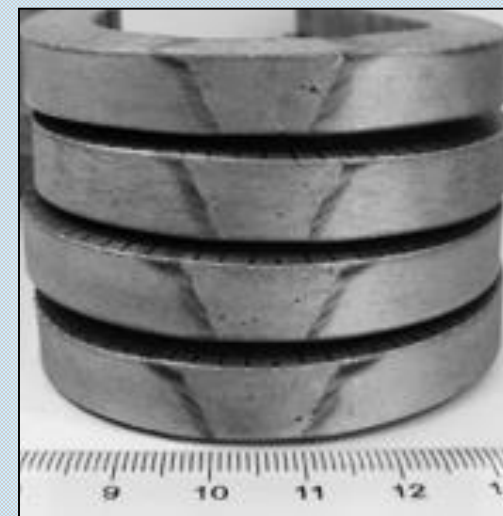
Aprovação em classe A AWS D3.6M:2017

Radiografia	Ap
Macrografia	Ap
Max. Dureza	Ap
Alongamento MS	Ap
Limite Resist tração MS L.R.	Ap
Limite de escoamento L.E.	Ap
Resist. Tração Transversal	Ap
Charpy 0°C	Ap
Dobramento 180°	Ap

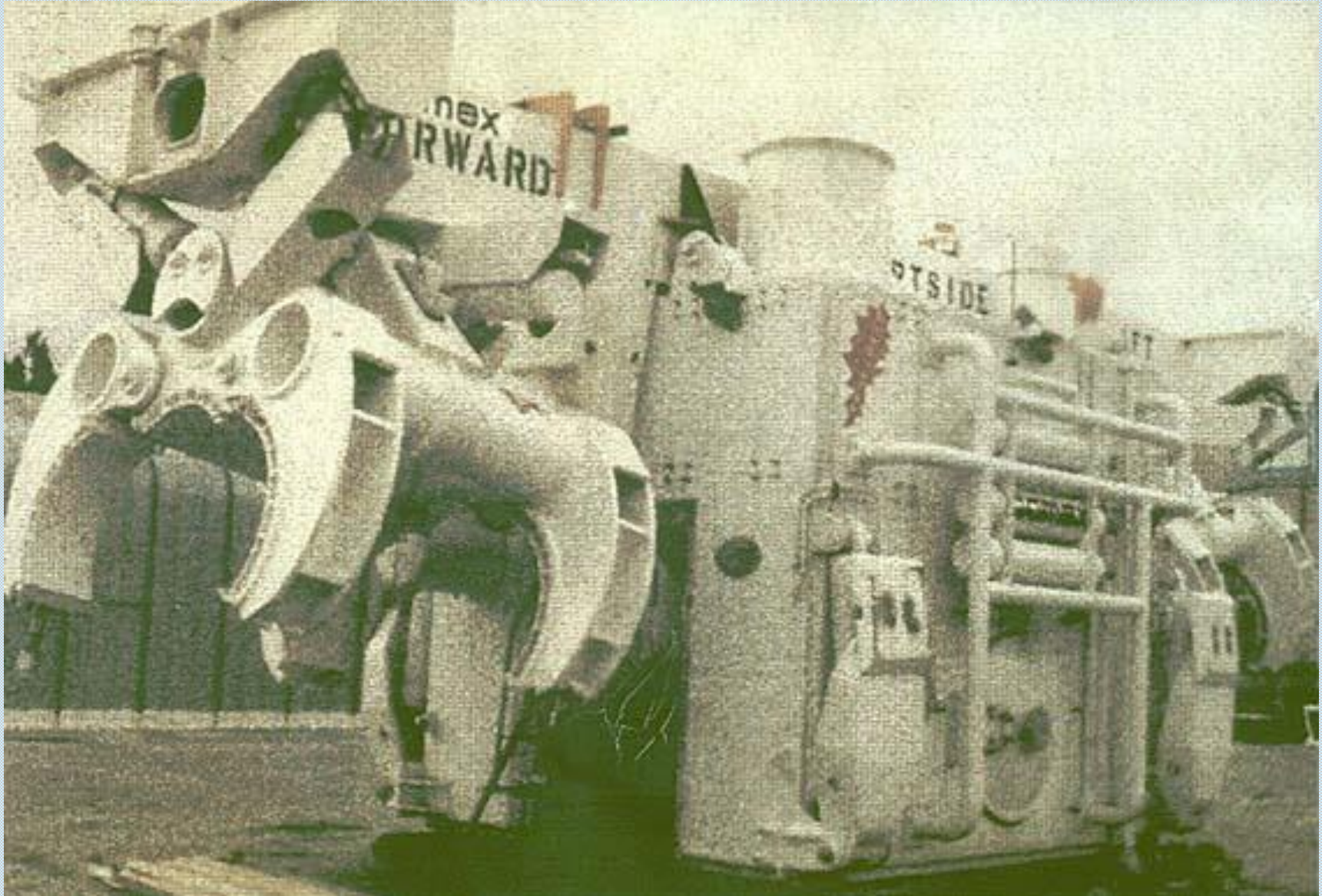
Pré-qualificação em laboratório Prof: 0m – posição plana - Mecanizada
Metal de base ASTM A131-8 gr A esp: 16mm %C = 0,17 CE = 0,30

