

Proteção de Estruturas Metálicas Frente à *Corrosão em Ambiente Marinho Agressivo*



Fabio Domingos Pannoni, Ph.D.
Consultor Técnico GLB













Corrosão é um processo



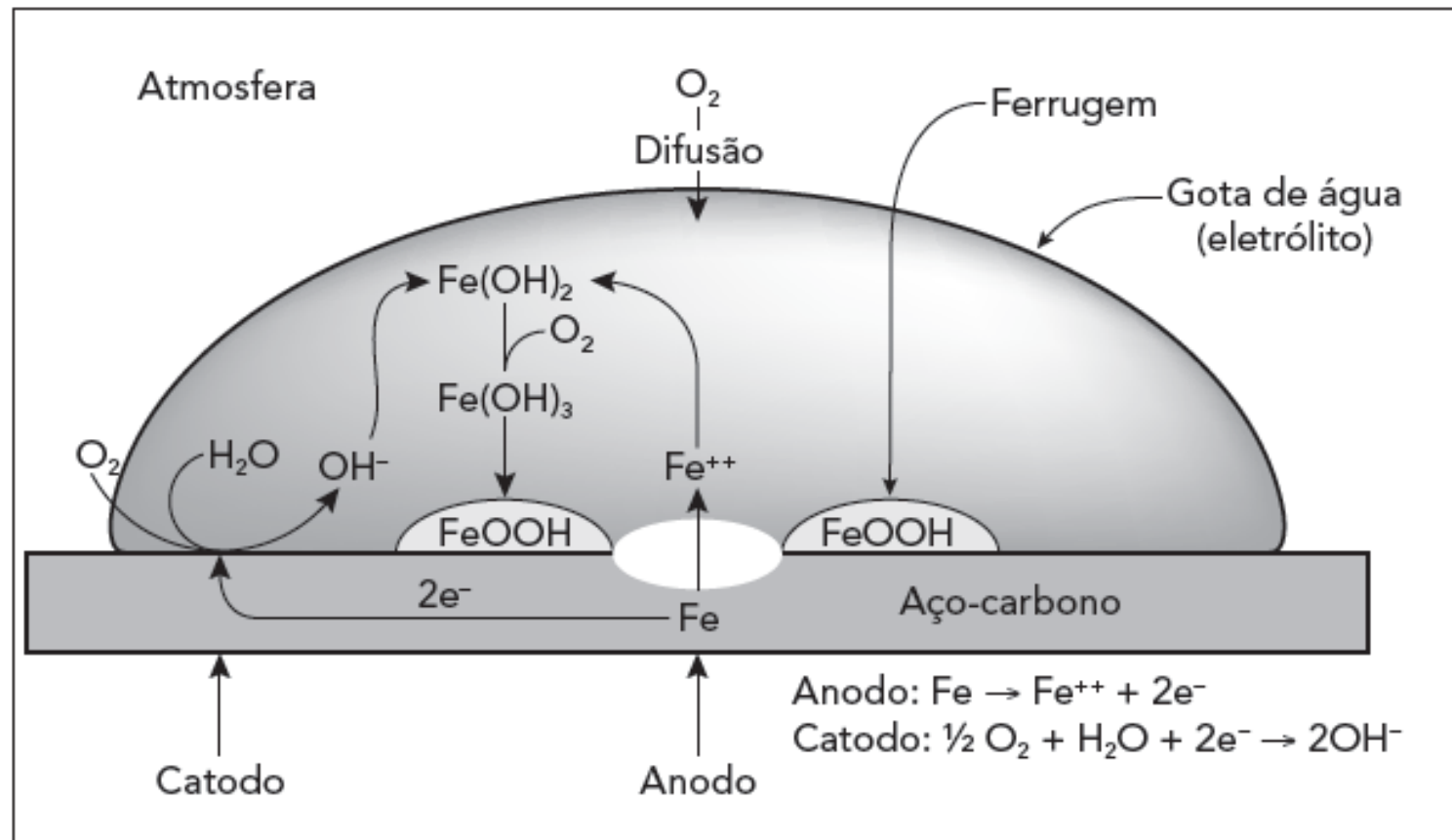
espontâneo

Corrosão custa

País	Ano	Custo (USD x 10 ⁹)	% PIB
Índia	1961	0,32	-
Alemanha Ocidental	1969	6,0	3,0
URSS	1969	6,7	2,0
Reino Unido	1970	3,2	3,5
Austrália	1973	0,55	1,5
Estados Unidos	1975	70,0	4,2
Estados Unidos	2002	276	3,2

www.corrosioncost.com

muito

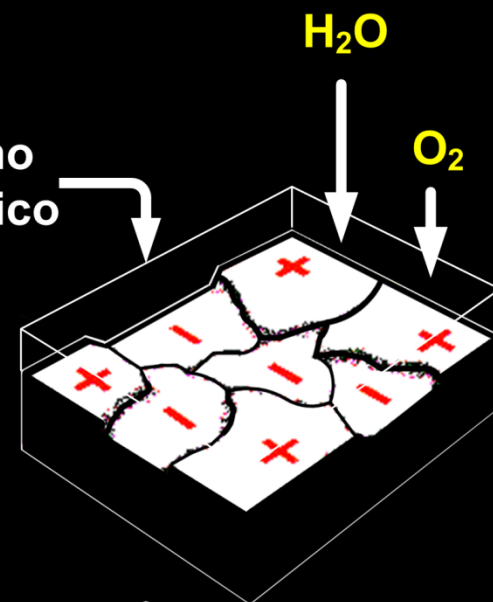


Anodo: $2 \text{ Fe} \rightarrow 2 \text{ Fe}^{2+} + 4 \text{ e}^-$

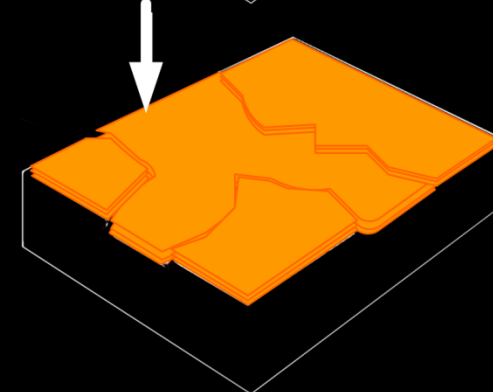
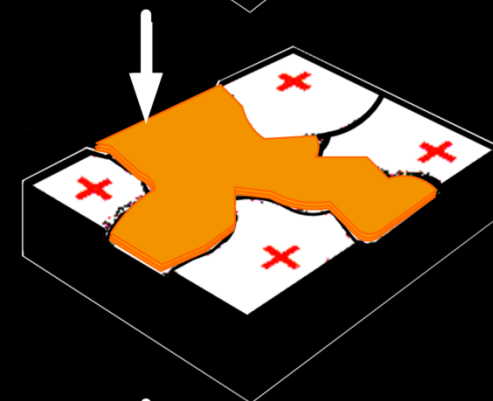
Catodo: $\text{O}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O} + 4 \text{ e}^- \rightarrow 4 \text{ OH}^-$

Global: $2 \text{ Fe} + \text{O}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ Fe}^{2+} + 4 \text{ OH}^- \rightarrow 2 \text{ Fe(OH)}_2$

Mecanismo
electroquímico



FeOOH

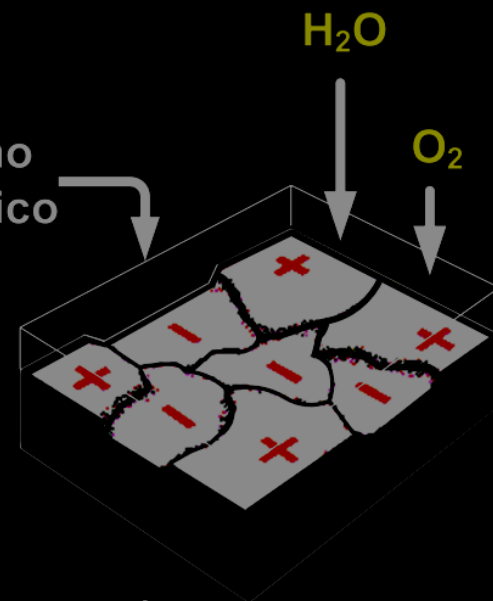


Anodo: $2 \text{ Fe} \rightarrow 2 \text{ Fe}^{2+} + 4 \text{ e}^-$

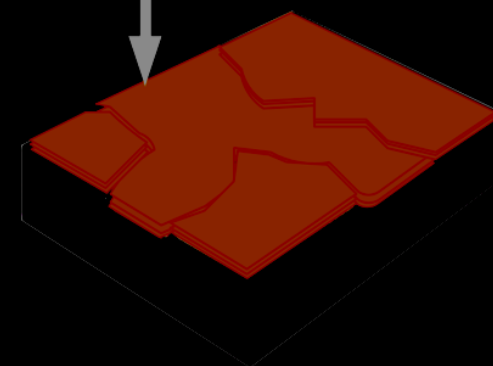
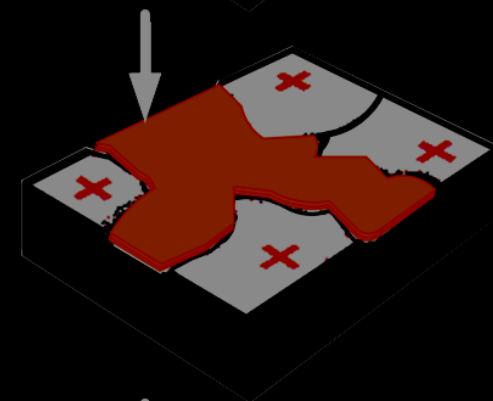
Catodo: $\text{O}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O} + 4 \text{ e}^- \rightarrow 4 \text{ OH}^-$

Global: $2 \text{ Fe} + \text{O}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ Fe}^{2+} + 4 \text{ OH}^- \rightarrow 2 \text{ Fe(OH)}_2$

