

**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**

**Dipartimento di Scienze e Ingegneria dei Materiali, dell'Ambiente e  
Urbanistica**

---

# **DURABILITA' E PREVENZIONE PER LE STRUTTURE IN ACCIAIO**

***Prof. Romeo Fratesi***

***Seminario su: "Costruire oggi in acciaio per il domani"***  
***Venezia - NH Laguna Palace Mestre - 17 giugno 2015***

# DEGRADO DEI MATERIALI

**Perdita, nel tempo, delle caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche**

**Cause:**

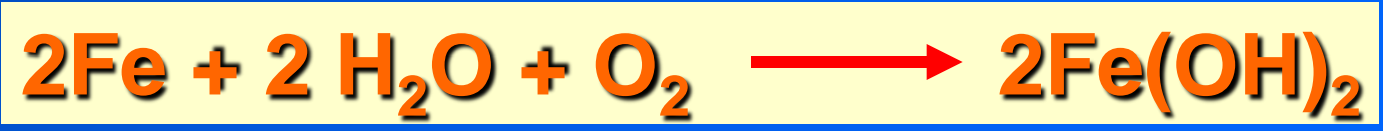
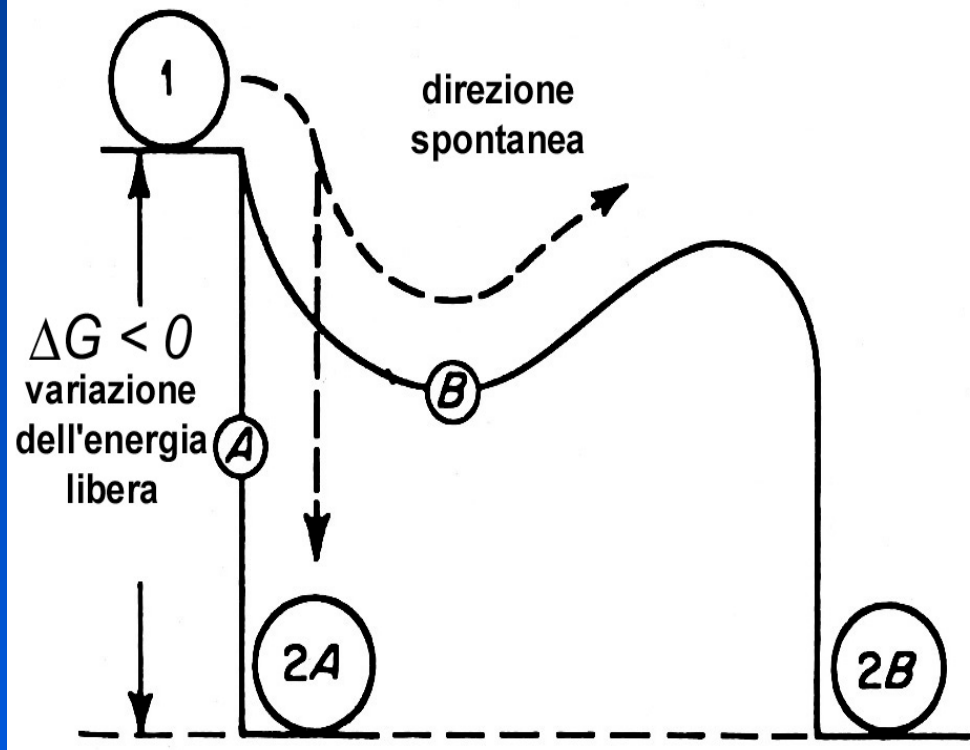
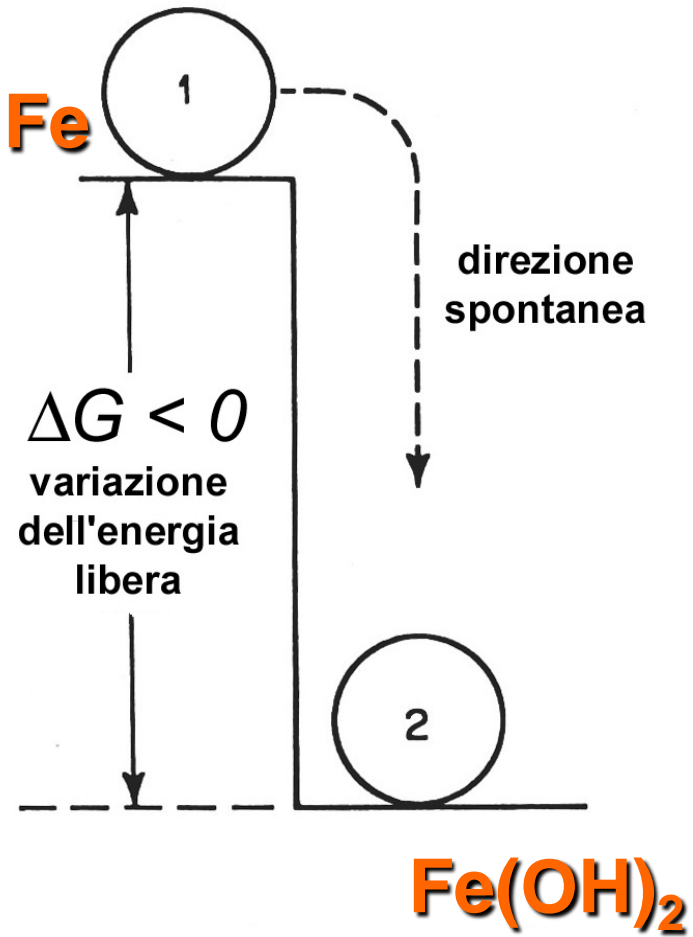
Trasformazioni intrinseche del materiale (es. invecchiamento, decadimento atomico)

Interazione del materiale con l'ambiente (es. corrosione)

# Prototipo internazionale del Kilogrammo custodito in una tripla teca sotto vuoto a Sèvres (F)



# Aspetti termodinamici di un processo di corrosione (il processo di corrosione è il risultato di due reazioni chimiche)





**Bibbia (Genesi, 3:19):**

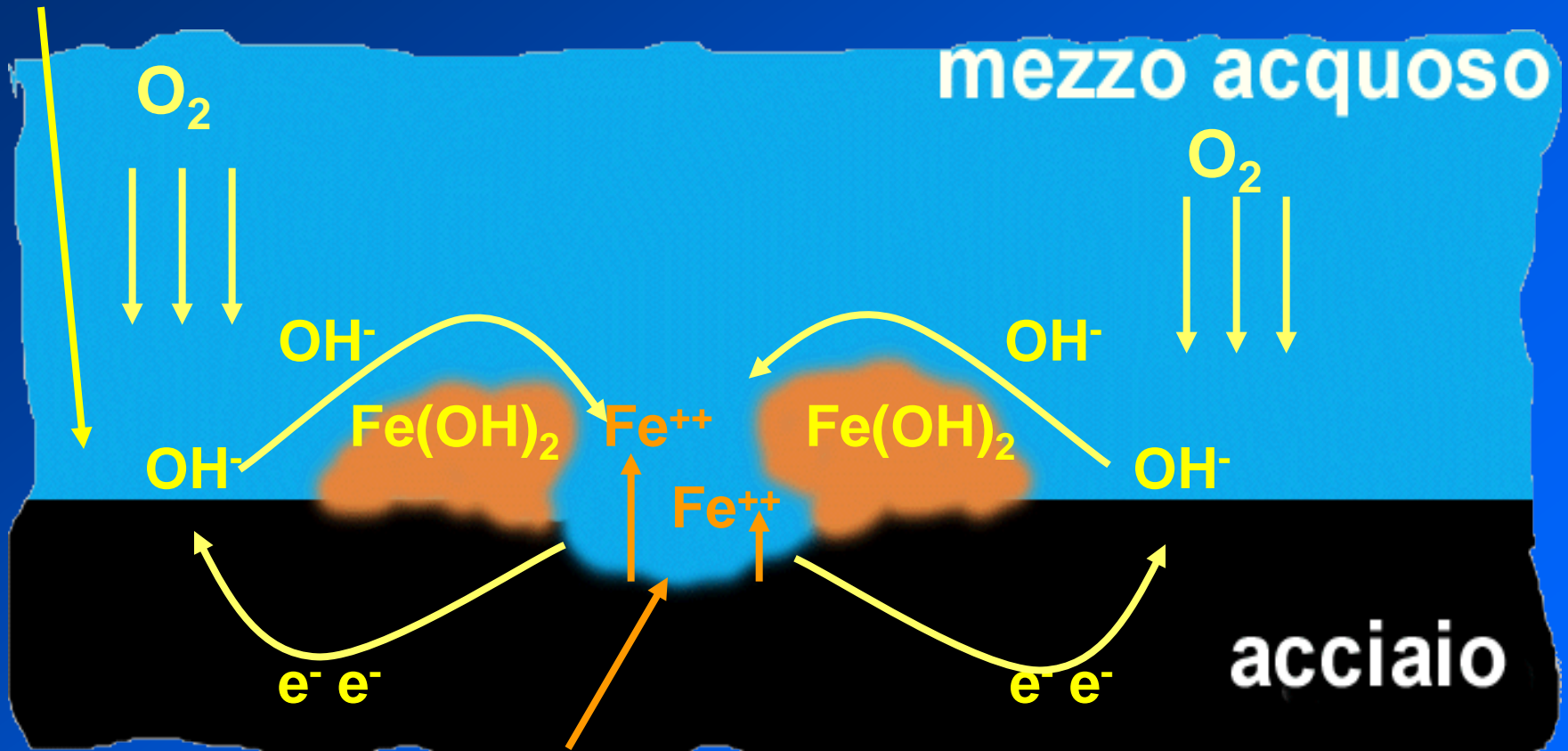
***... fino a che tornerai alla terra, perché da essa sei stato tratto, polvere tu sei e polvere tornerai***