Resultados de testes

Hdif (ml/100g)	20
Porosidade (%)	0,1
Charpy °C (J)	50,7
L.E. (MPa)	428
L.R. (MPa)	477
Alongamento MS (%)	20



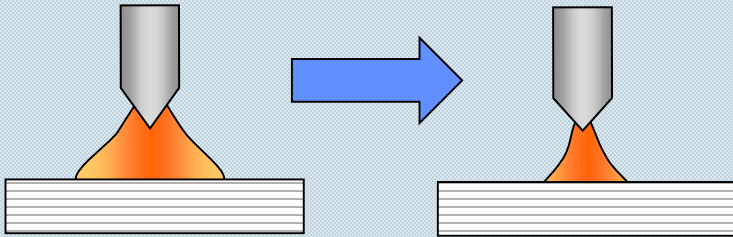
SOLDAGEM HIPERBÁRICA SISTEMA PARA SOLDAGEM DE DUTOS



SOLDAGEM HIPERBÁRICA INFLUÊNCIAS DA PRESSÃO

Processo

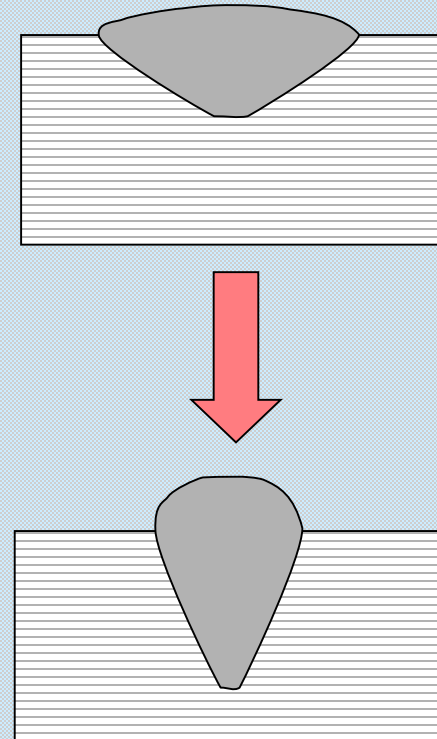
Constricção do arco
Instabilidade do arco



Metal de solda

Maior absorção de gases
na poça de fusão

Geometria do
Cordão de
solda



Soldagem Hiperbárica a Seco em Águas Rasas com atmosfera de ar comprimido



SOLDAGEM HIPERBÁRICA

SOLDAGEM EM CÂMARA HIPERBÁRICA COM ATMOSFERA DE AR COMPRIMIDO OU GASES ESPECIAIS

Aplicável a todos os processos com algumas alterações em relação aos parâmetros das soldas na superfície (ao ar)

Atende facilmente classe A (AWS D3.6)

Largamente empregada e testada

Custos muito superiores à soldagem molhada

SOLDAGEM HIPERBÁRICA

Soldagem em câmara hiperbárica com misturas gasosas (30m a 300m)

Processos empregáveis: Eletrodos revestidos, TIG, MIG/MAG e Arame Tubular

Forte influência da pressão no arco elétrico

Construção

Instabilidade

Deflexão

Aumento da densidade de corrente

Aumento da tensão do arco

Aumento da penetração

Redução da largura do cordão

Aumento da evaporação do metal de solda

Fatores positivos

Atende Classe A (AWS D3.6)

Podem ser produzidas soldas semelhantes às de superfície

Limitações

Contaminação do ambiente da câmara

O gás de selagem deve ser respirável

Dependência da capacidade física e intelectual do homem, influenciadas pela pressão

Custos elevados (atinge valores da ordem de US\$ 1,000,000.00

SOLDAGEM HIPERBÁRICA

Soldagem em câmara hiperbárica Processo TIG (30m a 300m)

É o processo mais empregado

Fatores positivos

Bom desempenho em passe de raiz

Atende Classe A (AWS D3.6)

Podem ser produzidas soldas semelhantes às de superfície

Adequado à automação

Pouco poluente (contaminante: argônio)