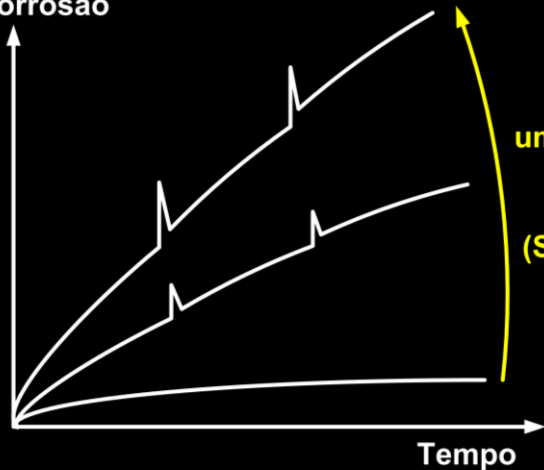
Mecanismo
eletroquímico



FeOOH

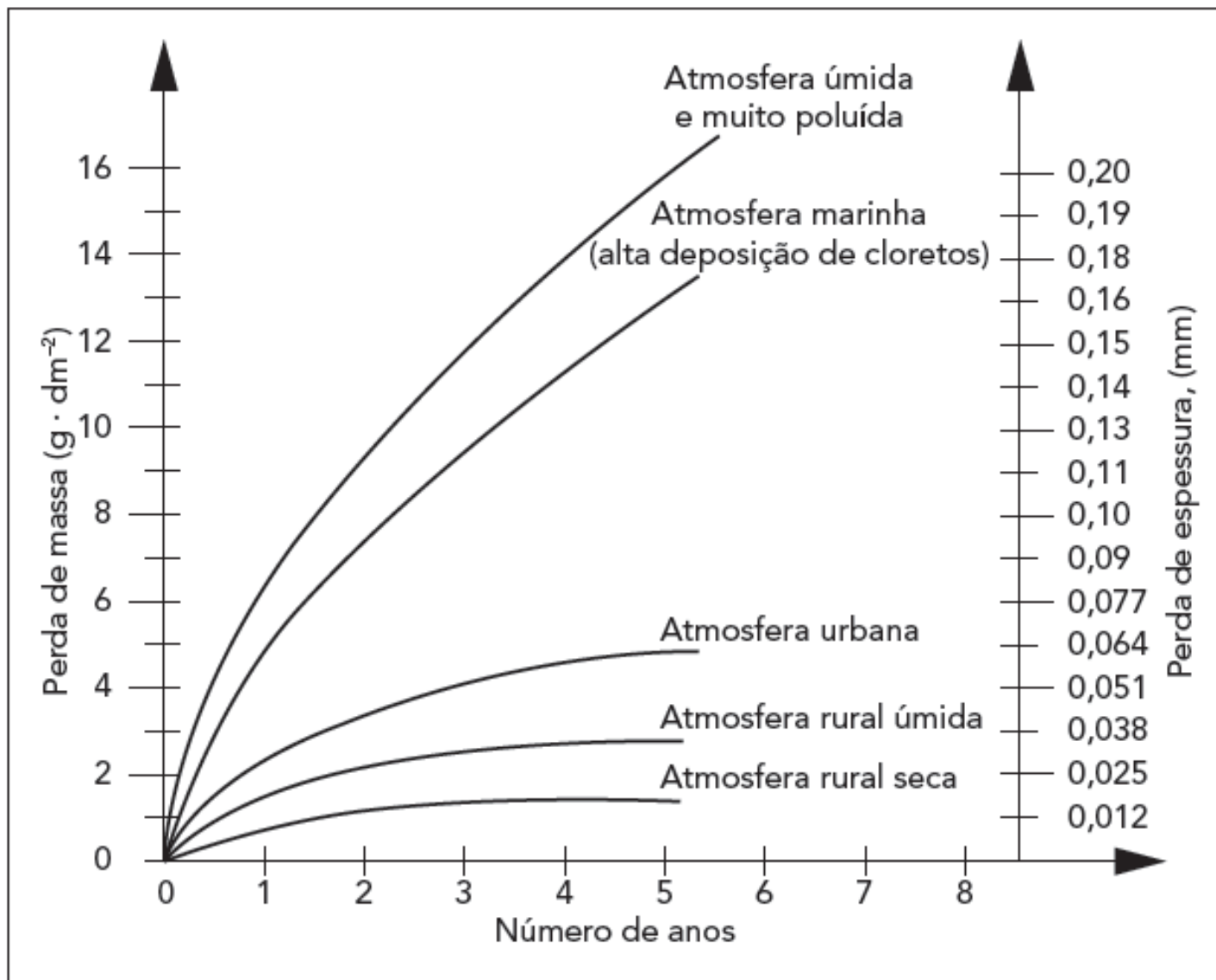


Efeito acumulado
da corrosão



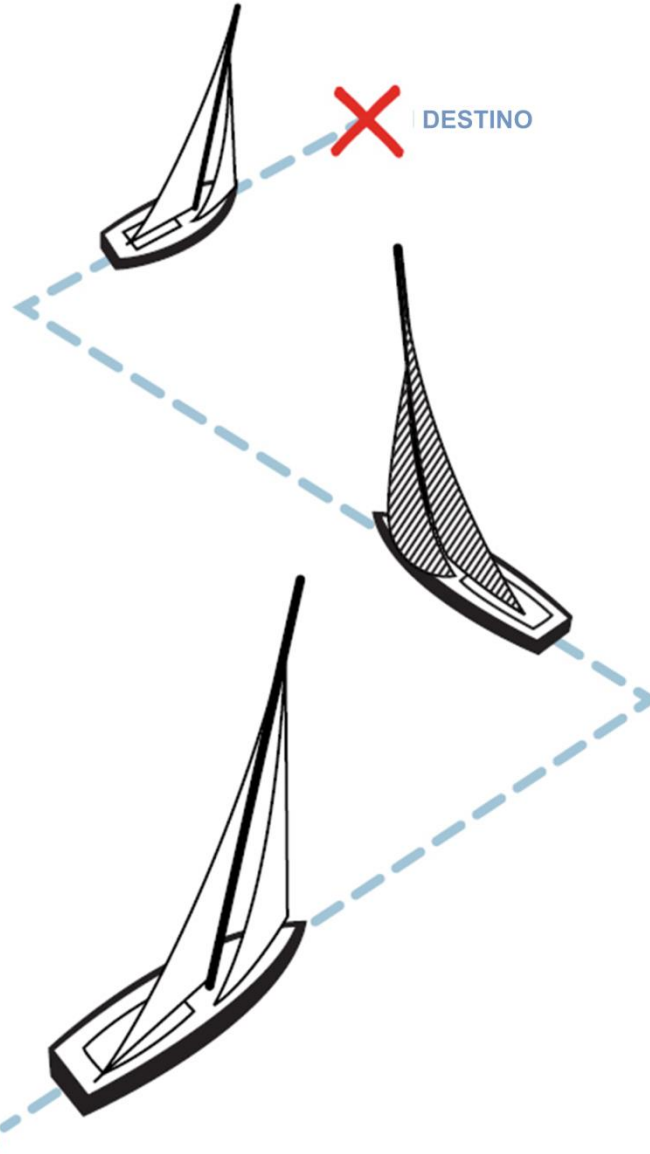
Tempo de
umedecimento

Poluentes
(SO₂, Cl⁻, etc.)



$$K = \sum_{i=1}^n \tau_i \nu_i$$

RESISTÊNCIA DO VENTO



DESTINO

PARTIDA

Corrosão em Estruturas de Aço

NBR 8800:2008

**“Projeto de Estruturas de Aço e Estruturas Mistas de
Aço e Concreto de Edifícios”**

Anexo N – Durabilidade de componentes de aço frente à corrosão

↵ Qualifique a
agressividade
do ambiente

≈ Escolha aços
e sistemas de
proteção
adequados e
normatizados

∞ Atenção ao
detalhamento

1 Qualifique a
agressividade
do ambiente

2 Escolha aços
e sistemas de
proteção
adequados e
normatizados

3 Atenção ao
detalhamento









Tabela 5.1

Características principais das atmosferas comuns.

Atmosferas	Características principais
<i>Exteriores</i>	
Rurais	Pura – não poluída – alternância de umedecimento e secagem
Urbanos	Presença de gases e fuligem: SO_2 – CO_2 – umedecimento e secagem
Industriais	Altas concentrações de agentes corrosivos: SO_2 – H_2S – etc. – umidade
Marinhos	Presença de cloretos e alta umidade
<i>Interiores</i>	
Secos ou climatizados	Umidade relativa inferior a 60% – temperatura de 18 °C a 25 °C
Úmidos	Umidade permanente: locais sem ventilação – banheiros – cozinhas Umidade permanente + vapores agressivos, ácidos, álcalis e outros

Nota: CO_2 = gás carbônico; H_2S = gás sulfídrico; SO_2 = dióxido de enxofre

ISO 9223: 2012

**“Corrosion of metals and alloys -
Corrosivity of atmospheres -
Classification, determination and
estimation”**

C1, C2, C3, C4, C5-I & C5-M

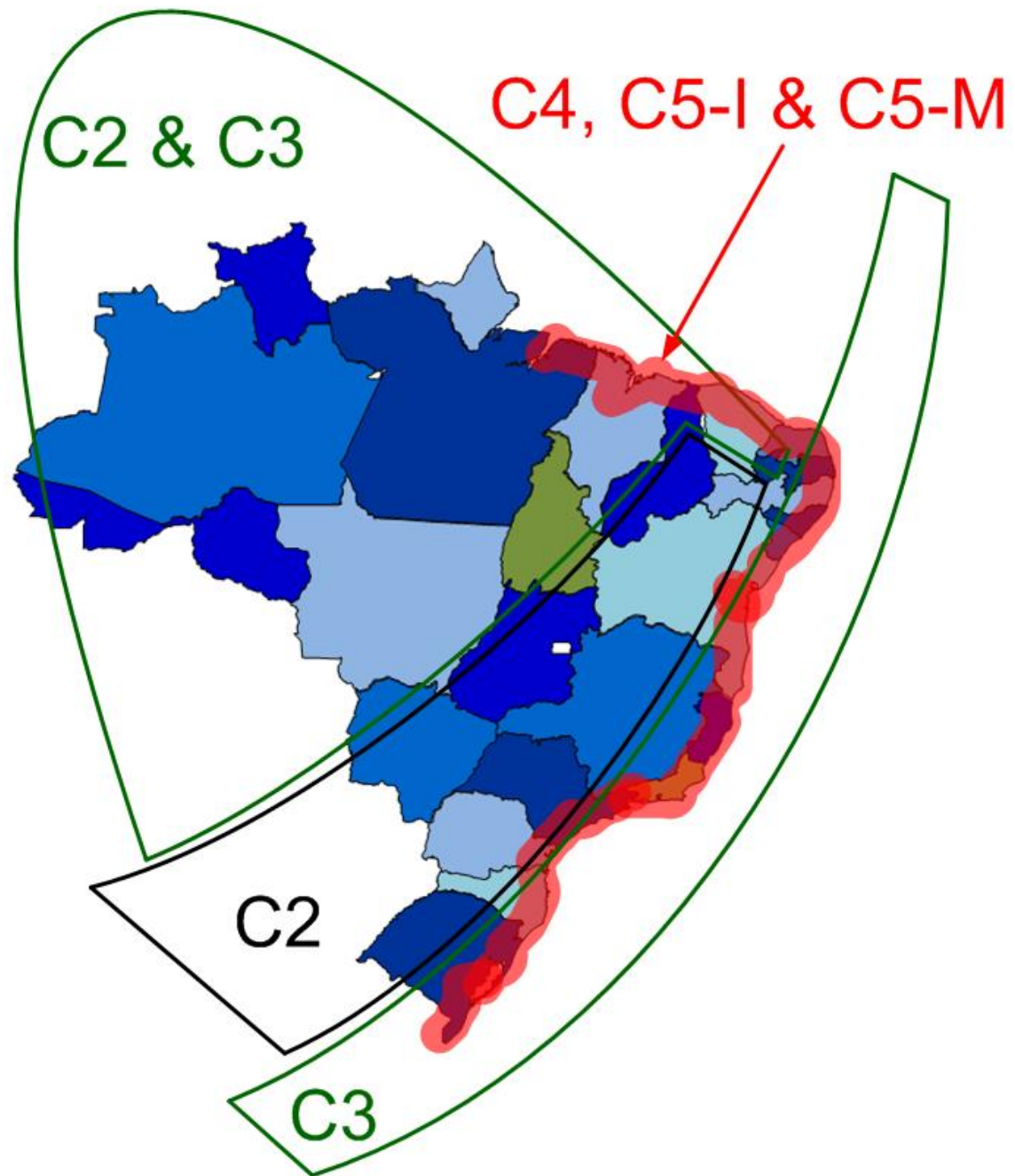
Tabela 5.2

Corrosividade dos ambientes para o aço-carbono, segundo a ISO 12944-2.

Categoria de corrosividade	Perda de massa por unidade de superfície/perda de espessura para aço de baixo carbono (após o primeiro ano de exposição)		Exemplos de ambientes típicos (informativo)	
	Perda de massa ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	Perda de espessura (μm)	Exterior	Interior
C1 (muito baixa)	≤ 10	$\leq 1,3$	-	Edificações condicionadas para o conforto humano (residências, escritórios, lojas, escolas, hotéis)
C2 (baixa)	> 10 até 200	> 1,3 a 25	Atmosferas com baixo nível de poluição. A maior parte das áreas rurais	Edificações onde a condensação é possível, como armazéns e ginásios cobertos
C3 (média)	> 200 até 400	> 25 a 50	Atmosferas urbanas e industriais com poluição moderada por dióxido de enxofre. Áreas costeiras de baixa salinidade	Ambientes industriais com alta umidade e alguma poluição atmosférica, como lavanderias, fábricas de alimentos, cervejarias e laticínios
C4 (alta)	> 400 até 650	> 50 a 80	Áreas industriais e costeiras com salinidade moderada	Ambientes como indústrias químicas e coberturas de piscinas
C5-I Muito alta – industrial	> 650 até 1.500	> 80 a 200	Áreas industriais com alta umidade e atmosfera agressiva	Edificações ou áreas com condensação quase que permanente e com alta poluição
C5-M Muito alta – marinha	> 650 até 1.500	> 80 a 200	Áreas costeiras e <i>offshore</i> com alta salinidade	Edificações ou áreas com condensação quase que permanente e com alta poluição

Observações:

Os valores de perda de massa utilizados nas categorias de corrosividade são idênticos àqueles recomendados pela ISO 9223. Em áreas costeiras de climas quentes e úmidos, as perdas de massa ou espessura podem exceder os limites da categoria C5-M. Precauções especiais devem ser tomadas na seleção de sistemas de pintura para essas áreas.