## REAZIONI COINVOLTE NEL PROCESSO DI CORROSIONE



# MECCANISMO DI CORROSIONE DELL'ACCIAIO

reazione catodica



reazione anodica



# PROFILATI IN ACCIAIO AL CARBONIO DOPO 60 ANNI NEL GOLFO DI BRISTOL





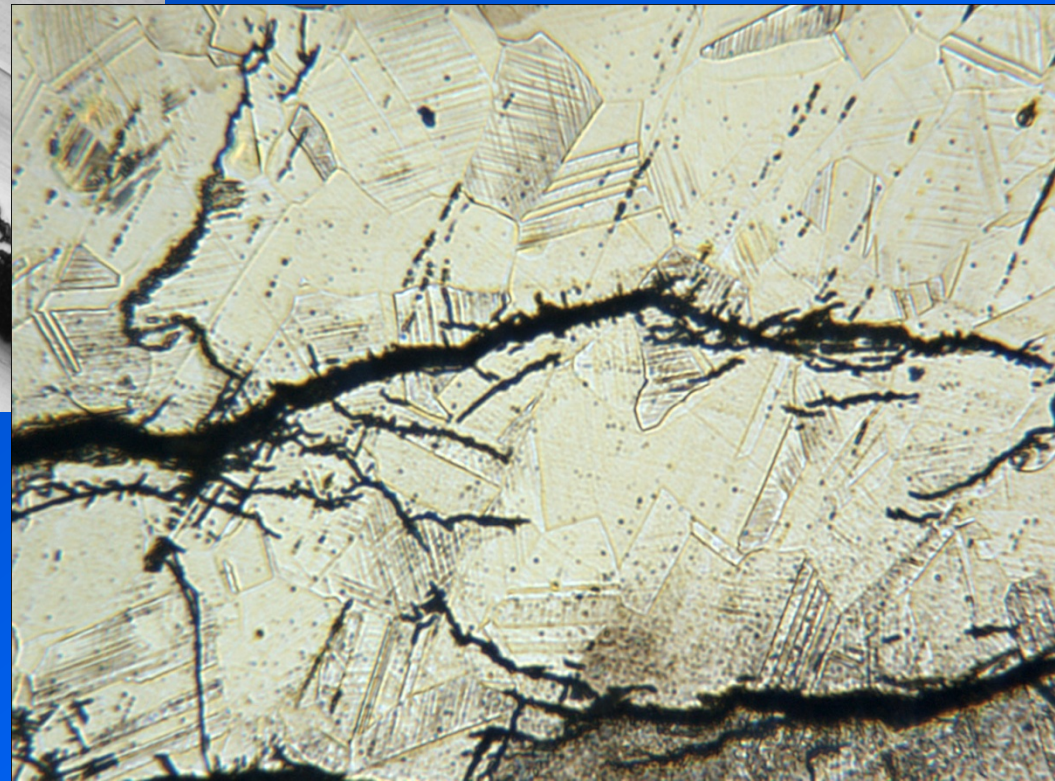
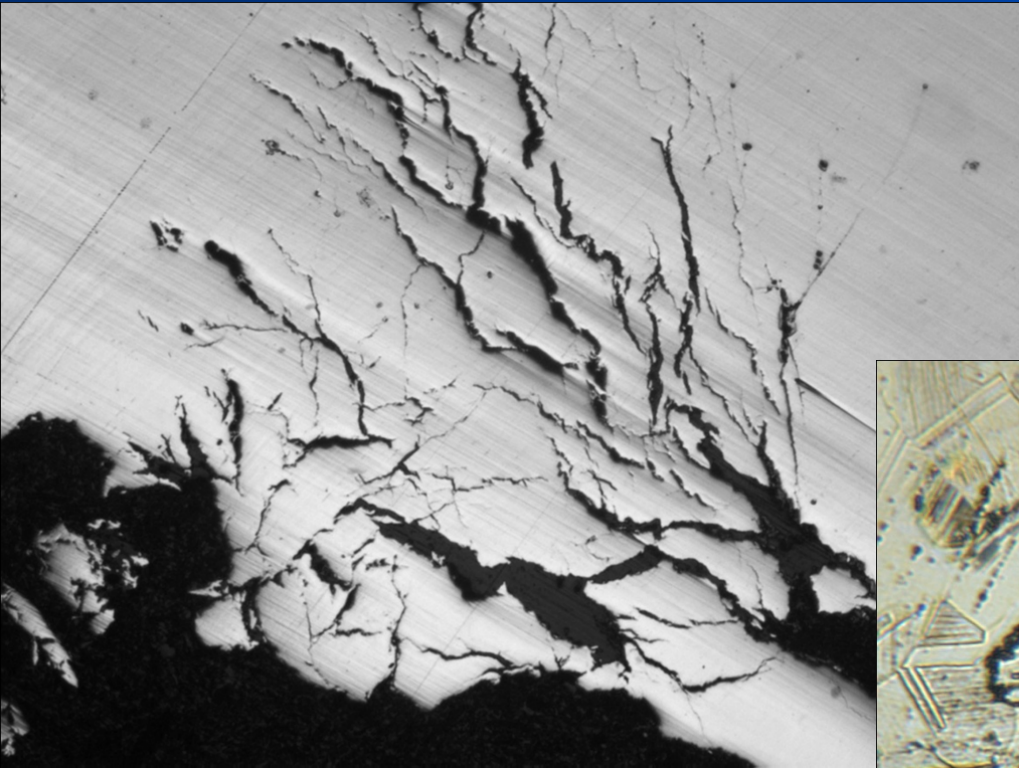
# COLLASSO DEL TETTO DELLA PISCINA DI ZURIGO, 1972-1985