Baixíssima absorção de hidrogênio

Ausência de reações químicas na poça de fusão

Fácil controle do arco e da poça de fusão

Limitações

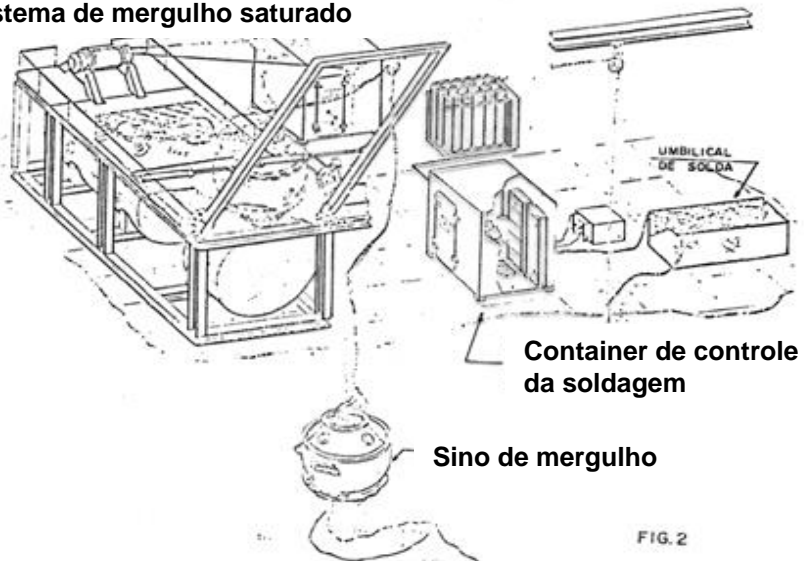
Baixa produtividade

SOLDAGEM HIPERBÁRICA – REPARO DE TUBO CONDUTOR EM BADEJO (1983)

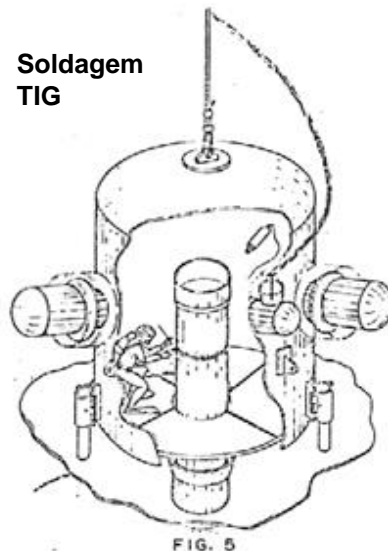
Processo: TIG

Profundidade: 100m

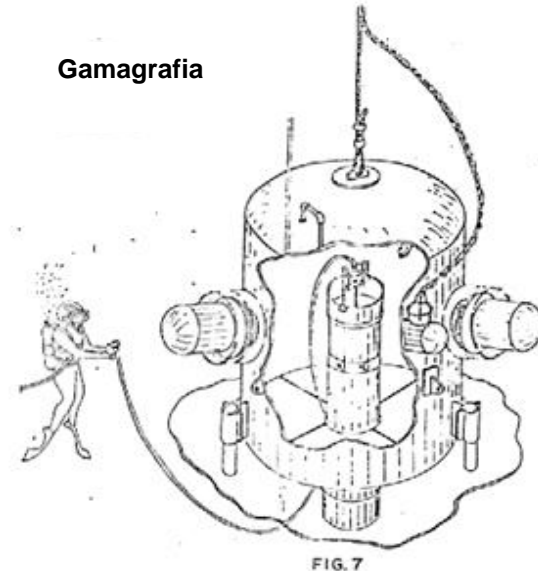
Sistema de mergulho saturado



Soldagem TIG



Gamagrafia



Câmera de TV

Unidade hidráulica

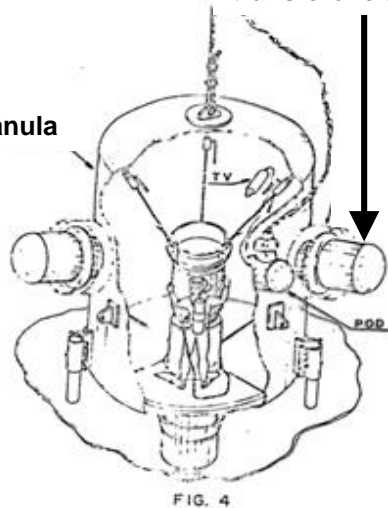
Campânula

Corte a frio

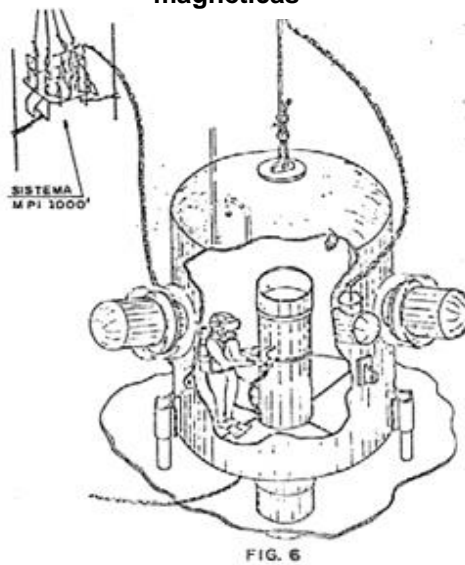
TEMPLATE

FIG. 3

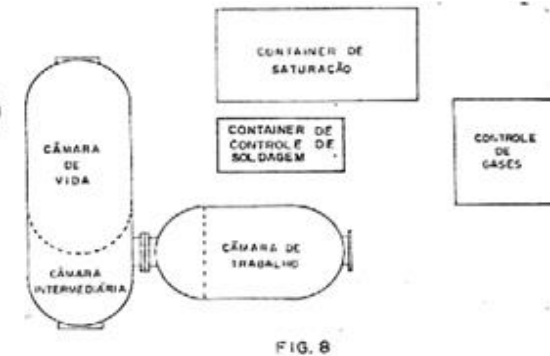
Câmara de transferência



Partículas magnéticas



Centro hiperbárico de treinamento e qualificação de pessoal e procedimentos



Sistemas semi-automáticos

PRS – Pipeline Repair System

Desenvolvido por: Norsk Hydro – Statoil 1986 (testado até 360m)