Estacas de aço

Faces internas de seções tubulares

Vigas e pilares internos

Vigas e pilares periféricos

Estruturas externas

↵ Qualifique a
agressividade
do ambiente

≈ Escolha aços
e sistemas de
proteção
adequados e
normatizados

∞ Atenção ao
detalhamento

ISO 12944-5: 2007

**“Paints and varnishes – Corrosion
protection of steel structures by
protective paint systems – Part 5:
Protective paint systems”**

ISO 12944-5

1.Limpeza da superfície

2.Sistema de pintura

demãos e espessuras

3.Durabilidade estimada

baixa (2 – 5 anos)

média (5 – 15 anos)

alta (> 15 anos)

Proteção por barreira

Inibição da corrosão

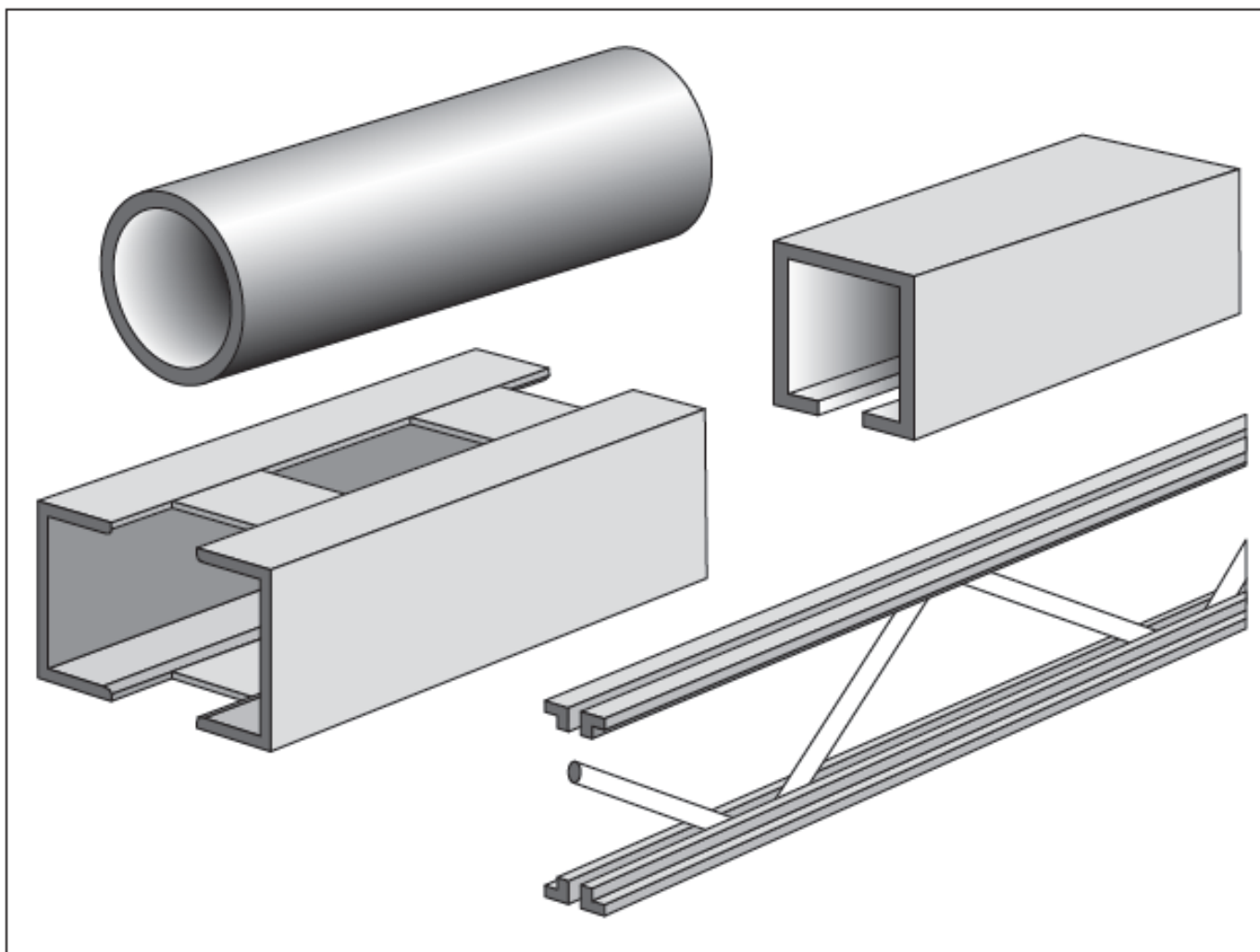
Proteção catódica

Sistema Nº	Grau de preparo de superfície		Fundo				Acabamento incluindo camada intermediária			Sistema		Durabilidade estimada		
	St 2	Sa 21/2	Resina	Tipo	Demãos	Espessura seca (µm)	Resina	Demãos	Espessura seca (µm)	Demãos	Espessura seca (µm)	Baixa 2-5 anos	Média 5-15 anos	Alta >15 anos
Sistemas de pintura – Categoria de agressividade C3														
C3.01		X	A	Vários	1-2	80	A	1-2	80	2-4	160		X	
C3.02	X		A	Vários	1-2	80	A	2-3	120	3-5	200		X	
C3.03		X	EP	Vários	1	160	A	1	40	2	200			X
C3.04		X	EP	Vários	1-2	80	EP, P	2-3	120	3-5	200			X
C3.05		X	EP	Vários	1-2	80	EP, P	2-3	160	3-5	240			X

ou

ABNT NBR 6323: 2016

“Galvanização de produtos de aço ou ferro fundido – Especificação”



NBR 6323

1.Composição do banho

2.Retoques do
revestimento

3.Plano de amostragem

4.Massa e aderência do
revestimento

5.Espessura mínima a ser
depositada

Proteção por barreira

Proteção catódica

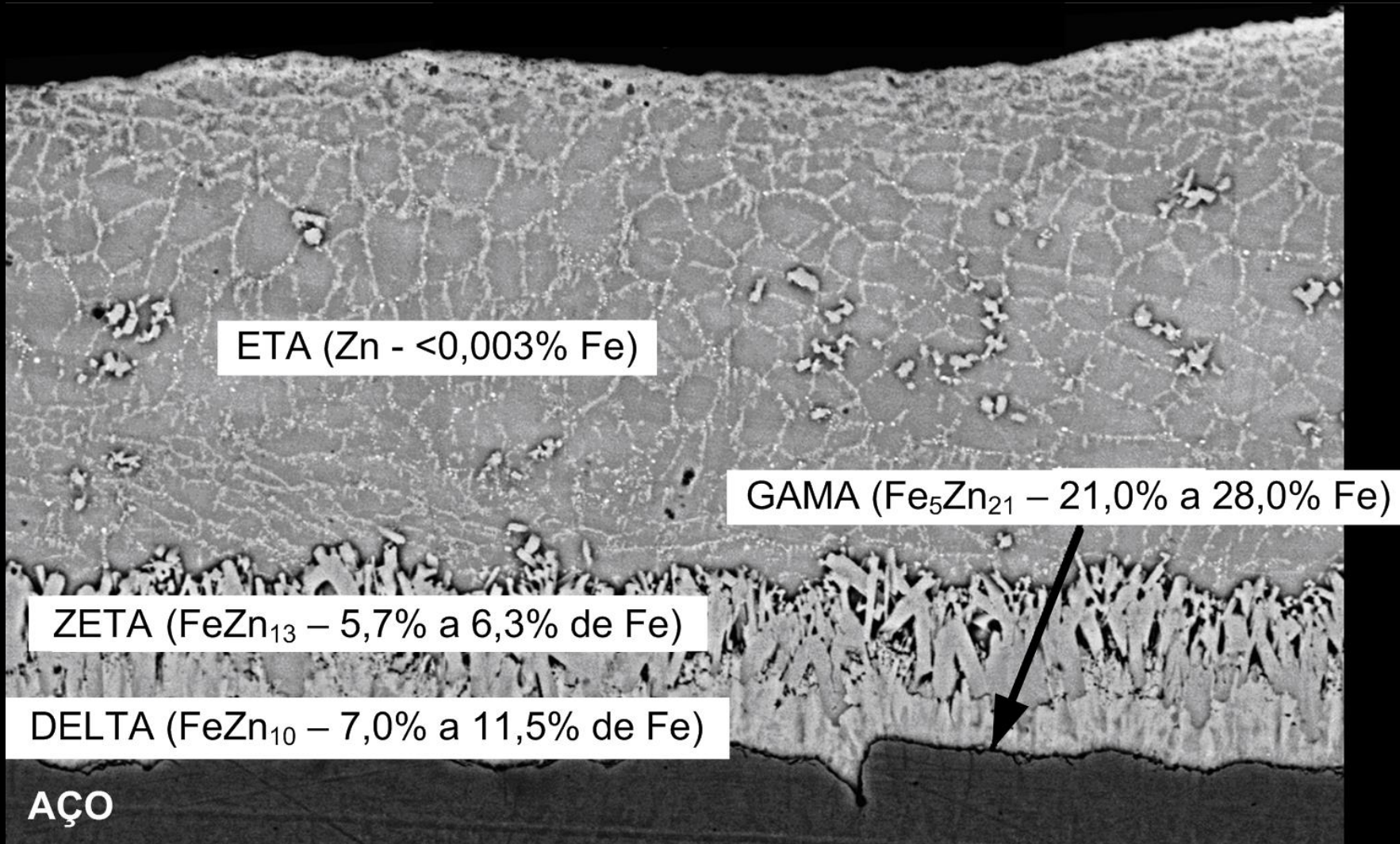
Zinco + atmosfera úmida

+

SO₂, Cl⁻, etc.

=

proteção



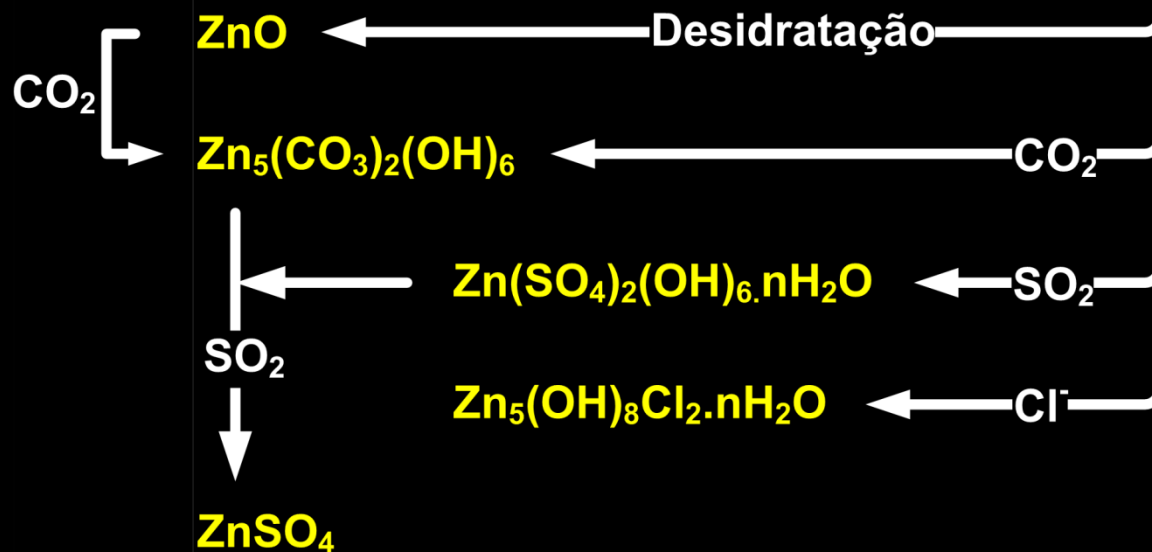
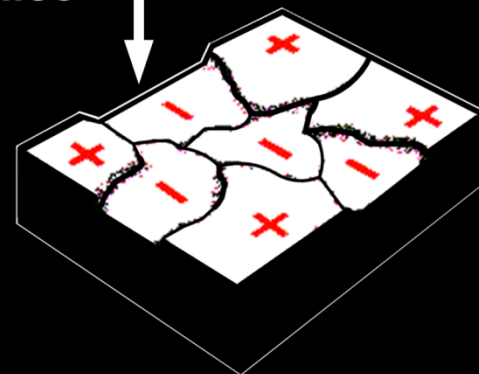
Seção transversal de um típico revestimento galvanizado.
Cirano Gewehr Campanher, Gerdau S.A.