12 VITTIME – 4 FERITI





# CRICCHE DOVUTE A “STRESS CORROSION” DEI TIRANTI DI ACCIAIO INOSSIDABILE

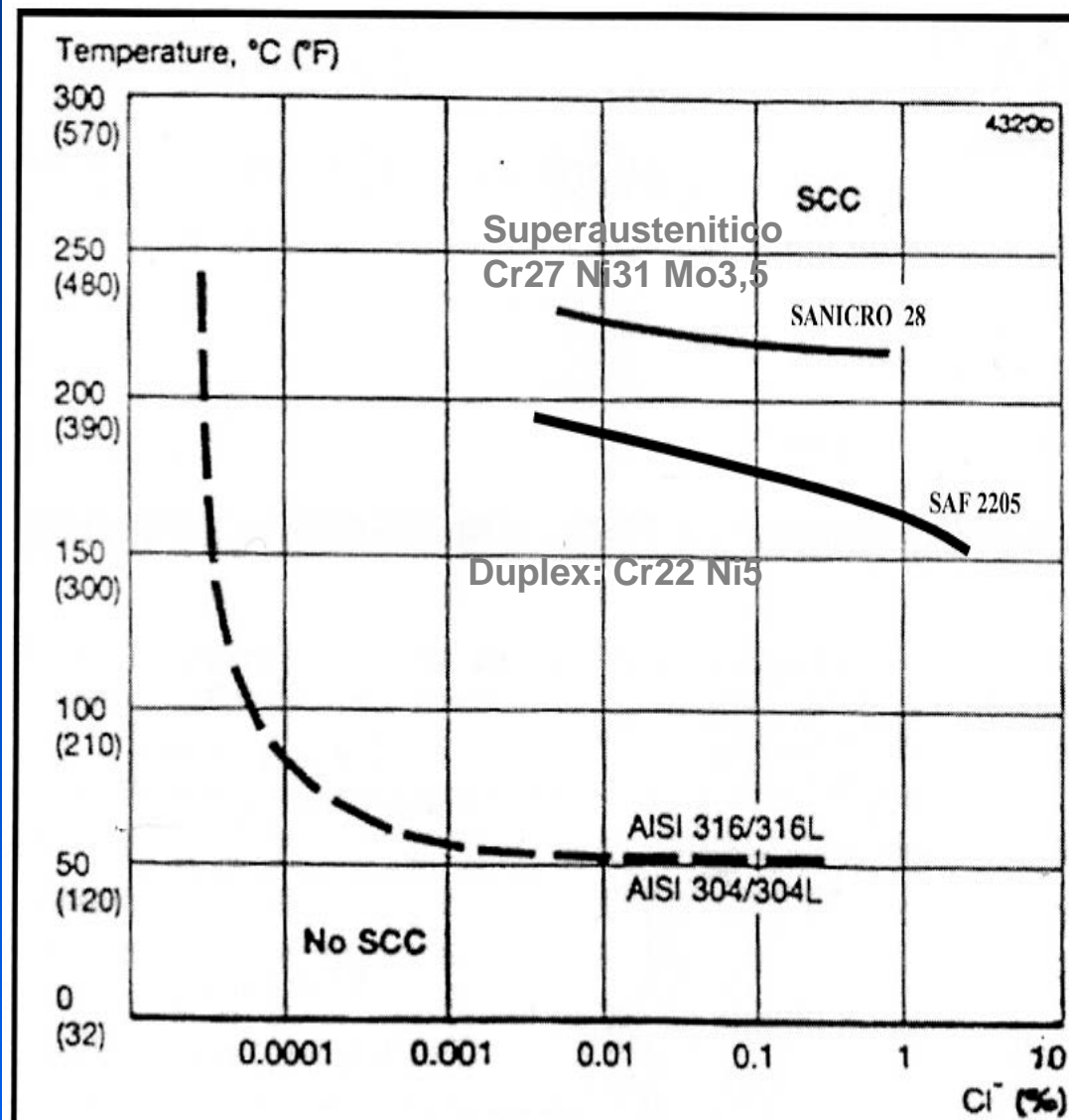
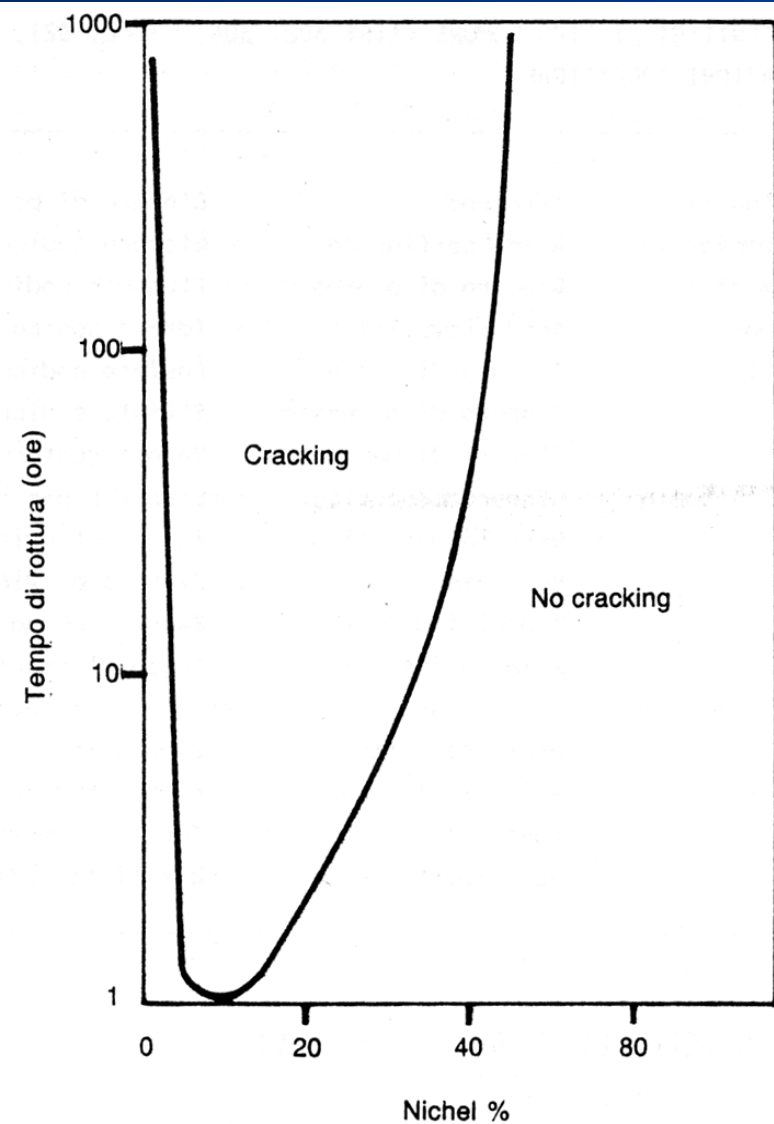


## Giornale dell'epoca:

**“Un' ipotesi parla di cedimento dei tiranti d'acciaio che sostenevano il soffitto: forse ruggine provocata dall' azione corrosiva dei vapori e dell' umidità che salivano dalla piscina.**

**Il procuratore di Zurigo Alois Brunner, cui è stata affidata l'inchiesta, deve ora appurare se i tiranti erano effettivamente d' acciaio inossidabile o meno: forse il desiderio di risparmio ad ogni costo ha posto fine a dodici vite.”**

# SUSCETTIBILITÀ ALLA SCC DI LEGHE Fe-Cr-Ni





# ELEMENTI CLIMATICI DELL'ITALIA

In Italia si ha prevalenza del clima temperato caldo e si contano circa 7500 Km di costa oltre che agglomerati urbani e industriali; ciò significa un pericolo per i materiali metallici.



## Climi temperati

- subtropicale
- caldo
- sublitoraneo
- subcontinentale
- fresco

## Clima temperato freddo

- freddo

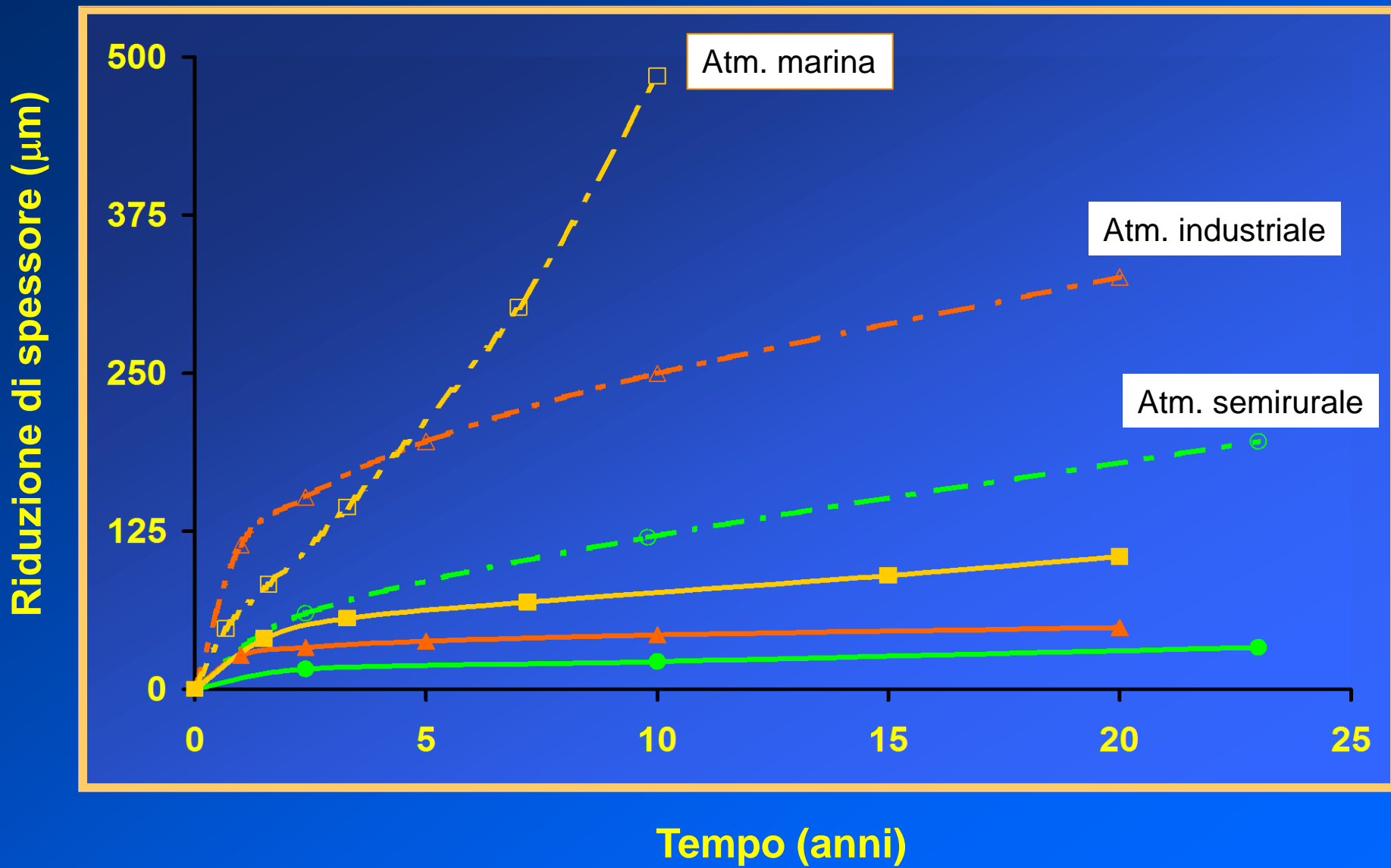
## Climi freddi

- freddo
- freddo glaciale

Secondo Köppen

# VELOCITA' DI CORROSIONE DELL'ACCIAIO AL CARBONIO E DELL'ACCIAIO CORTEN IN VARIE ATMOSFERE

( $C\%_{\max}=0.12\%$ ,  $Mn\%=0.20-0.50\%$ ,  $P\%=0.07-0.15\%$ ,  $Si\%=0.25-0.75$ ,  $Cu\%=0.25-0.75$ ,  $Cr\%=0.30-1.25$ )