Método: Soldagem de topo circunferencial com o processo TIG

Usado no Mar do Norte para interligação (Tie-in) de riser de plataforma fixa a duto

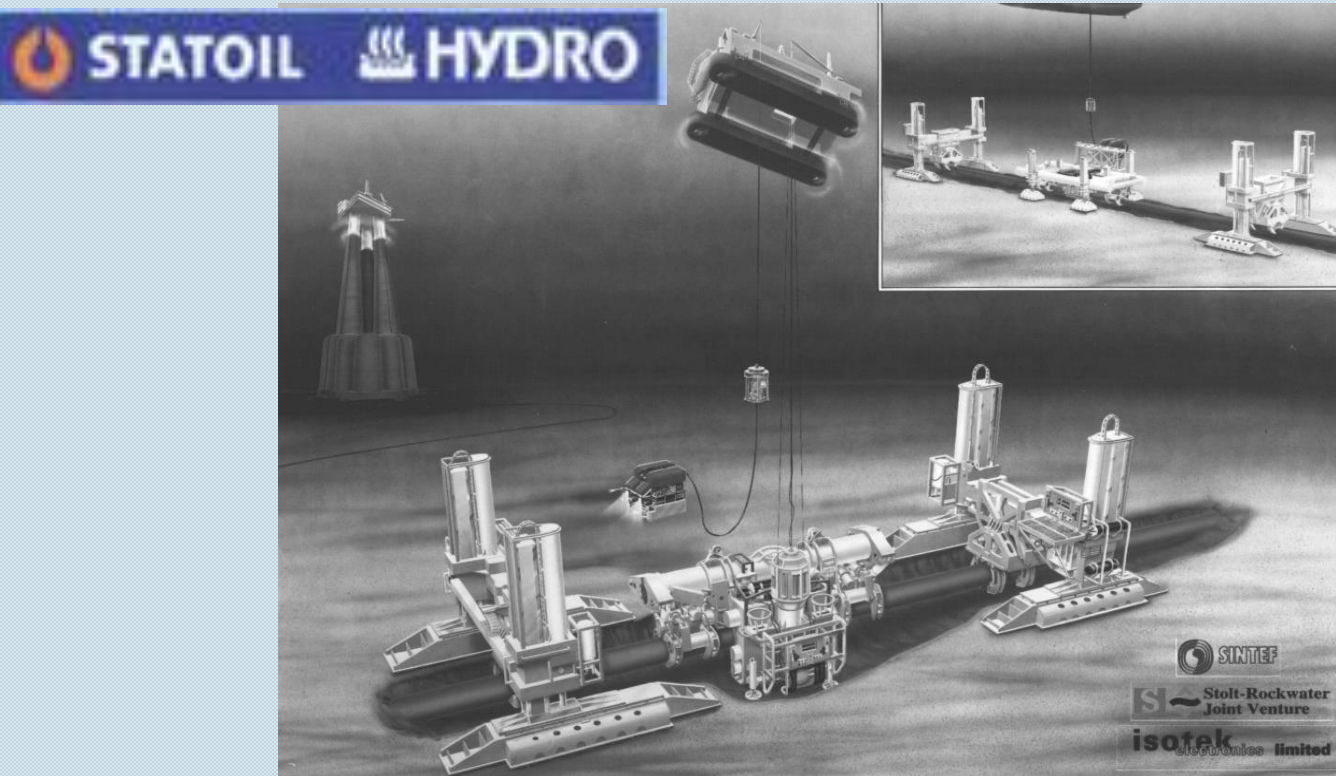
1988 – Duto Oseberg “A”	tie-in	100m	2 soldas
1989 – Gullfacks “C”	tie-in	220m	6 soldas
1990 – Duto Oseberg 2	tie-in	110m	8 soldas