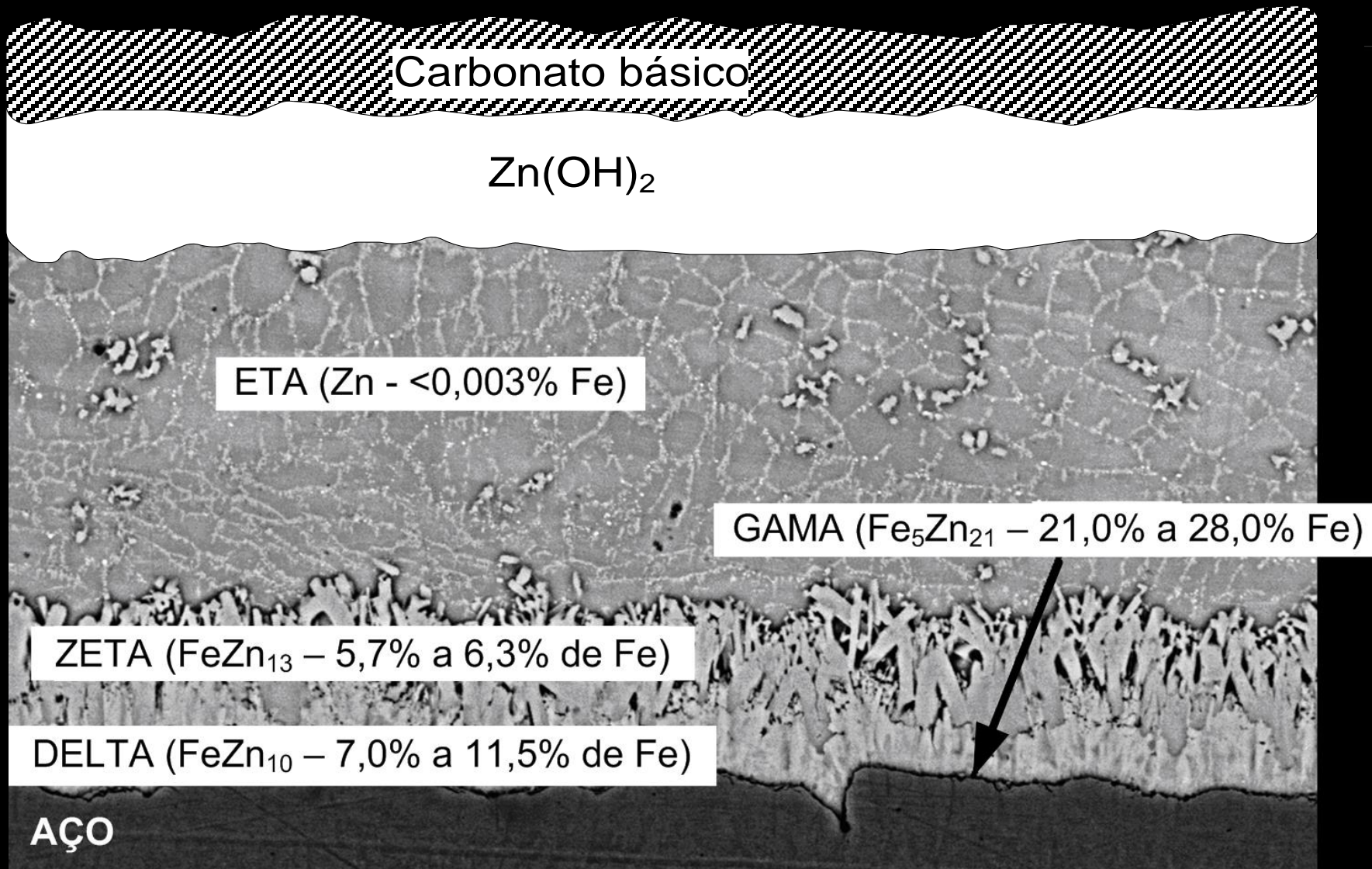
Anodo: $2 \text{Zn} \rightarrow 2 \text{Zn}^{++} + 4 \text{e}^-$

Catodo: $\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{e}^- \rightarrow 4 \text{OH}^-$

Global: $2 \text{Zn} + \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Zn}^{++} + 4 \text{OH}^- \rightarrow 2 \text{Zn(OH)}_2$

Mecanismo
eletroquímico





Seção transversal de um típico revestimento galvanizado.
Cirano Gewehr Campanher, Gerdau S.A.

Tabela 5.7

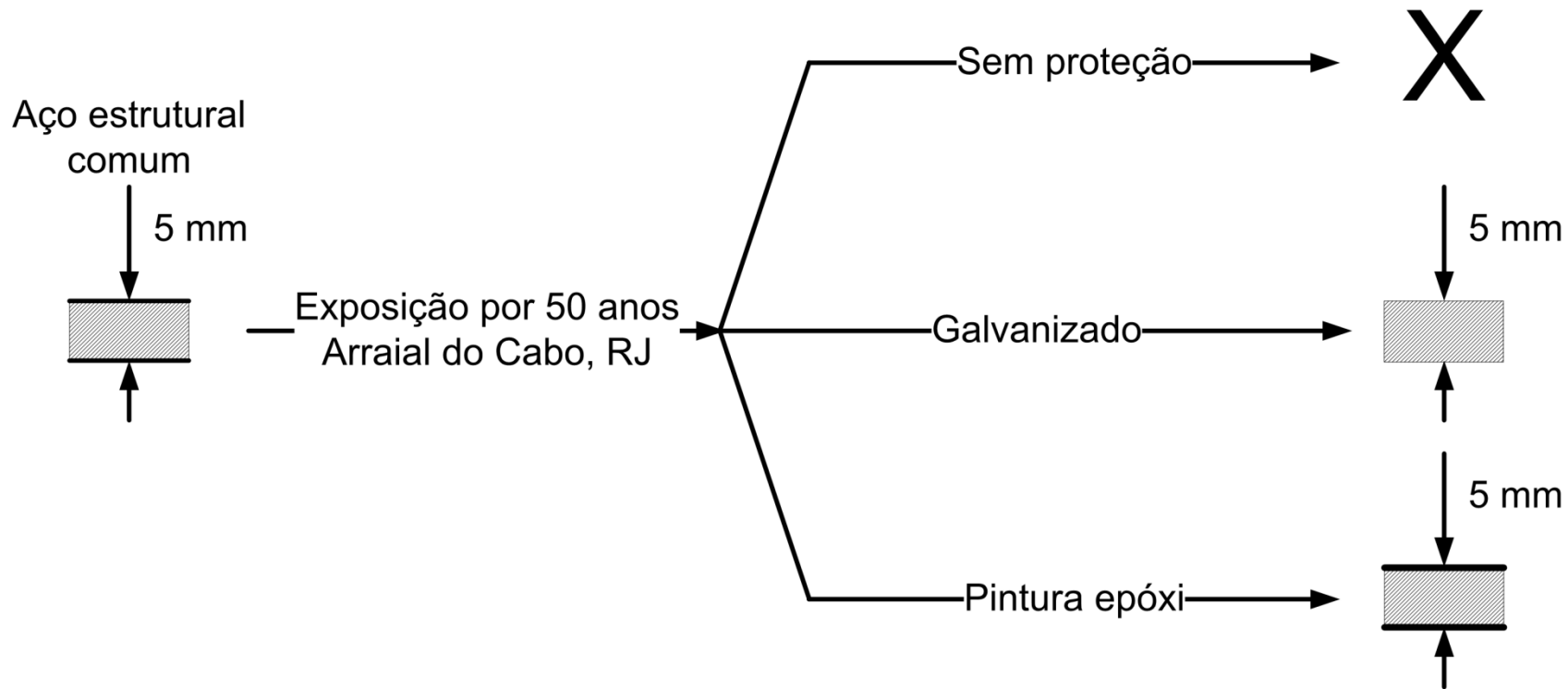
Relação entre a espessura do aço e a espessura do revestimento, segundo a Norma ISO 1461.

Espessura do metal-base	Massa média, mínima, do revestimento, g/m ²	Espessura do revestimento, μm
$\geq 5 \text{ mm}$	610	85
$\geq 2 < 5 \text{ mm}$	460	65
$\geq 1 < 2 \text{ mm}$	335	47
Ferros fundidos	610	85
Itens centrifugados	305	43