# RECINZIONE IN ACCIAIO CORTEN IN ATMOSFERA MARINA



## LIMITAZIONE ALL'USO DEL CORTEN

### ▶ Ambiente marino

$\text{Cl}^- > 300 \text{ mg/m}^2 \text{ day}$ , in accordo con norma ISO 9223  
( $< 2 \text{ Km}$  dalla costa)

### ▶ Ambiente stradale ove si usano disgelanti

### ▶ Ambiente industriale

$\text{SO}_2 > 250 \text{ mg/m}^2 \text{ day}$ , in accordo con norma ISO 9223

### ▶ Condizioni di bagnamento continuo

### ▶ Interrato o coperto da vegetazione



# CLASSIFICAZIONE DEL GRADO DI INFLUENZA DEI CLORURI (ISO 9223)

## CLORURI

Classi	Grado di deposizione mg/m <sup>2</sup> giorno
S <sub>0</sub>	<3
S <sub>1</sub>	3 – 60
S <sub>2</sub>	61 – 300
S <sub>3</sub>	>300

# CATEGORIE DI VALUTAZIONE DI “SD” (Sulphate Deposition in mg/m<sup>2</sup> giorno)

$SD \leq 10$	P <sub>0</sub>
$11 < SD \leq 35$	P <sub>1</sub>
$36 < SD \leq 80$	P <sub>2</sub>
$81 < SD \leq 200$	P <sub>3</sub>

# **RECENTE COSTRUZIONE IN ZONA MARINA CON VASTO UTILIZZO DI ACCIAIO INOSSIDABILE**





**RECENTE COSTRUZIONE IN ZONA MARINA CON VASTO UTILIZZO  
DI ACCIAIO INOSSIDABILE (AISI 316L)**





# RECENTE COSTRUZIONE IN ZONA MARINA CON VASTO UTILIZZO DI ACCIAIO INOSSIDABILE (AISI 316L)



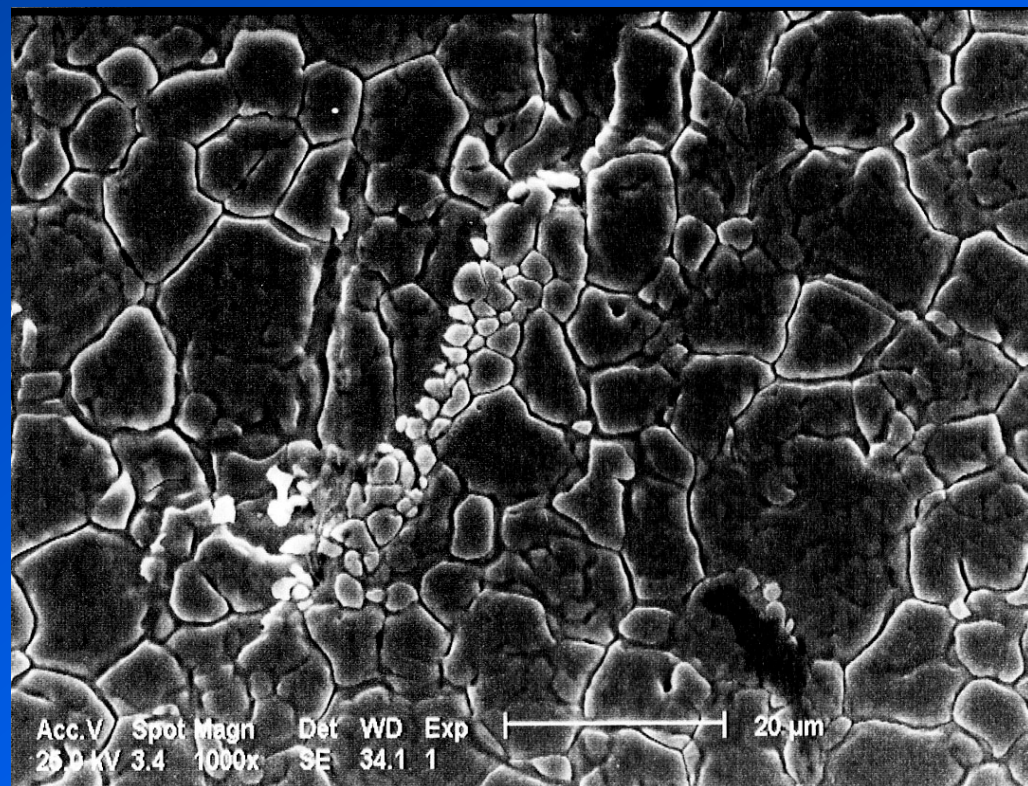
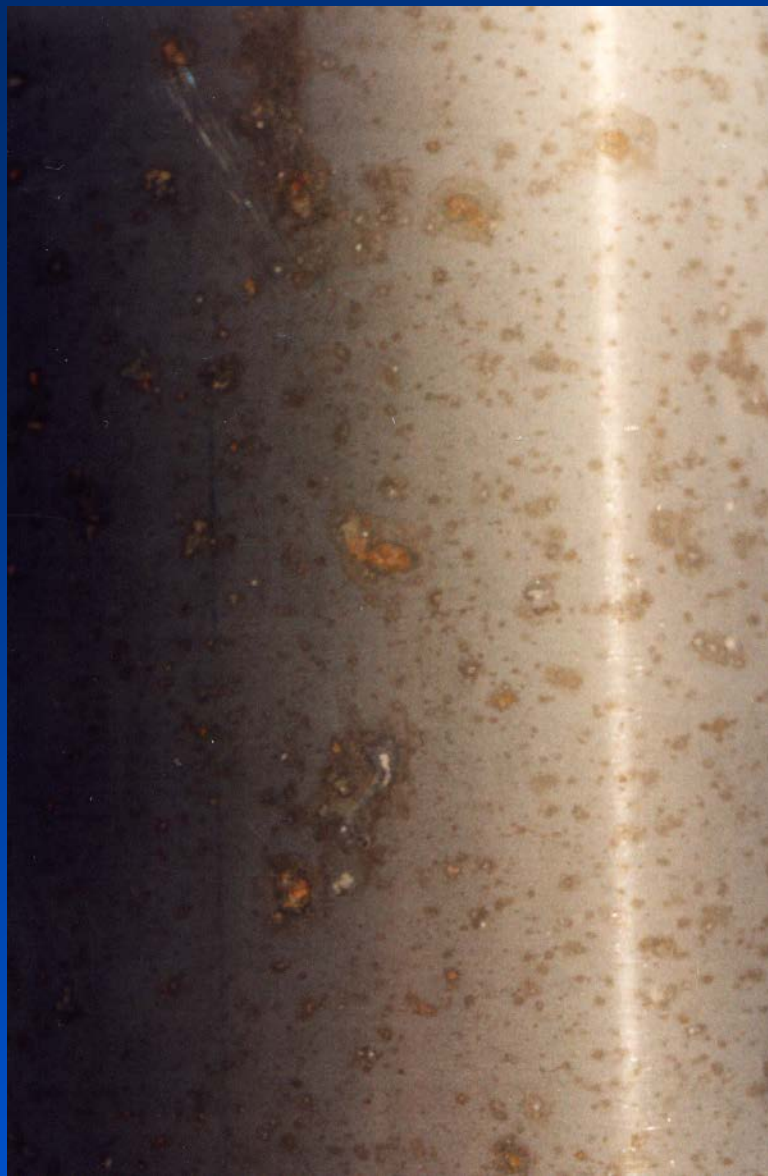