Módulo de corte e remoção de trecho

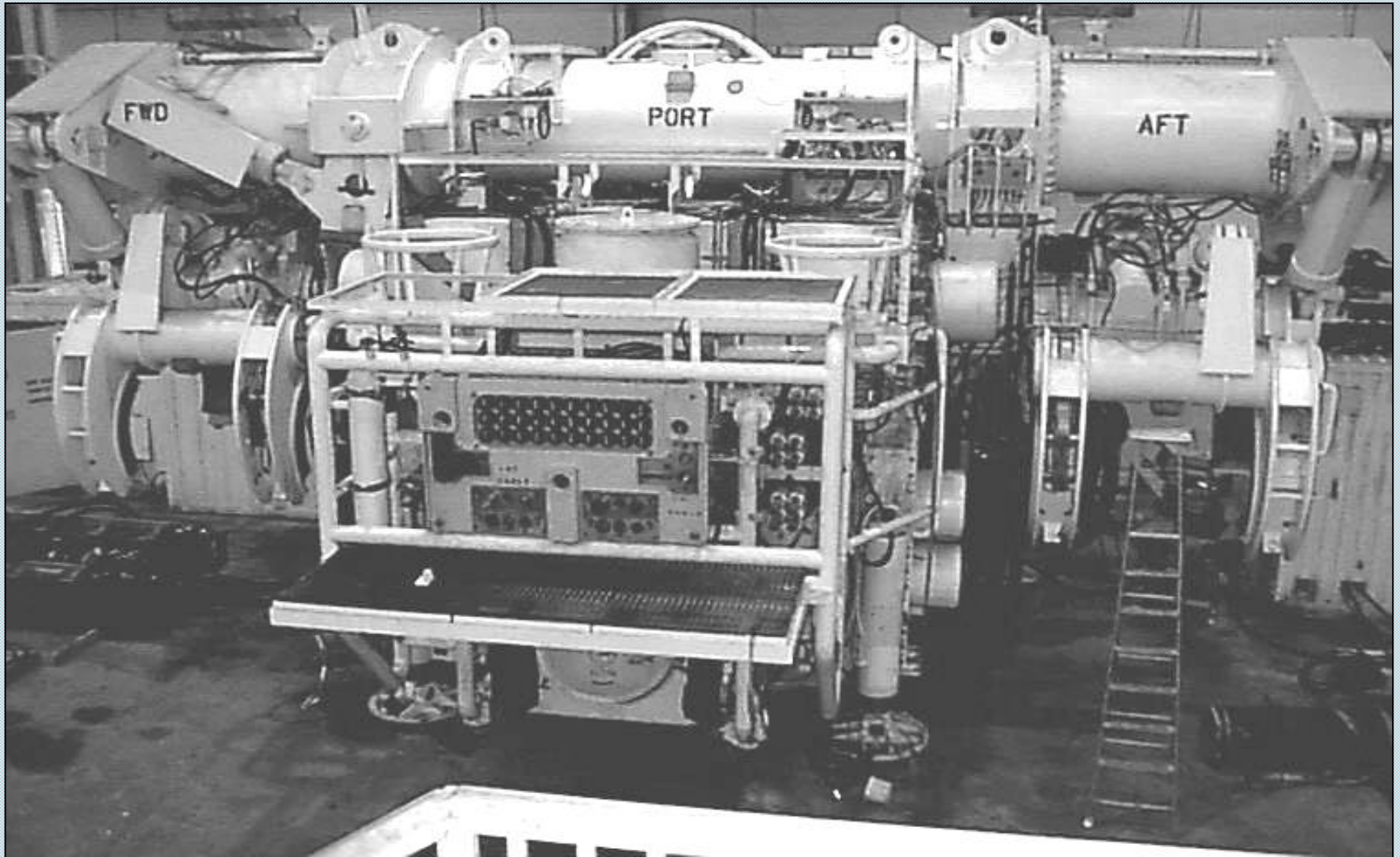


Módulo de remoção de concreto



Sistemas semi-automáticos

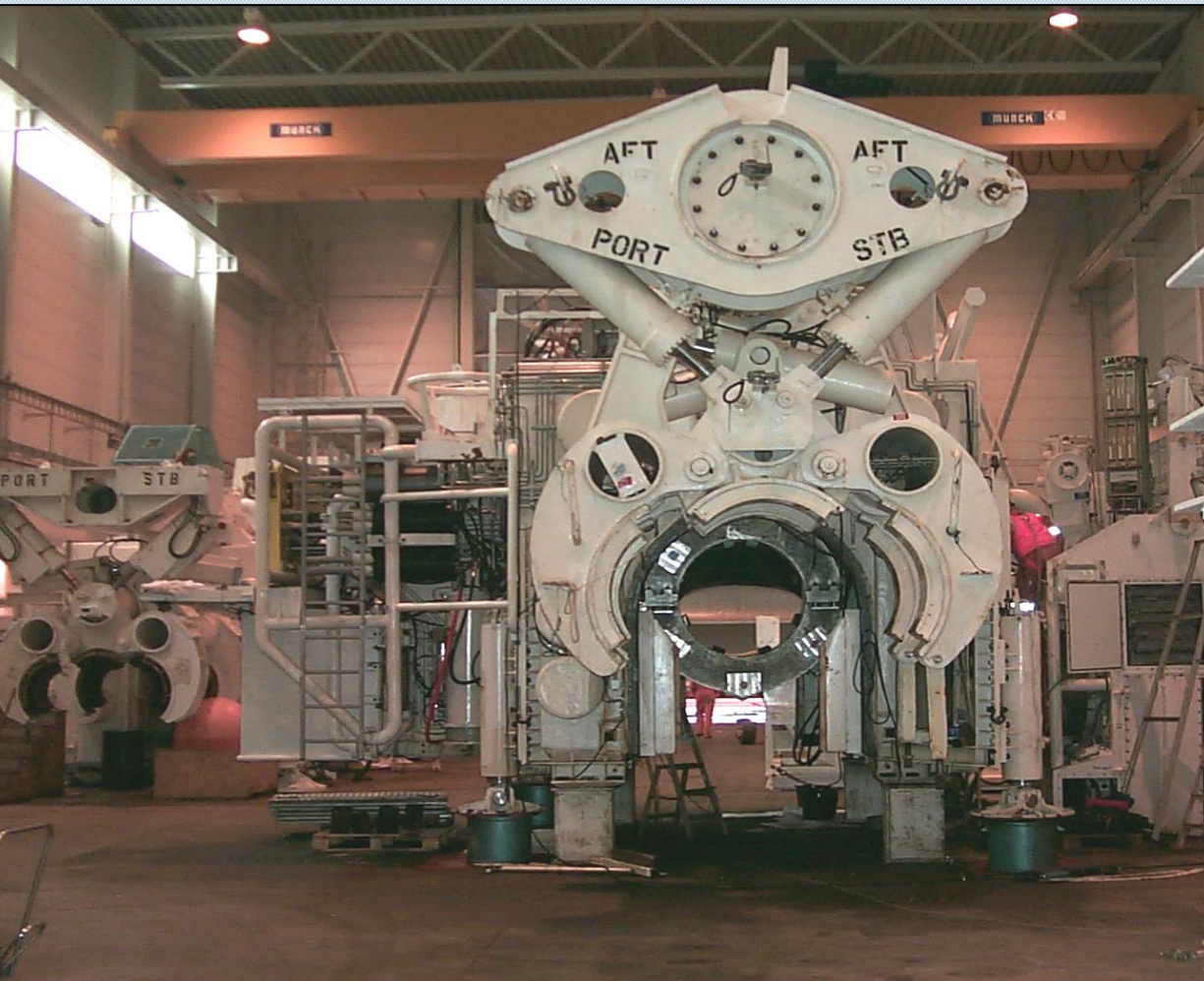
PRS – Pipeline Repair System



Habitat e *frame* de alinhamento fino

Sistemas semi-automáticos

PRS – Pipeline Repair System



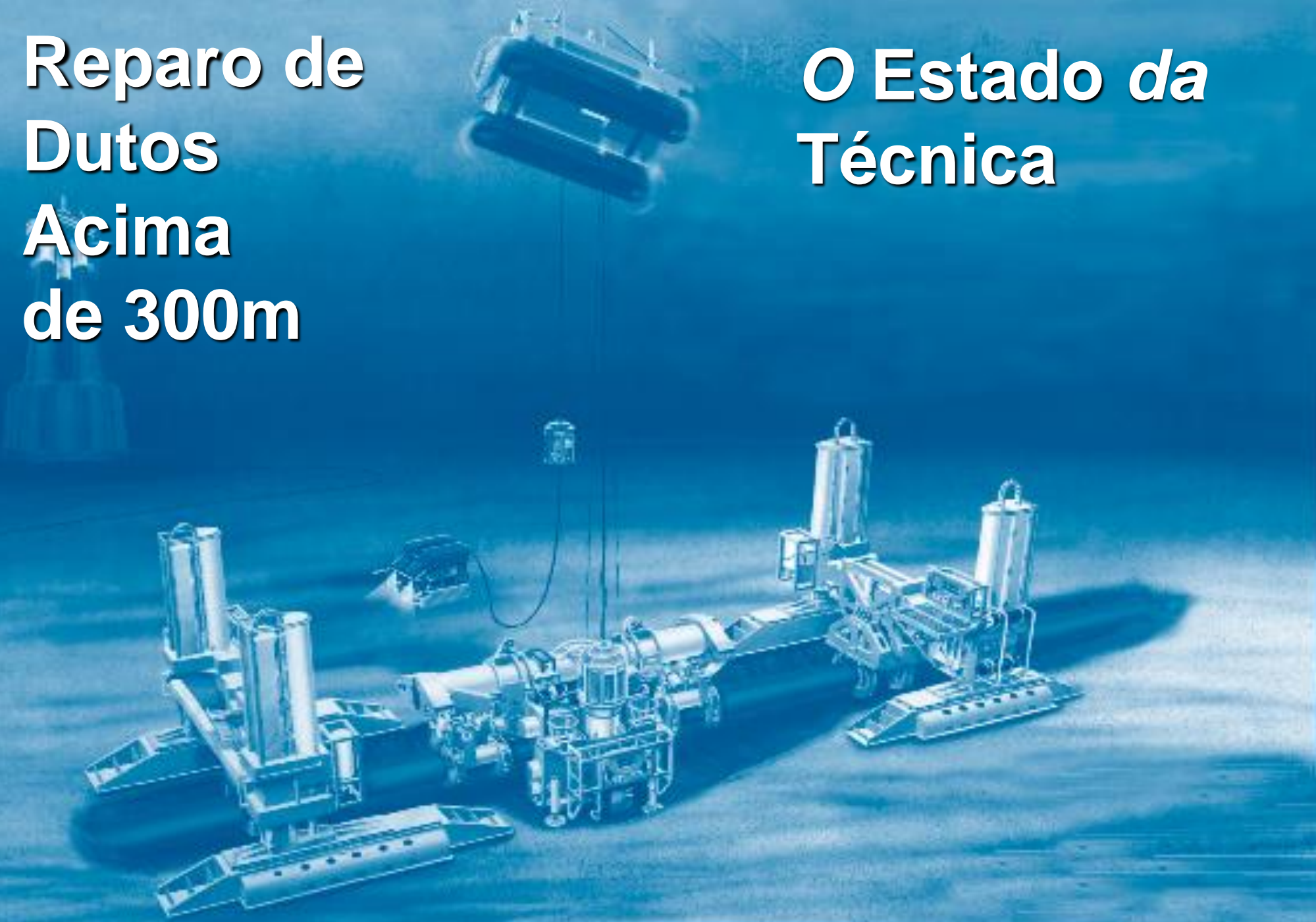
Habitat e *frame* de alinhamento fino



Interior do habitat.

**Reparo de
Dutos
Acima
de 300m**