Corrosão Atmosférica – Desempenho em Diferentes Atmosféricas

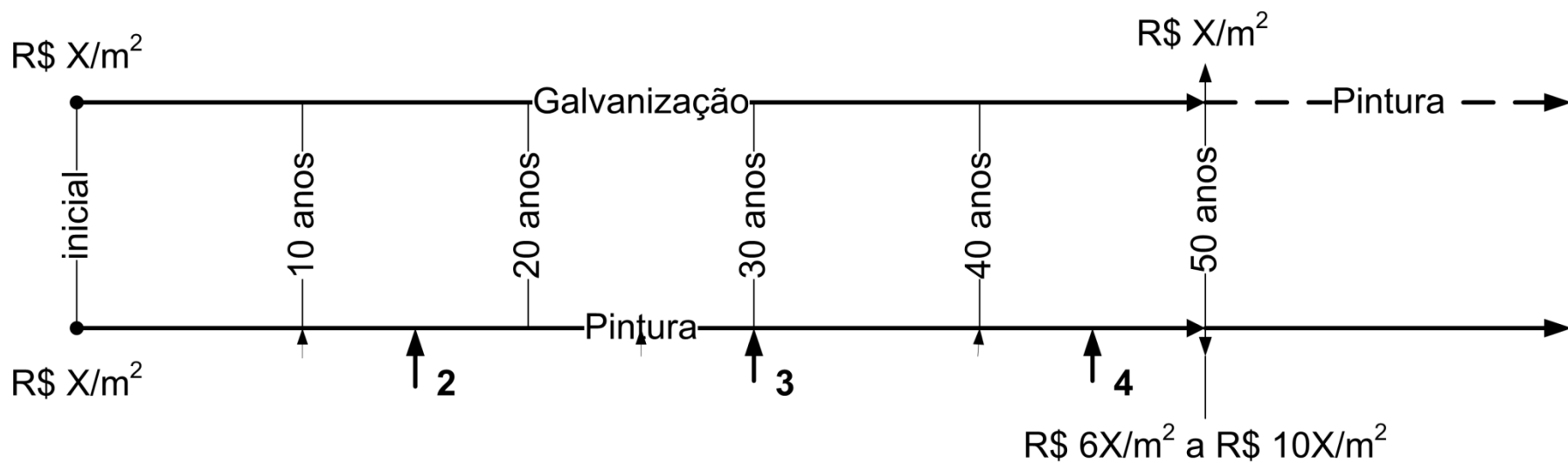
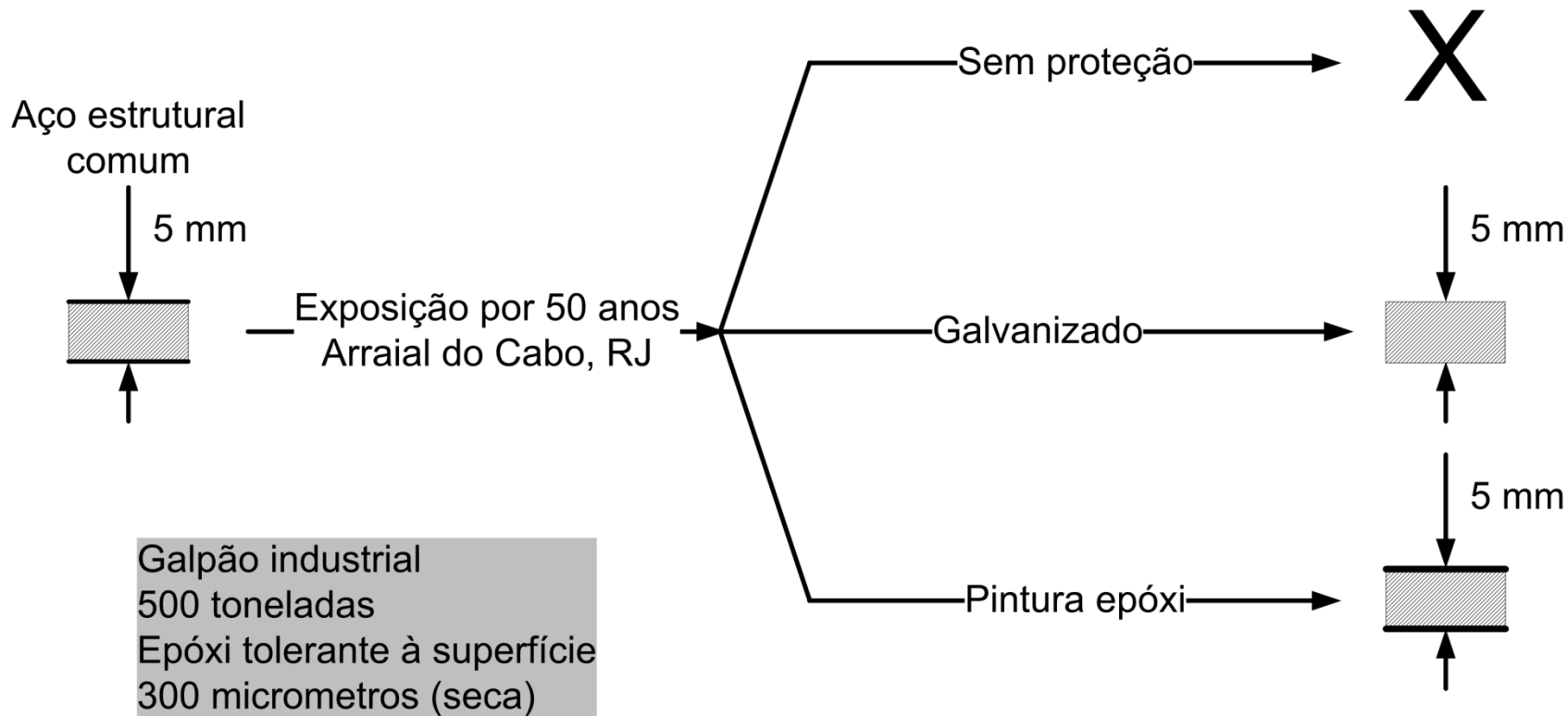
Local	Taxa de corrosão (µm/ano)		Razão Aço/Zinco	Tempo de exposição, anos
	Aço	Zinco		
Caratinga, MG	6,6	0,43	15,3	4
Belém, PA	17,3	1,18	14,7	2
Brasília, DF	8,7	1,12	7,8	2
Paulo Afonso, BA	17,3	1,6	10,8	1
Porto Velho, RO	4,3	2,0	2,2	2
São Paulo, SP	8,3	1,16	7,2	4
Ipatinga, MG	24,7	0,60	41,2	4
Cubatão, SP	85,2	0,94	90,6	4
Arraial do Cabo, RJ	437,7	1,74	251,6	4
Ubatuba, SP	400,3	2,08	192,5	4
Rio de Janeiro, RJ	58,5	1,21	48,3	4

M. Morcillo et al., ed., Corrosión y Protección de Metales em las Atmosferas de IberoAmerica (Proyecto MICAT), p. 746, 1998.



?

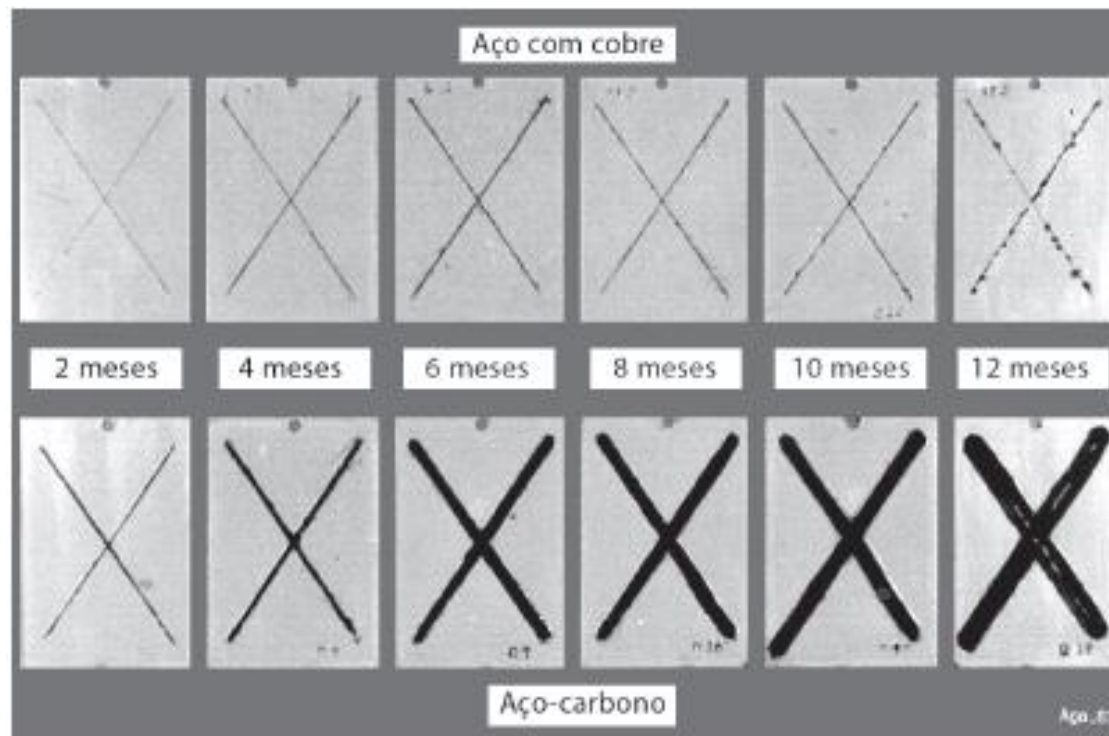




ou

Aços Patináveis

Cobre?