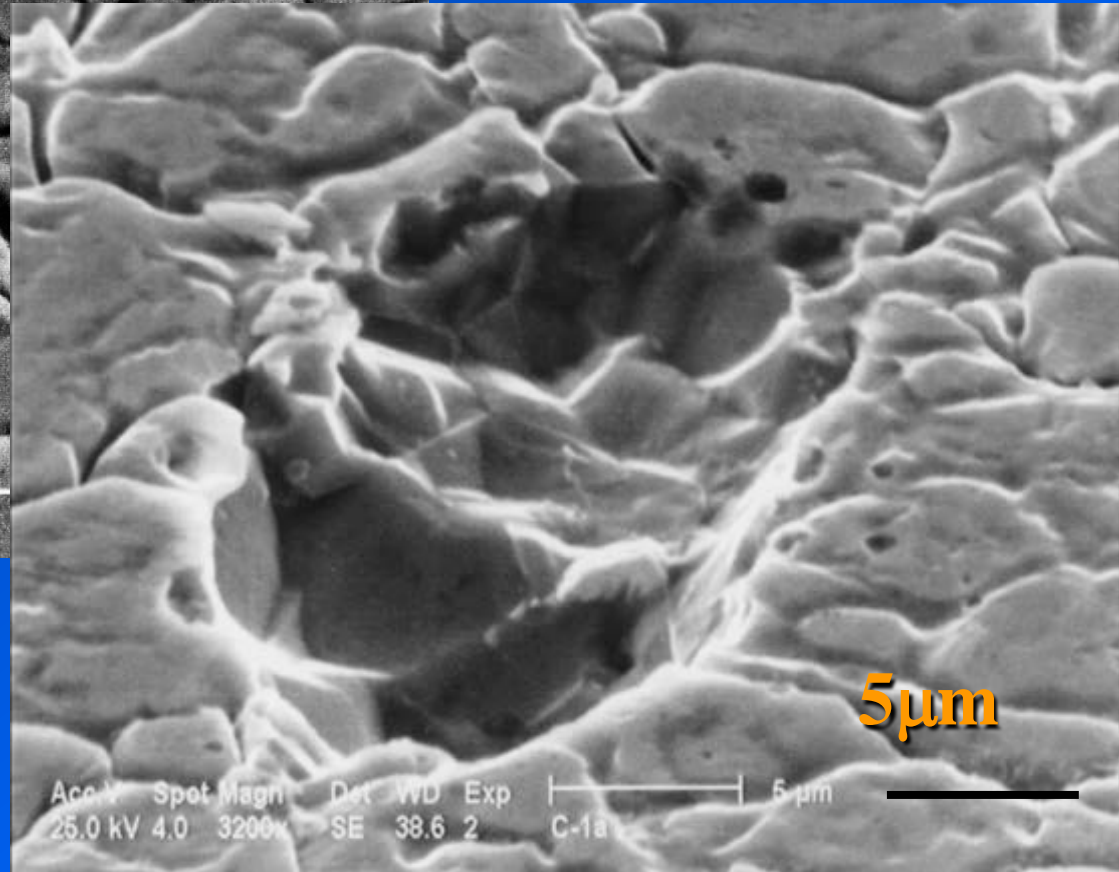
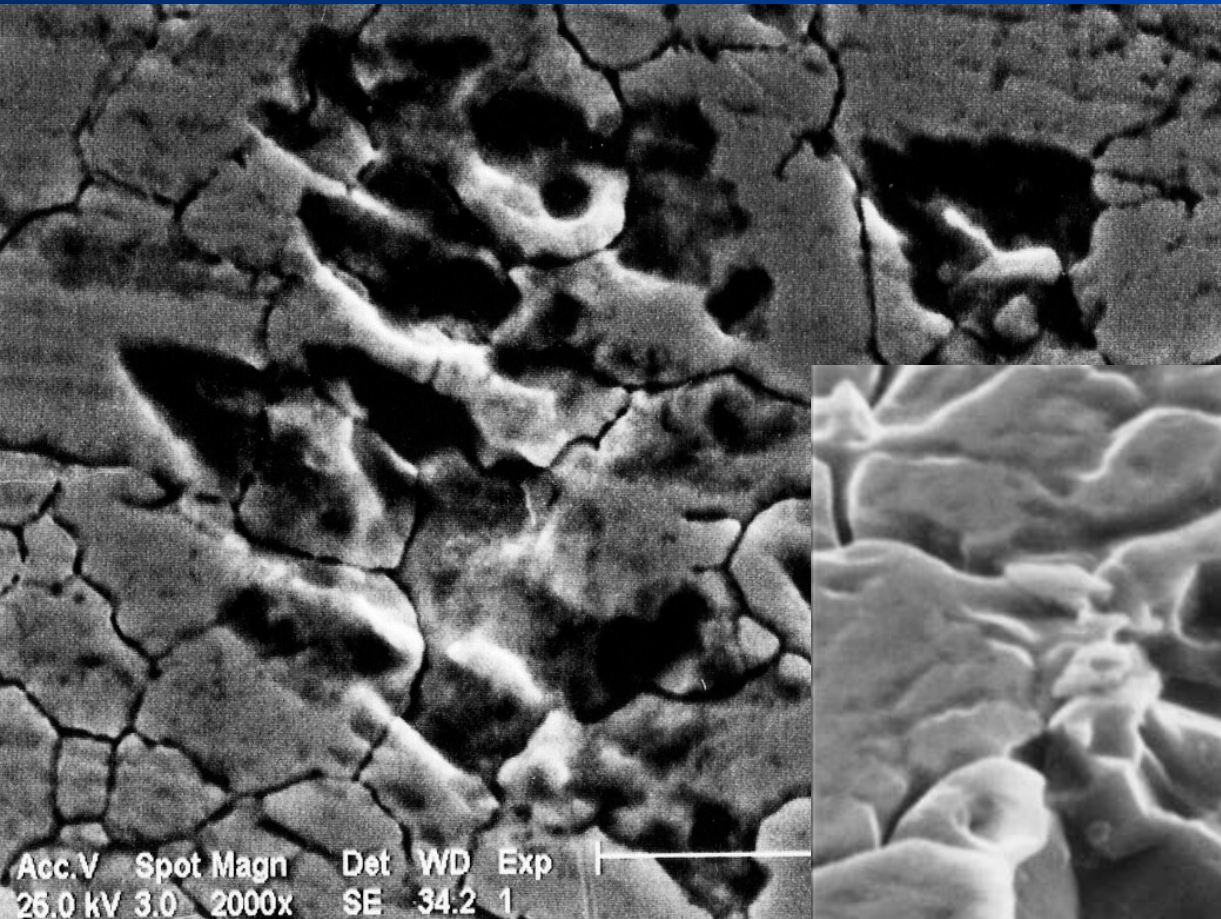