**O Estado *da*
Técnica**



Sistemas totalmente automatizados

Soldagem em câmara hiperbárica acima de 300m para reparo de dutos

FILOSOFIAS

Soldagem com robôs industriais

Soldagem com sistema orbital instalado por robôs

PRINCIPAIS OPERAÇÕES A AUTOMATIZAR

Corte e remoção de um trecho do duto

Remoção do revestimento do duto

Medição da distância entre extremidades livres e da ovalização

Instalação de plugs

Posicionamento do novo trecho

Soldagem

Inspeção não destrutiva

DESAFIOS

Tolerâncias pequenas exigem robôs industriais em lugar de manipuladores

Sofisticados sistemas de visão e programação para a soldagem

Distância da unidade de controle ao local da operação

Adaptação de robôs para operar no fundo do mar

Desenvolvimento de parâmetros de soldagem

Confiabilidade da operação

Sistemas totalmente automatizados

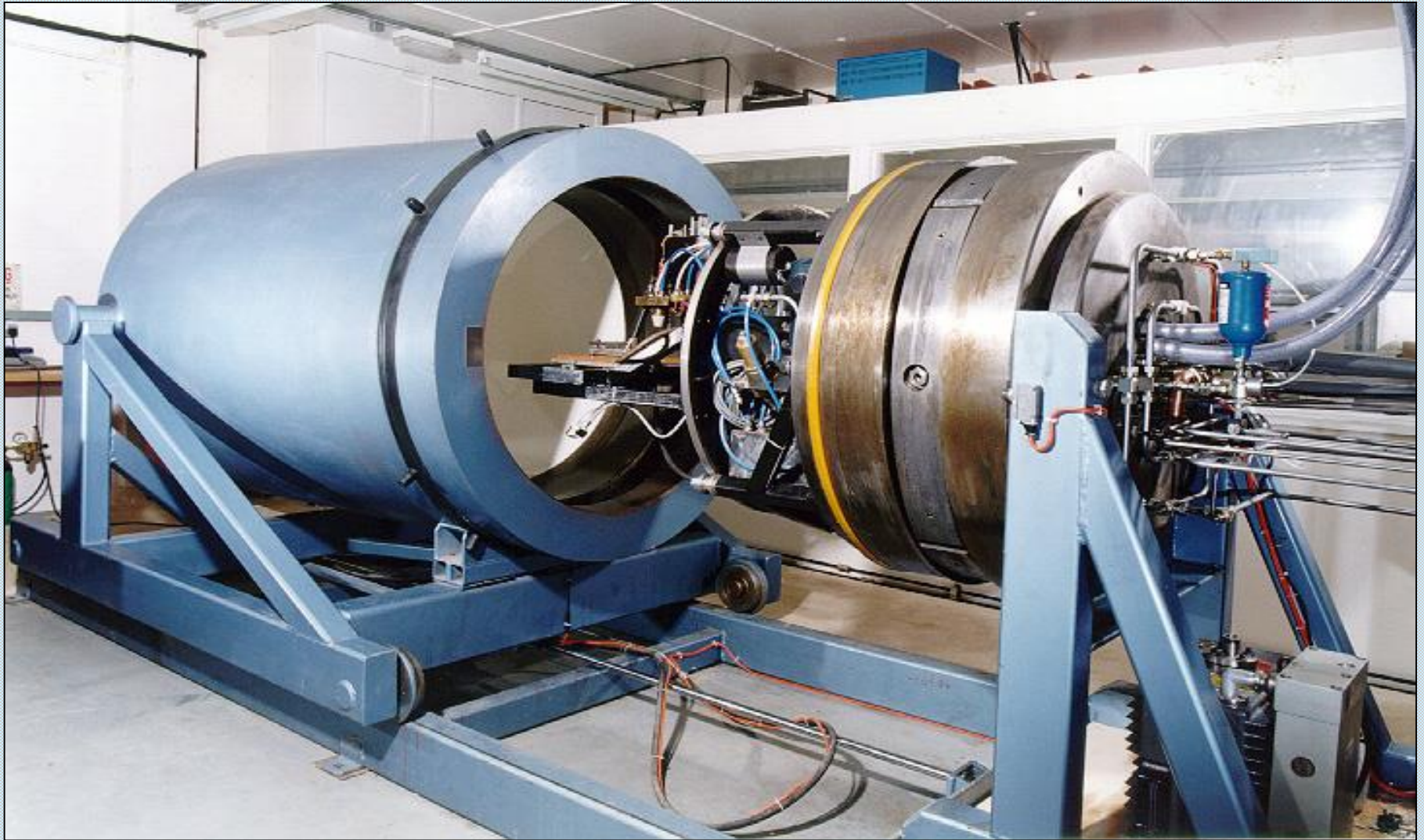
SiRCoS (Sistema Riparazione Condotte Sottomarine)