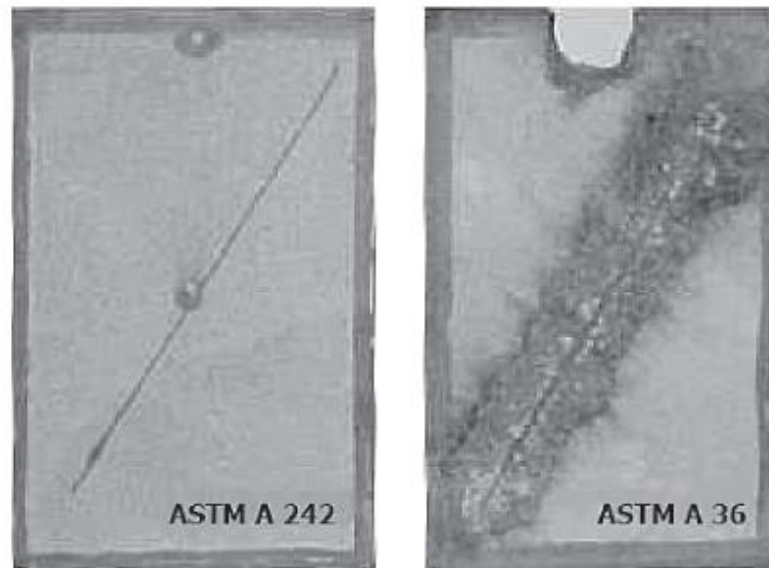


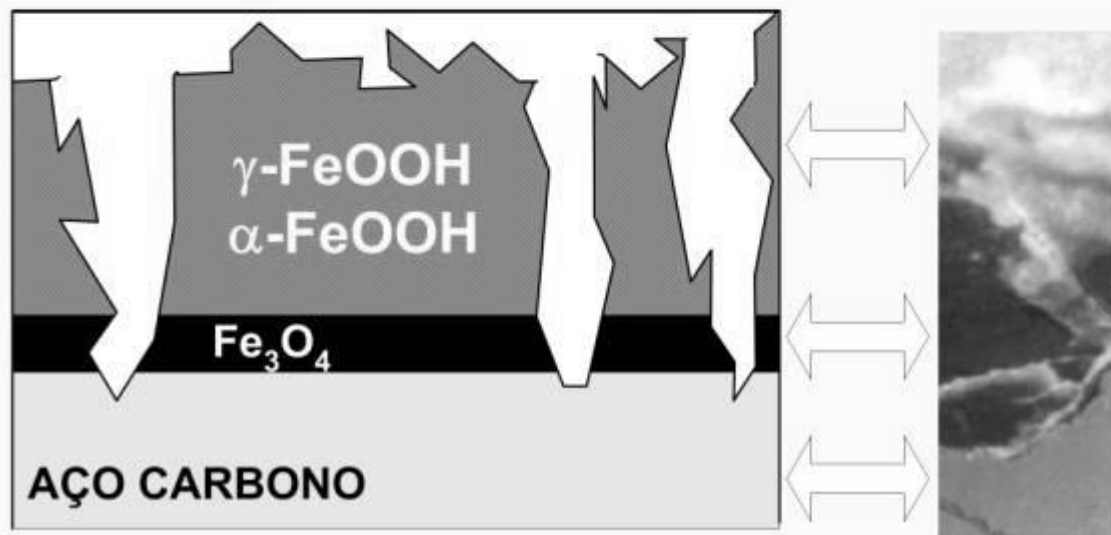
United States Steel Corp. – USS

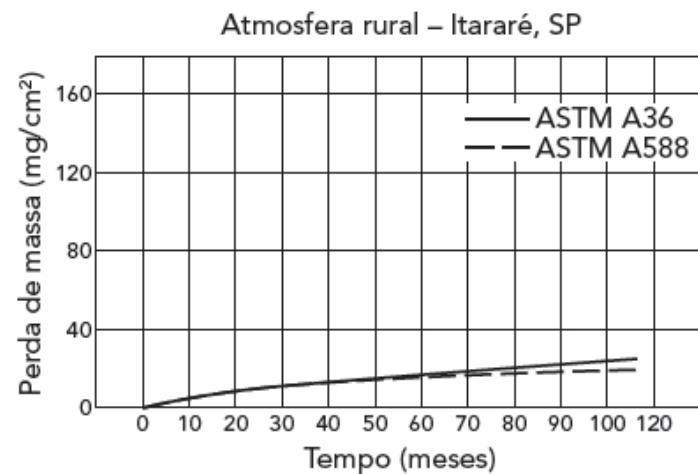
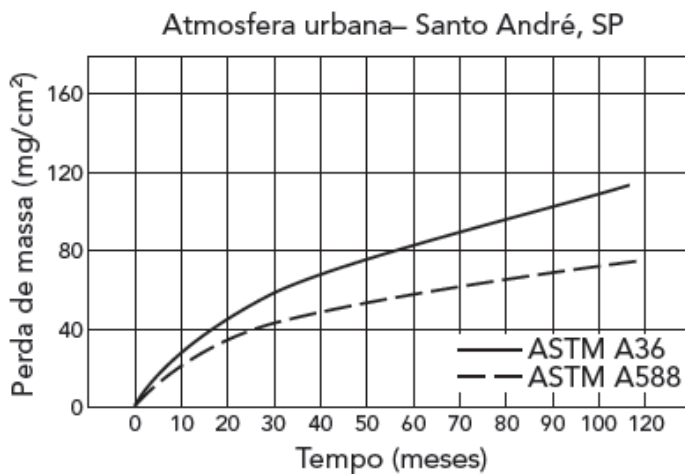
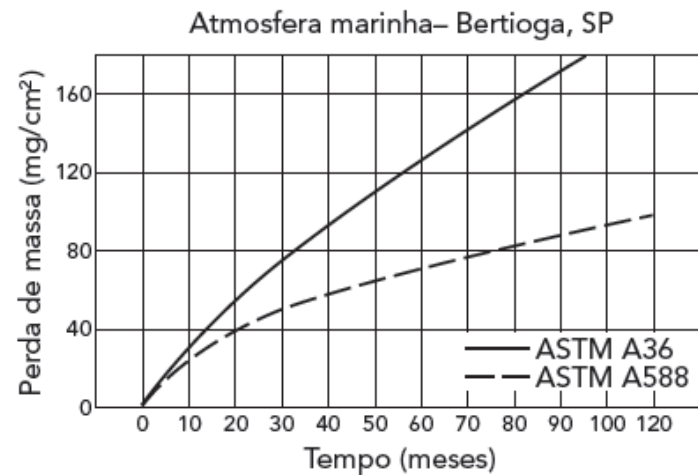
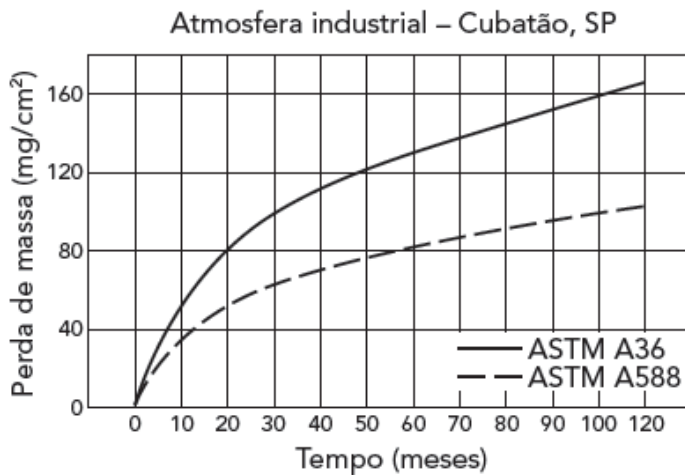
COR-TEN (1932)

Cu, Ni, Cr, Si e P

Diferente?







Eero Saarinen (1910 – 1961)









Estruturas de aço para edifícios – Valdir Pignatta e Silva | Fabio Domingos Pannoni

Classificação

ABNT NBR 5008, 5920, 5921 e 7007

ASTM A242, A588, A709

BS EN 10025-5

Benefícios

Desempenho

Pequena manutenção

Menor custo inicial e ao longo da vida útil

Velocidade de construção

Beleza

Benefícios ambientais

Limitações

Ambientes marinhos

$[\text{Cl}^-] < 300 \text{ mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$

Ambientes permanentemente úmidos

Ambientes industriais muito poluídos

$[\text{SO}_2] < 200 \mu\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$



Monumento ao
Jangadeiro, em aço
patinável (Fortaleza),
4 meses após a
inauguração...

O monumento, 5 anos
depois...

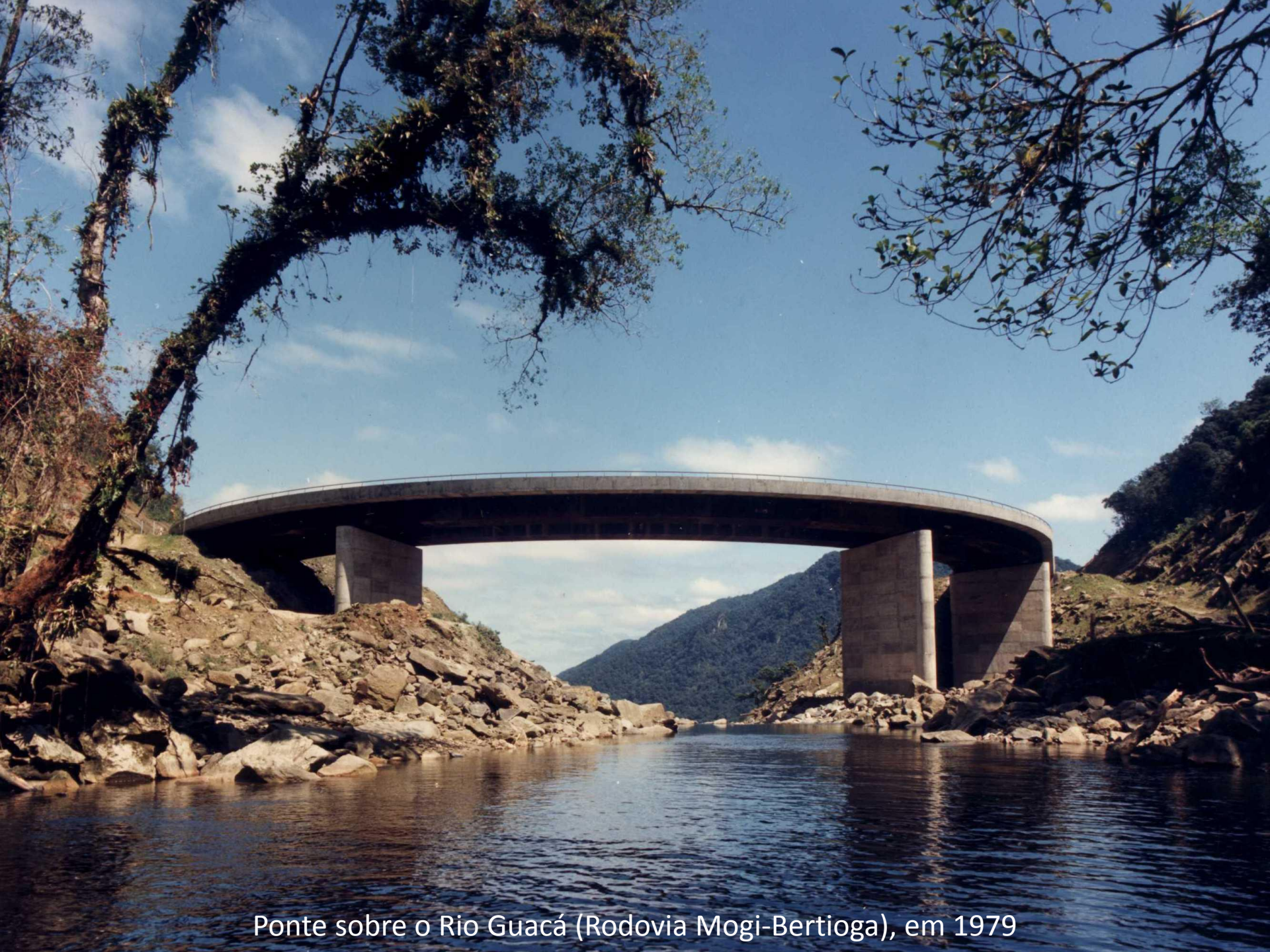




ABRINDO O LAR DA PAZ
ELE POR LÁ É FELIZ







Ponte sobre o Rio Guacá (Rodovia Mogi-Bertioga), em 1979



Viaduto Reinaldo de Oliveira, Osasco, 1992



Ponte Juscelino Kubitschek, Brasília, 2002



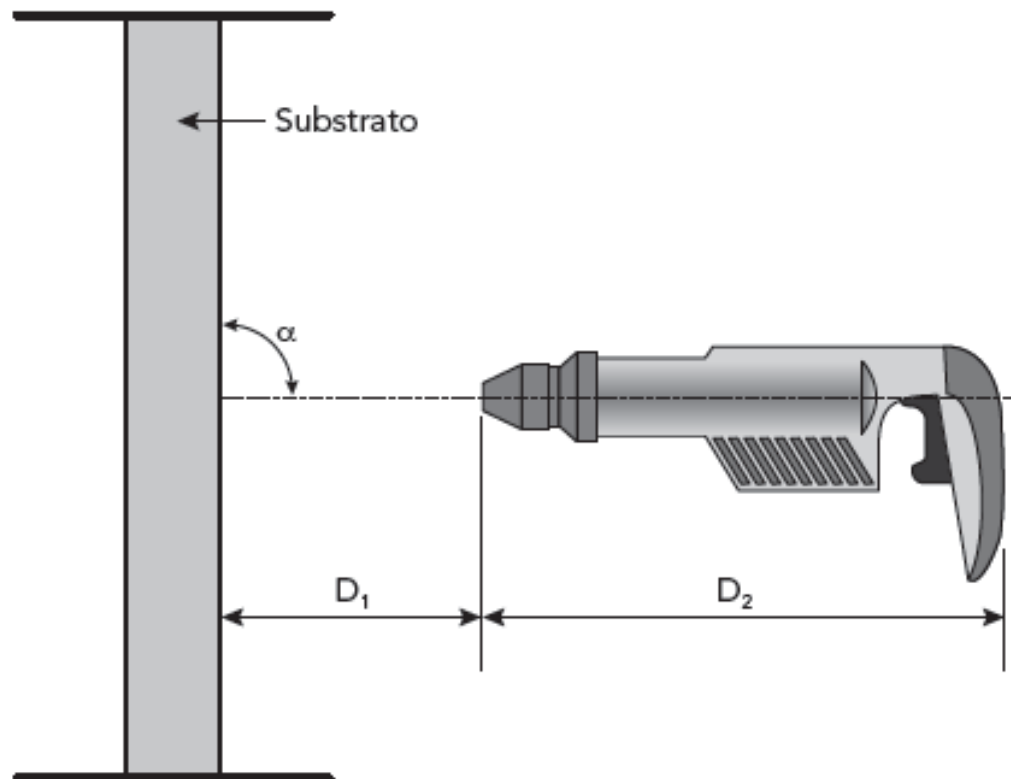
Ponte Ayatori, Yamanaka-machi, 1991

1 Qualifique a
agressividade
do ambiente

2 Escolha aços
e sistemas de
proteção
adequados e
normatizados

3 Atenção ao
detalhamento

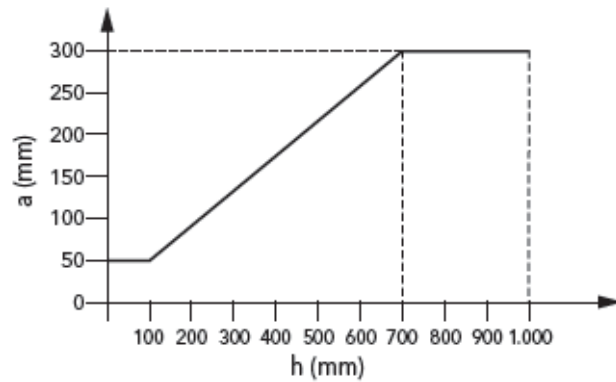
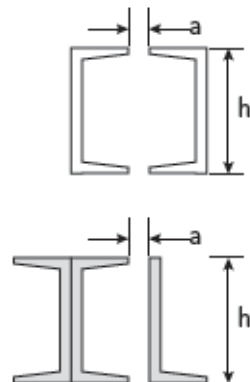
acessibilidade