# ACCIAIO INOSSIDABILE AISI 316 CON FINITURA SUPERFICIALE "2B"





# OSSERVAZIONE AL MICROSCOPIO ELETRONICO DELL'ATTACCO PER PITTING SULL'ACCIAIO INOSSIDABILE AISI 316 CON FINITURA "2B"



# ACCIAIO INOSSIDABILE AISI 316 CON FINITURE SUPERFICIALI "BA" E "2B" ESPOSTI IN LOCALITÀ VICENZA

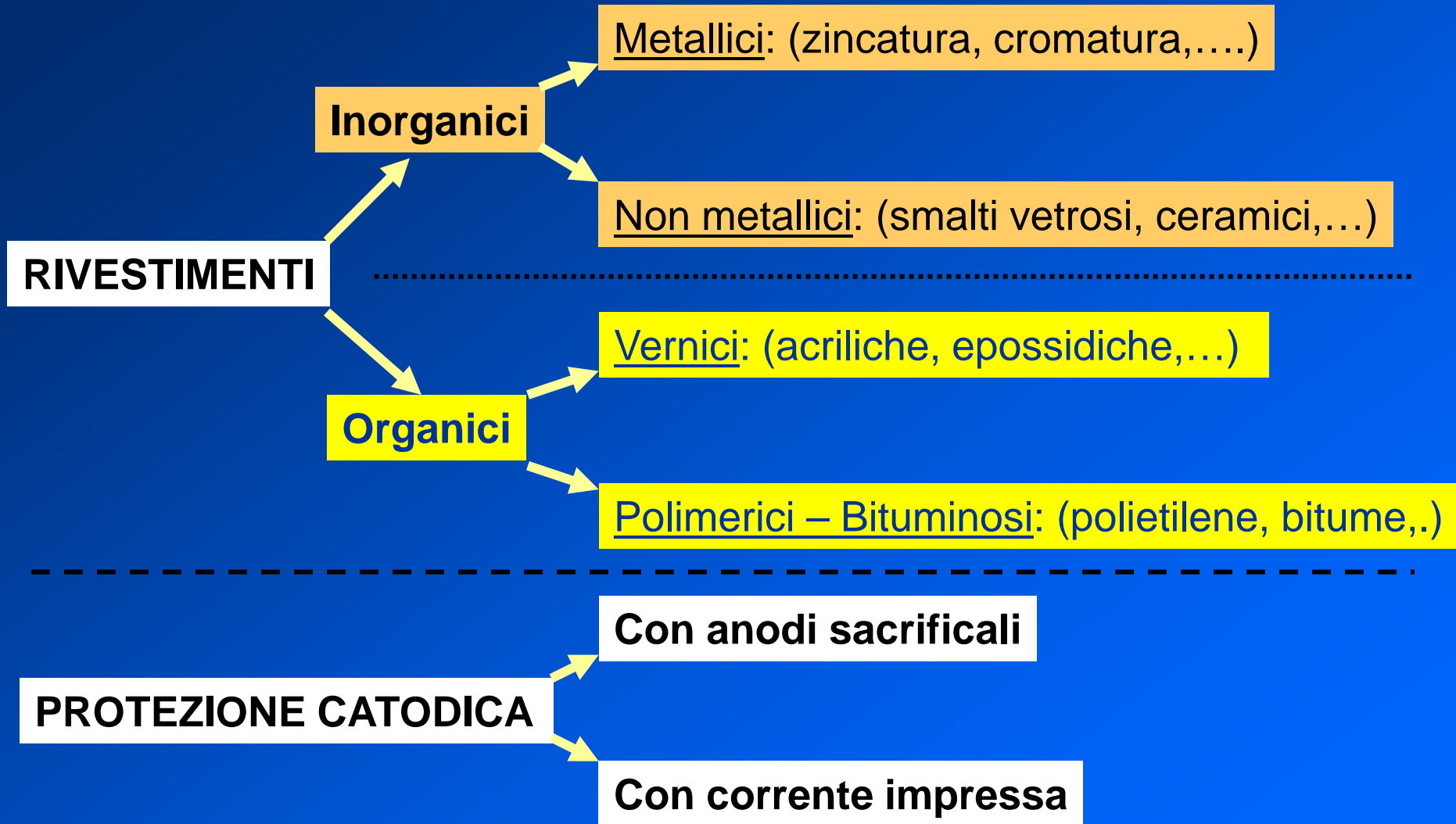




# **COPRITUBI DI ACCIAIO INOSSIDABILE AISI 304 CON FINITURA SUPERFICIALE "BA" ESPOSTI IN ATMOSFERA MARINA**



# PROTEZIONE DELL'ACCIAIO DALLA CORROSIONE





# ELEMENTI CLIMATICI DELL'ITALIA

In Italia si ha prevalenza del clima temperato caldo e questo rappresenta un indubbio vantaggio per i prodotti zincati in esercizio nel nostro Paese.



<b>Climi temperati</b>	<b>Clima temperato freddo</b>
subtropicale	freddo
caldo	
sublitoraneo	
subcontinentale	
fresco	<b>Climi freddi</b>
	freddo
	freddo glaciale

*Secondo Köppen*



# SISTEMI DI PROTEZIONE A BASE DI ZINCO

- Zincatura galvanica;
- Applicazione termica a spruzzo;
- Sherardizzazione;
- Verniciatura con prodotti a base di polvere di zinco;
- **Zincatura batch**  
(UNI EN ISO 1461)
- **Zincatura a caldo;** **Zincatura lam. Sendzimir**  
(UNI EN 10142 – 10147 )
- **Zincatura filo in continuo**  
(UNI EN 10244-2)

# PROCESSO DI ZINCATURA A CALDO

## SGRASSAGGIO:

- basico (NaOH  $\approx$ 15%)
- acido ( $H_3PO_4$  + tensioattivi)

## LAVAGGIO:

- acqua

## DECAPAGGIO:

- HCl  $\approx$ 18%
- $H_2SO_4$   $\approx$ 13%

## PRERISCALDO:

- Forno 100-140°C

## PRE-FLUSSAGGIO:

- $NH_4Cl \cdot ZnCl_2 \approx 30Bè$

## LAVAGGIO:

- acqua

## ZINCATURA:

- Zinco fuso (T=440-450°C)

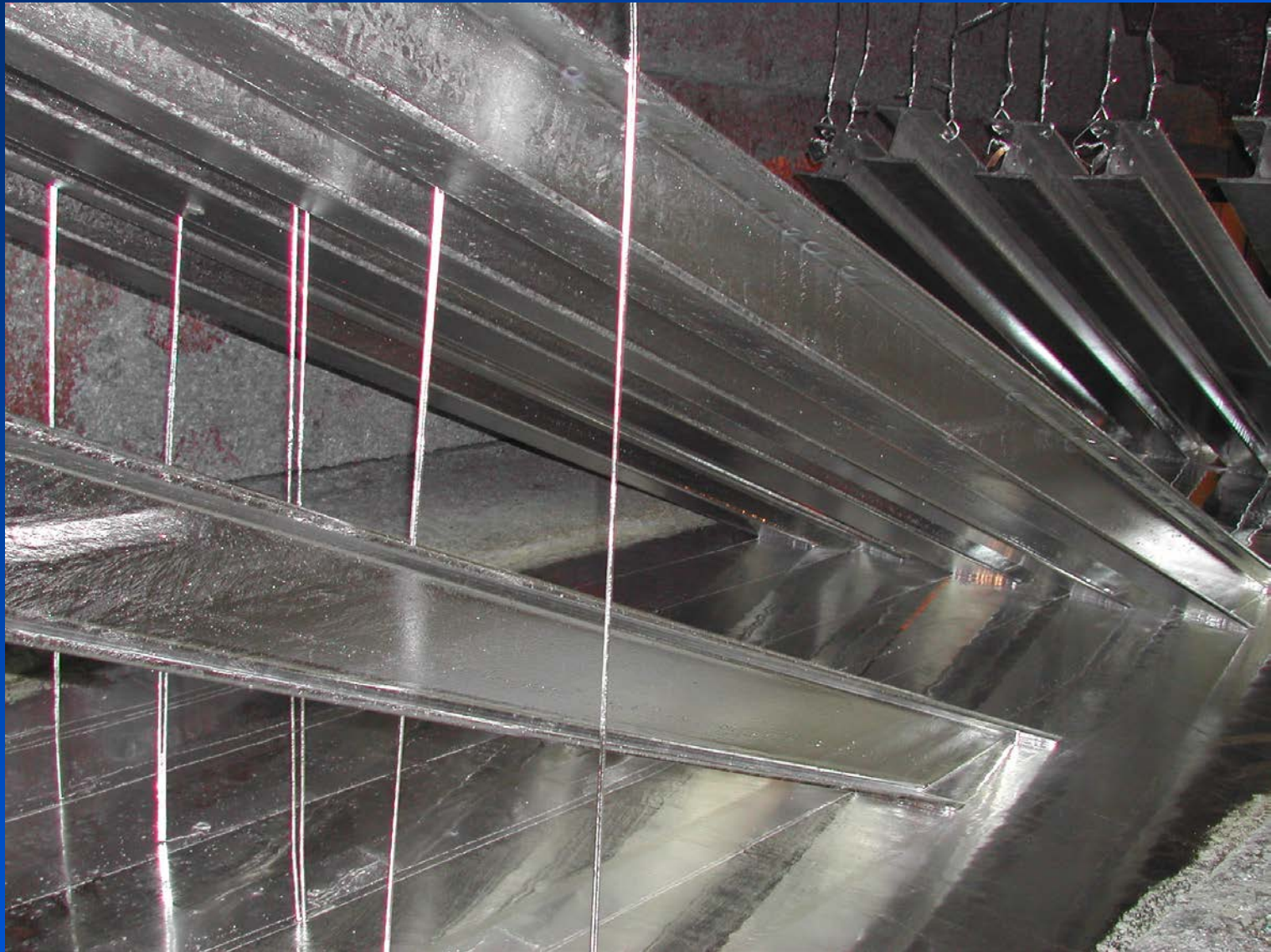
## RAFFREDDAMENTO:

- acqua
- aria

## POST-TRATTAMENTI:

- Passivazione
- Verniciatura, ecc...

# ESTRAZIONE DI TRAVI DI ACCIAIO DAL BAGNO DI ZINCATURA





# MECCANISMO DI PROTEZIONE

- **EFFETTO BARRIERA:**

⇒ il rivestimento di zinco isola il materiale ferroso da proteggere dagli agenti aggressivi presenti nell'ambiente;