Desenvolvido por Saipem/Sonsub para Eni. Destinado a reparo de dutos no estreito de Messina (650m de profundidade)



- O sistema instala conectores mecânicos
- Não utiliza soldagem

Reparo de Dutos Acima de 300m - Testes de laboratório

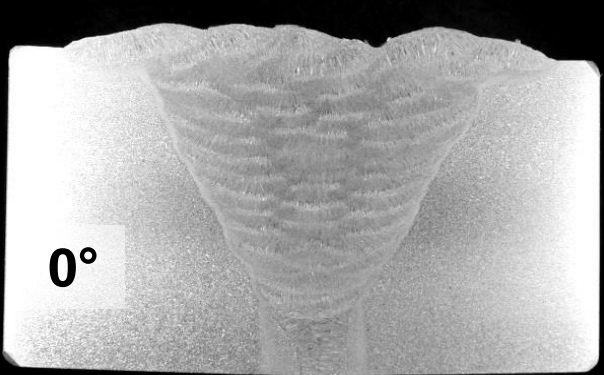
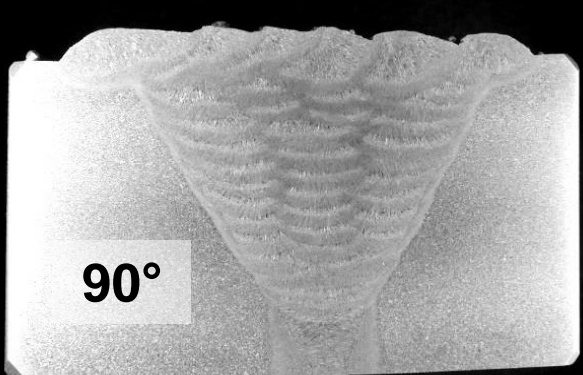
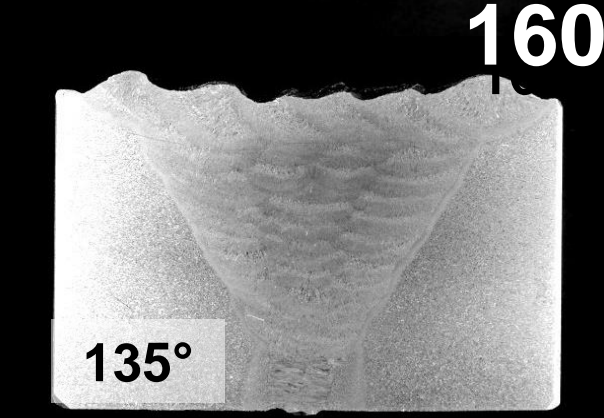
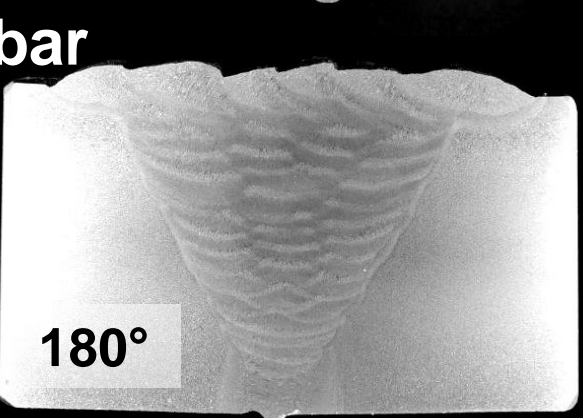


**Simulador de soldagem hiperbárica orbital para testes até 250 bar (2500 m).
Universidade de Cranfield.**

Reparo de Dutos Acima de 300m - Testes de laboratório

Soldas de topo com sistema orbital até 2500 m de profundidade equivalente

Propriedades do metal de solda de aço API 5LX-65 com o processo MIG/MAG

 0°	 90°		160 bar posição 1G	
 135°		 180°	160 bar	
			Limite de escoamento (MPa)	651
			Limite de resistência à tração (MPa)	732
		Alongamento do metal de solda %	22.1	

Fim

Valter Rocha dos Santos
Valtersa.santos@gmail.com