α = Ângulo formado pelo eixo da ferramenta com o substrato

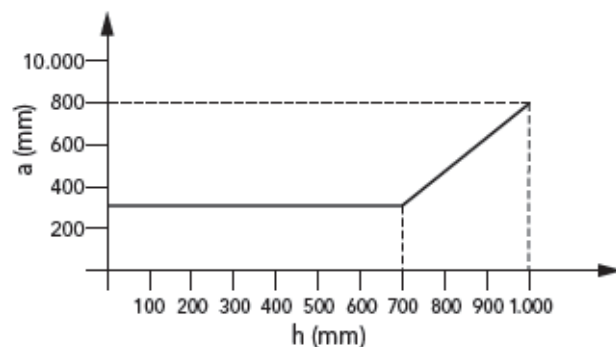
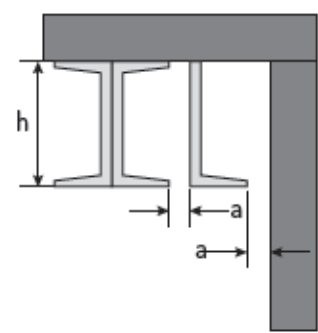
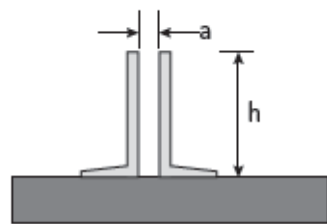
D_1 = Distância da ferramenta ao substrato

D_2 = Comprimento da ferramenta



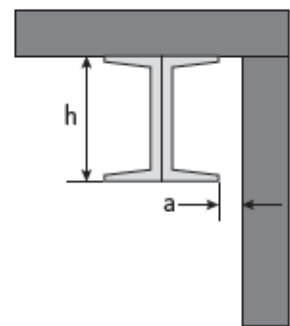
(a)

a = Distância mínima permitida entre os perfis ou entre um perfil e uma superfície adjacente.
 h = Distância máxima que um operador pode atingir em espaços restritos (mm).
 A distância mínima permitida entre dois perfis é dado pelo gráfico de a "versus" h , até 1.000 mm (Gráfico a).



(b)

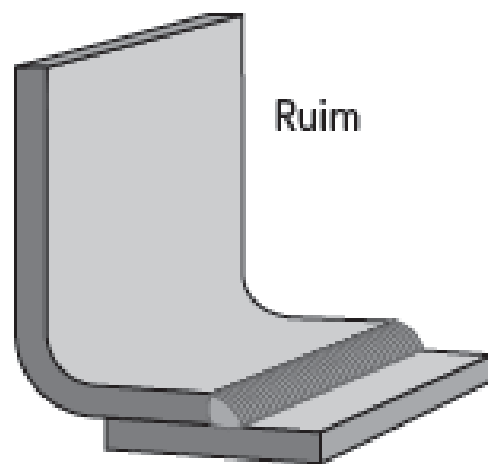
A distância mínima permitida (a) entre o perfil e a superfície adjacente é dada pelo Gráfico b
 Obs. 1 Se o operador deve atingir distâncias maiores do que 1.000 mm, o (Gráfico b) deve ser preferivelmente no mínimo de 800 mm.
 Obs. 2 Quando o projetista não puder utilizar estas recomendações, medidas especiais deverão ser tomadas.