- **EFFETTO SIGILLANTE:**

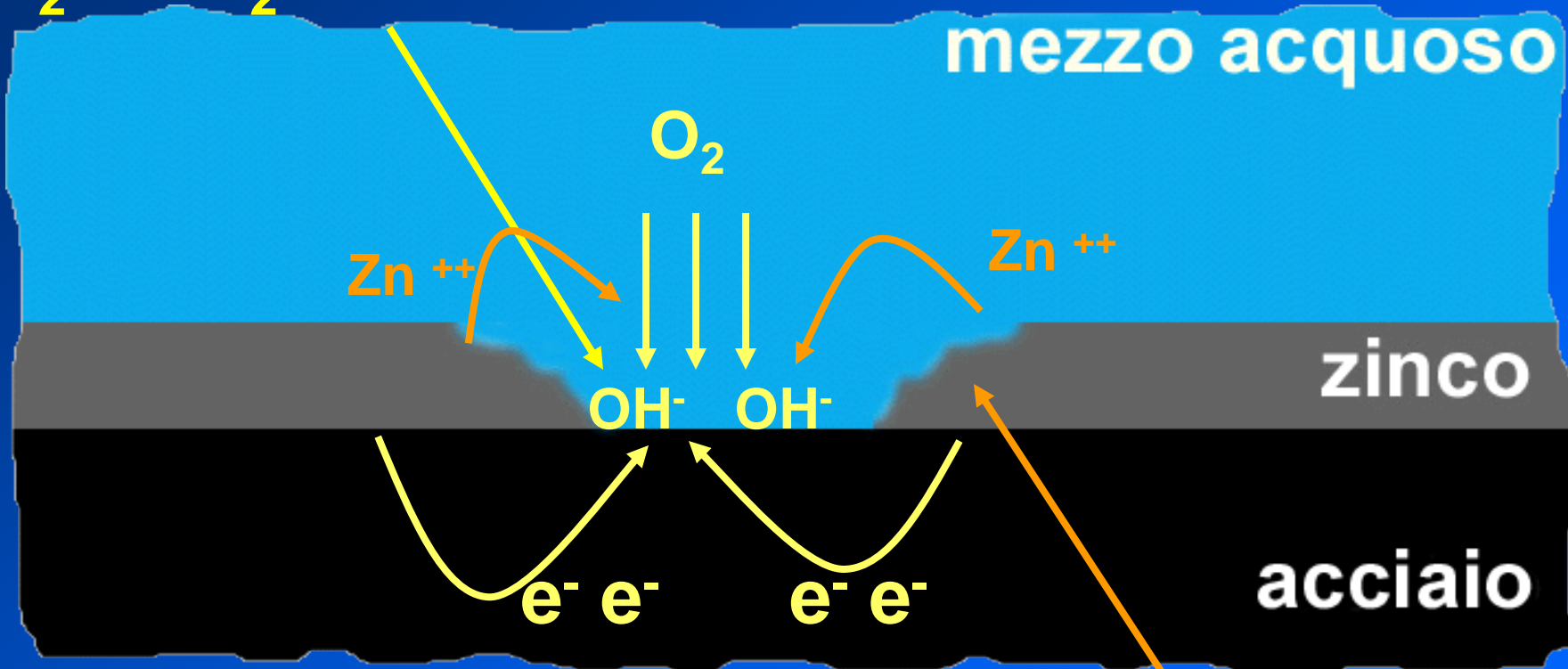
⇒ i prodotti di corrosione dello zinco tendono a ricoprire le eventuali discontinuità presenti nel rivestimento;

- **PROTEZIONE CATODICA:**

⇒ in presenza di un ambiente aggressivo lo Zn si comporta da anodo corrodendosi al posto dell'acciaio ( $E^{\circ}_{\text{Fe/Fe}^{2+}} = -0.44\text{V}$  e  $E^{\circ}_{\text{Zn/Zn}^{2+}} = -0.76\text{V}$ );