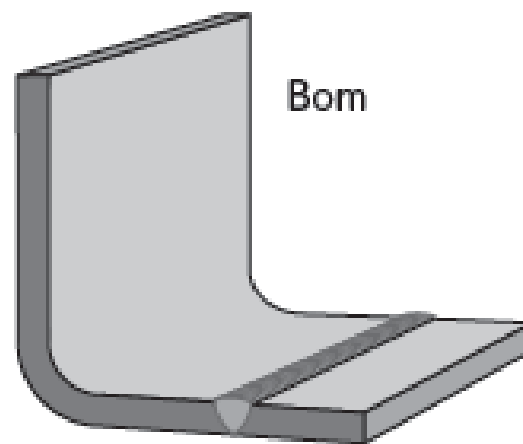






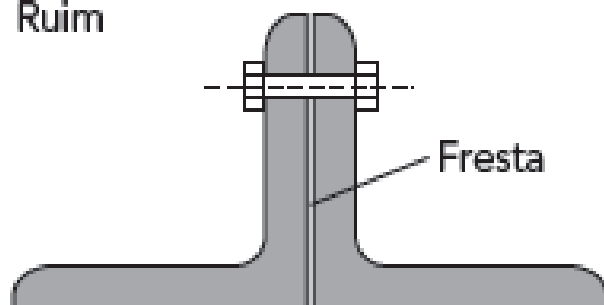


Ruim



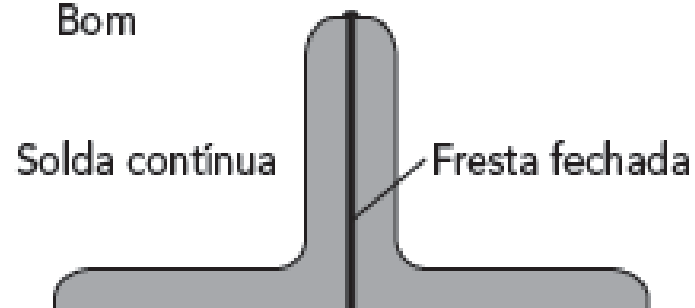
Bom

Ruim



Fresta

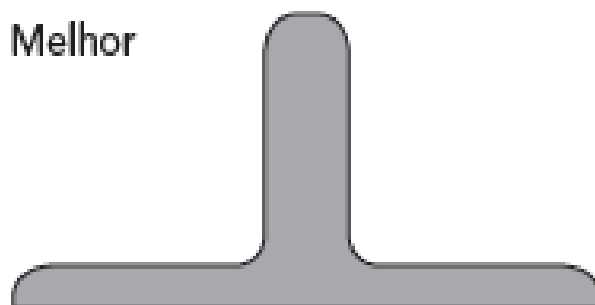
Bom



Solda contínua

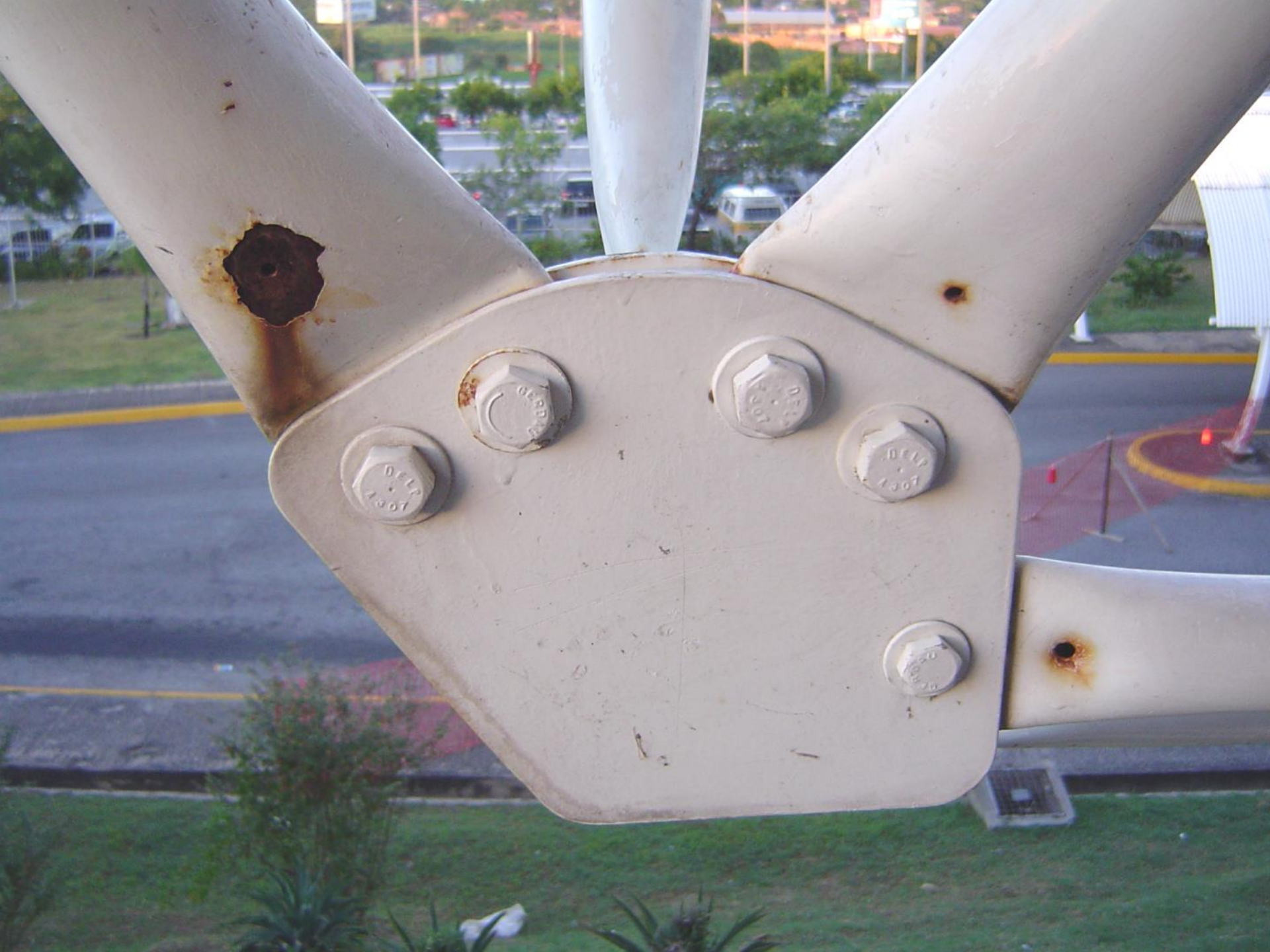
Fresta fechada

Melhor

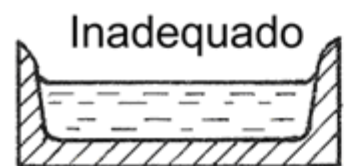




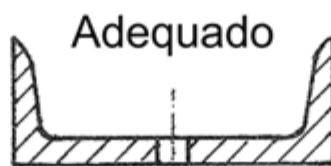




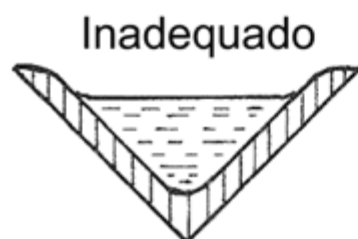
drenagem & limpeza



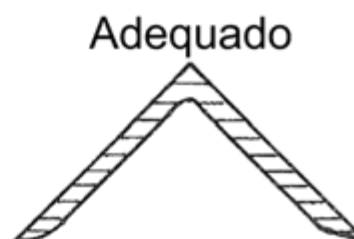
Umidade residual



Dreno



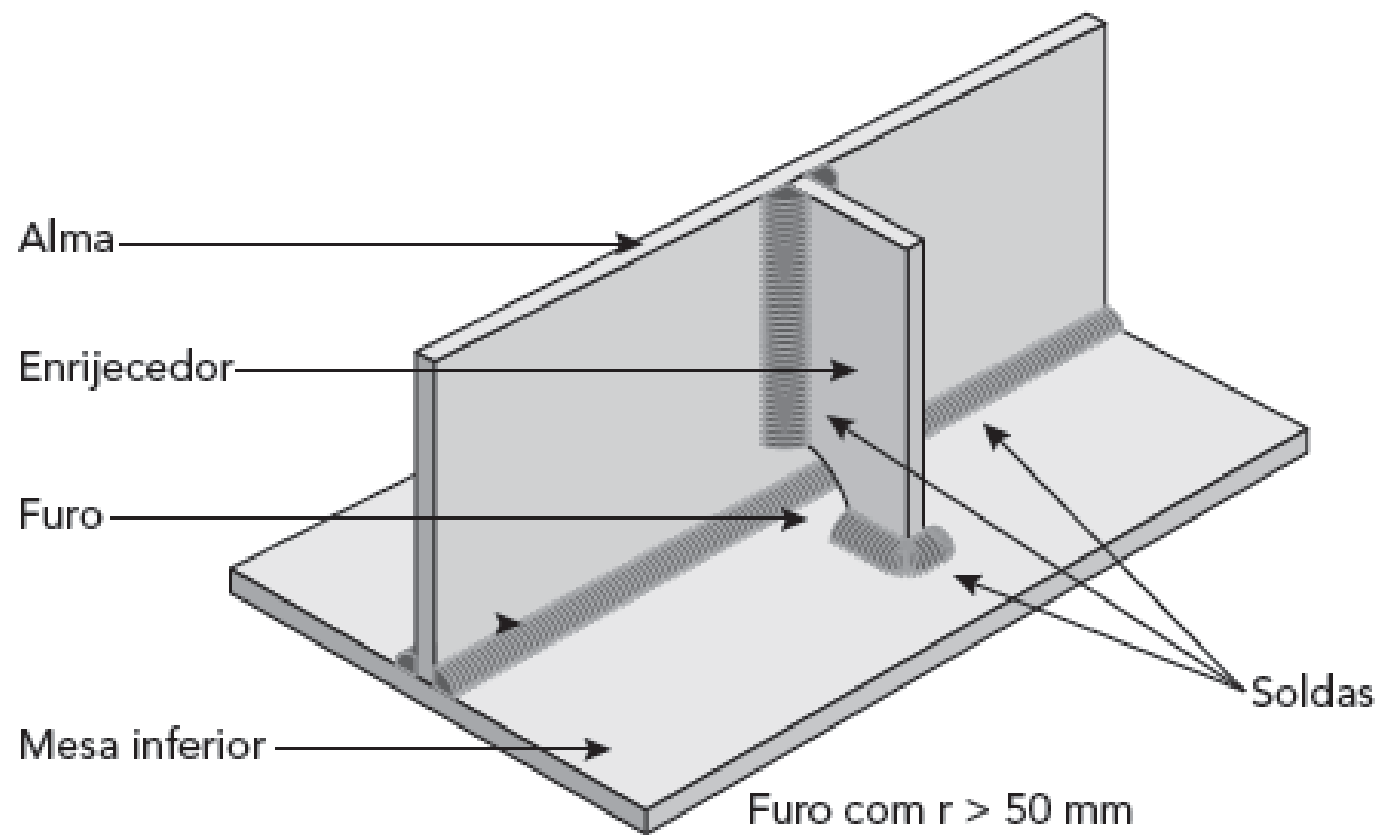
Umidade residual

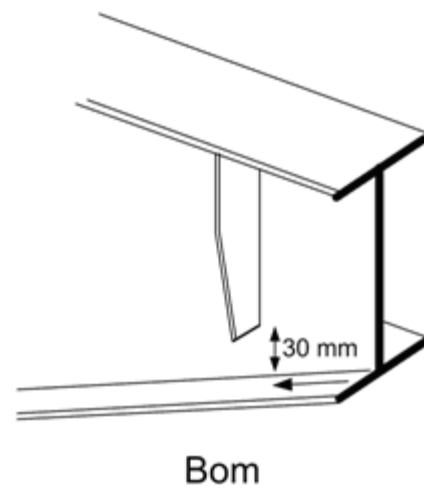
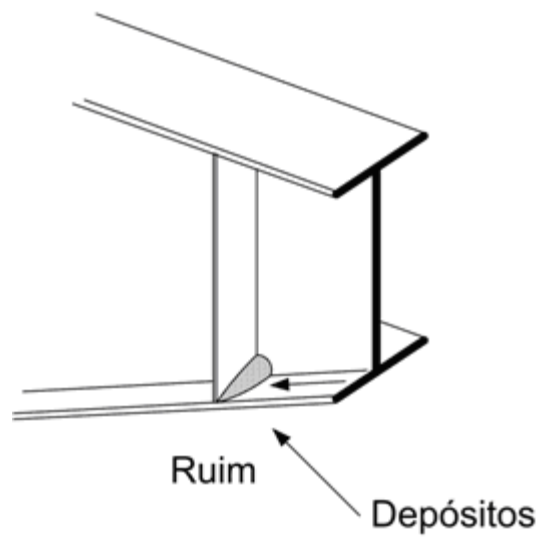
















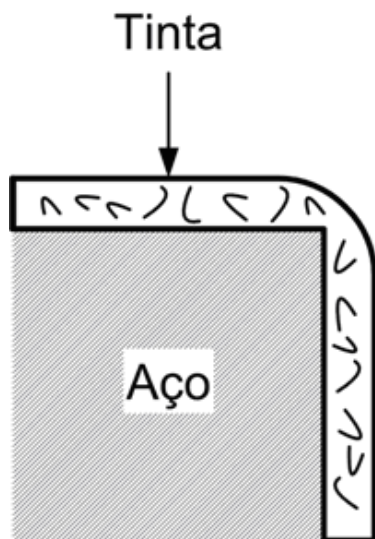




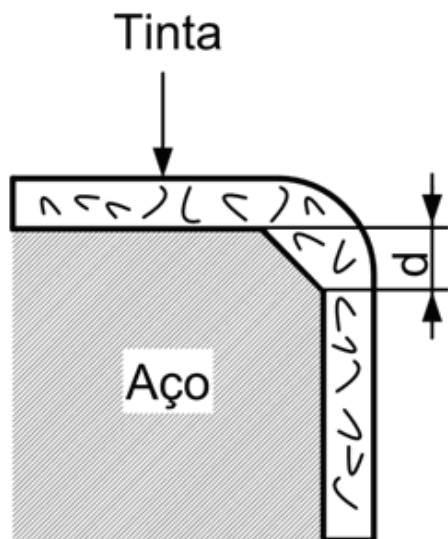


27 04 2002

outros detalhes

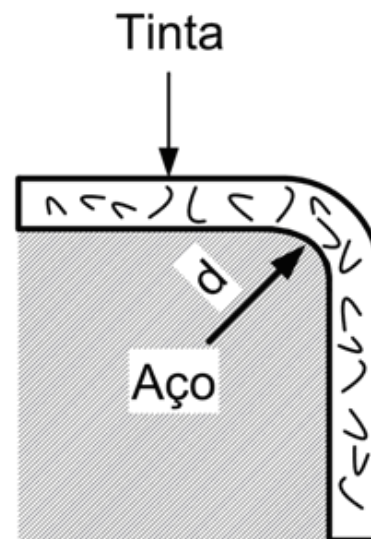


Ruim



$d > 1 \text{ mm}$

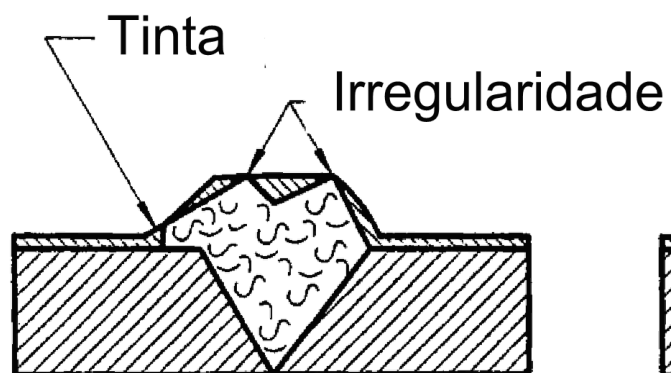
Bom



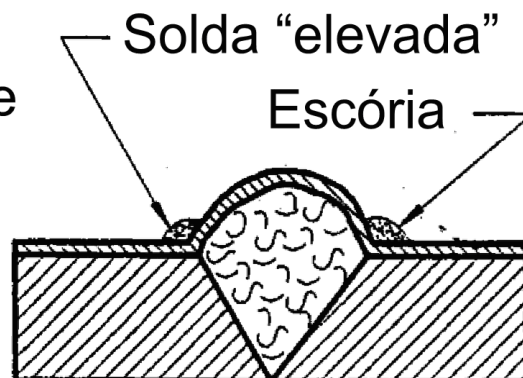
$r > 2 \text{ mm}$

Bom

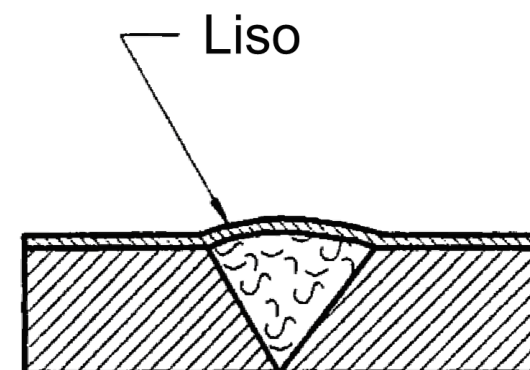




Ruim



Ruim



Bom

Os imprevistos sempre existem...

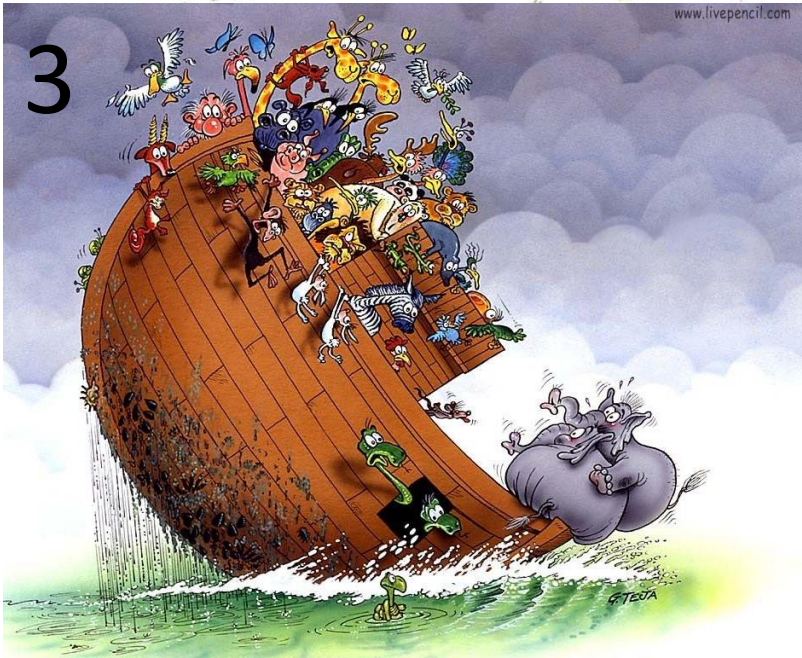
1



2



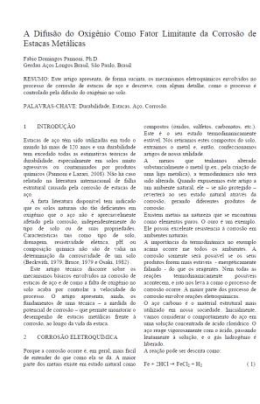
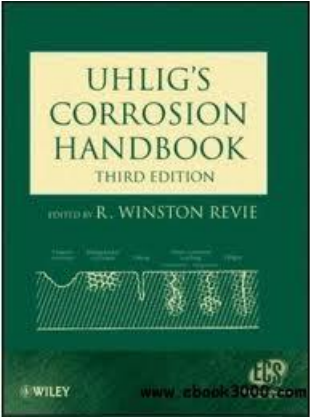
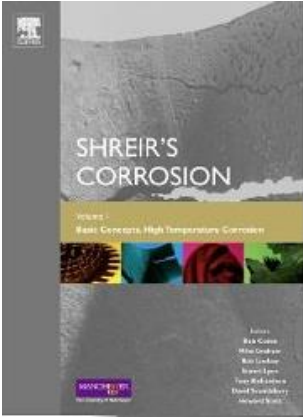
3



4



Bibliografia





fabio.pannoni@gerdau.com.br