# MECCANISMO DI PROTEZIONE DELLO ZINCO SUL SUBSTRATO DI ACCIAIO

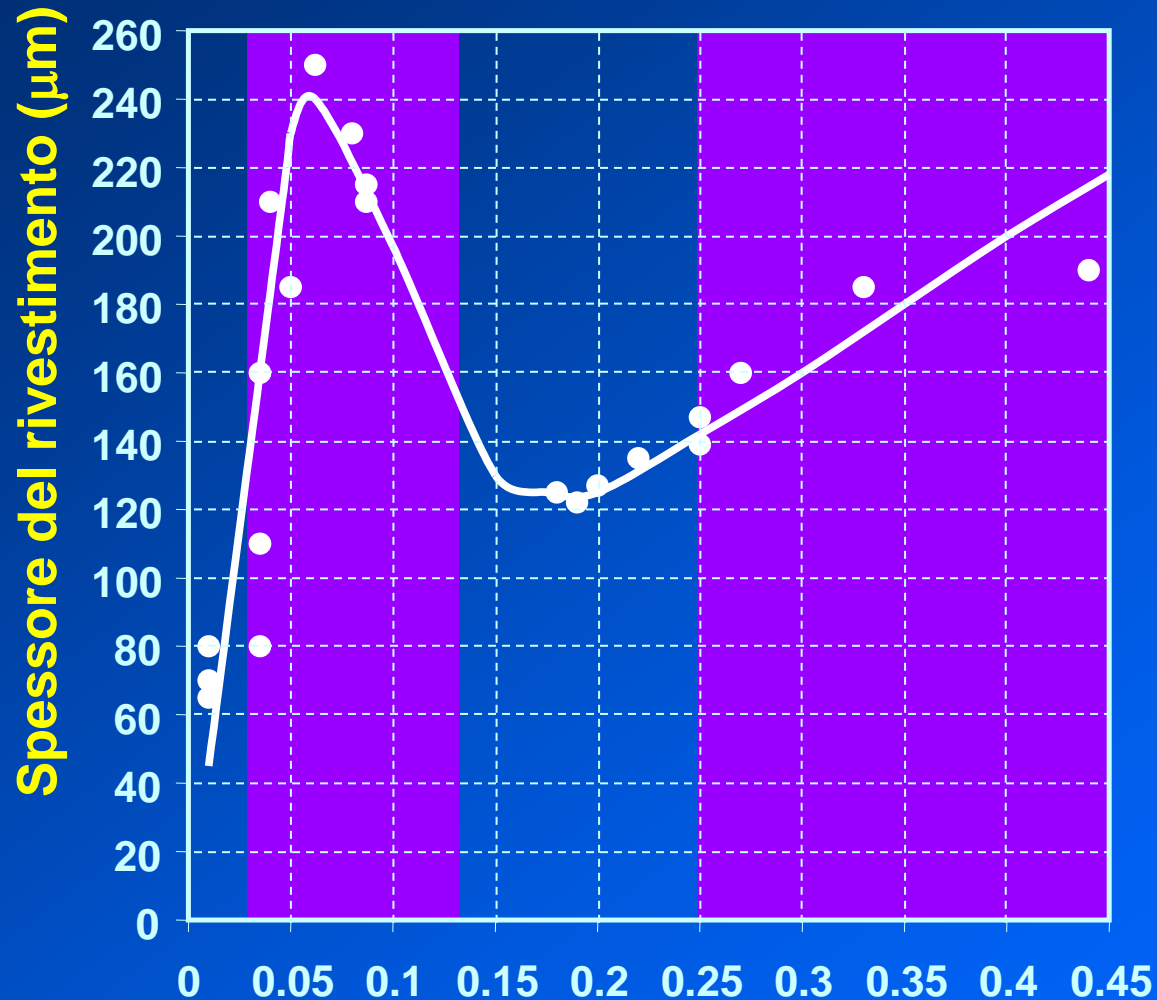
reazione catodica



reazione anodica



# INFLUENZA DELLA PERCENTUALE DI Si SULLO SPESSORE DEL RIVESTIMENTO



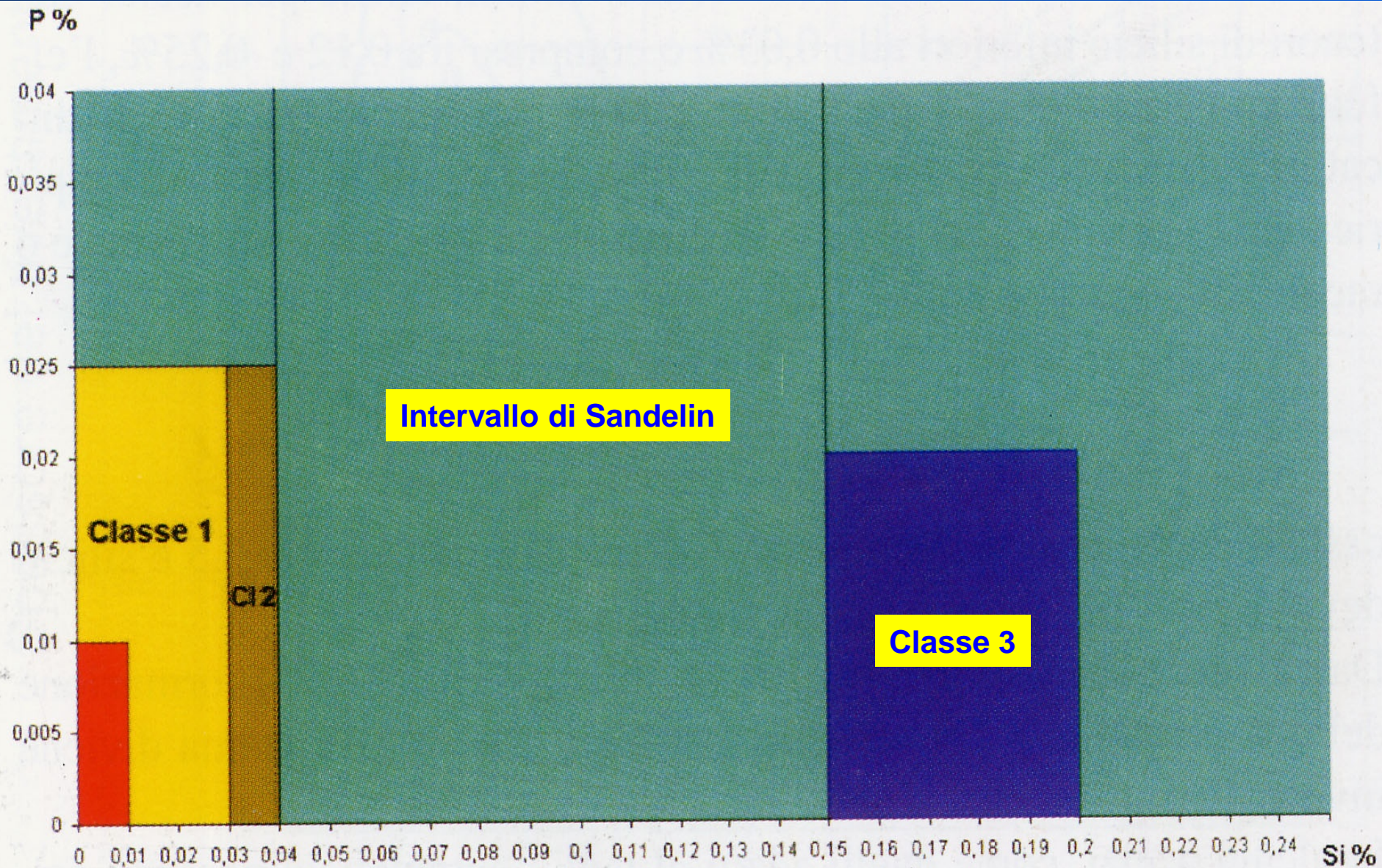
**CURVA DI  
SANDELIN**

• T=450°C

**Contenuto di Si nell'acciaio (% peso)**

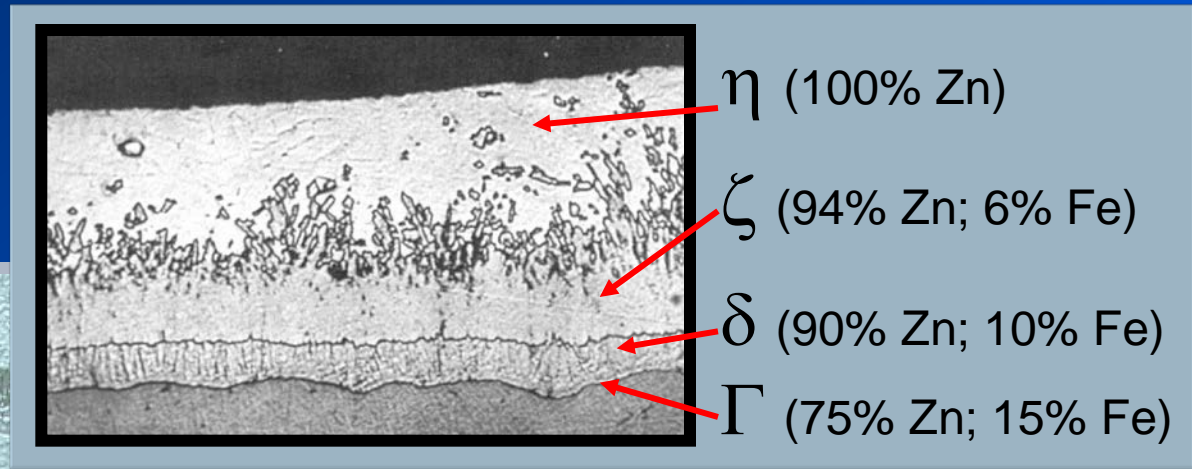


# RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DELLE CLASSI DEGLI ACCIAI IN FUNZIONE DEL CONTENUTO DI Si e P





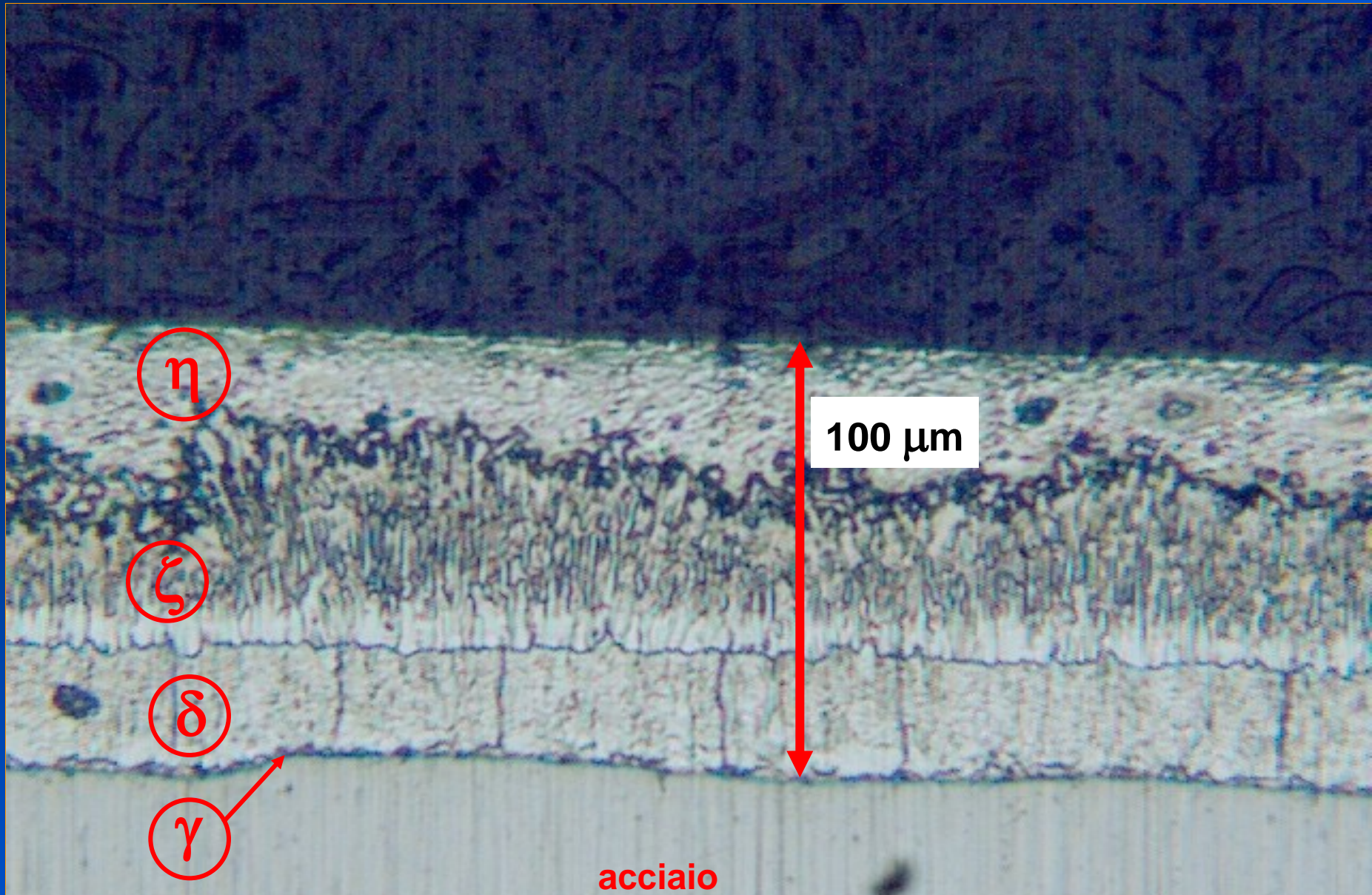
# CARATTERISTICHE DEL RIVESTIMENTO



**Si < 0.03% e P < 0.02%**

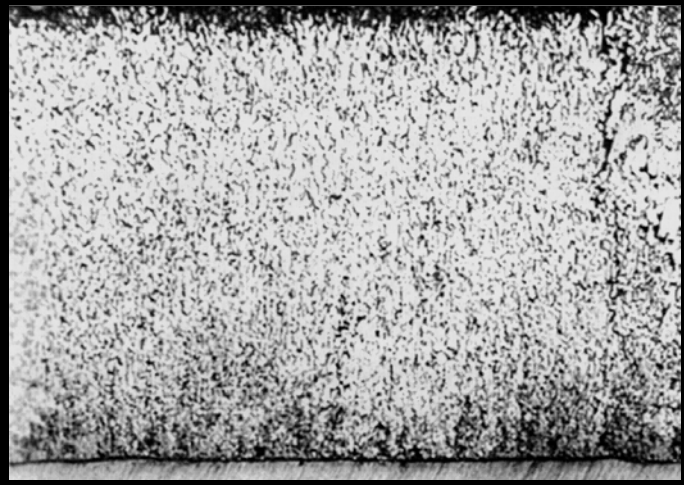


# MICROSTRUTTURA TIPICA DELLO STRATO DI ZINCATURA A CALDO SU ACCIAIO IPO-SANDELIN

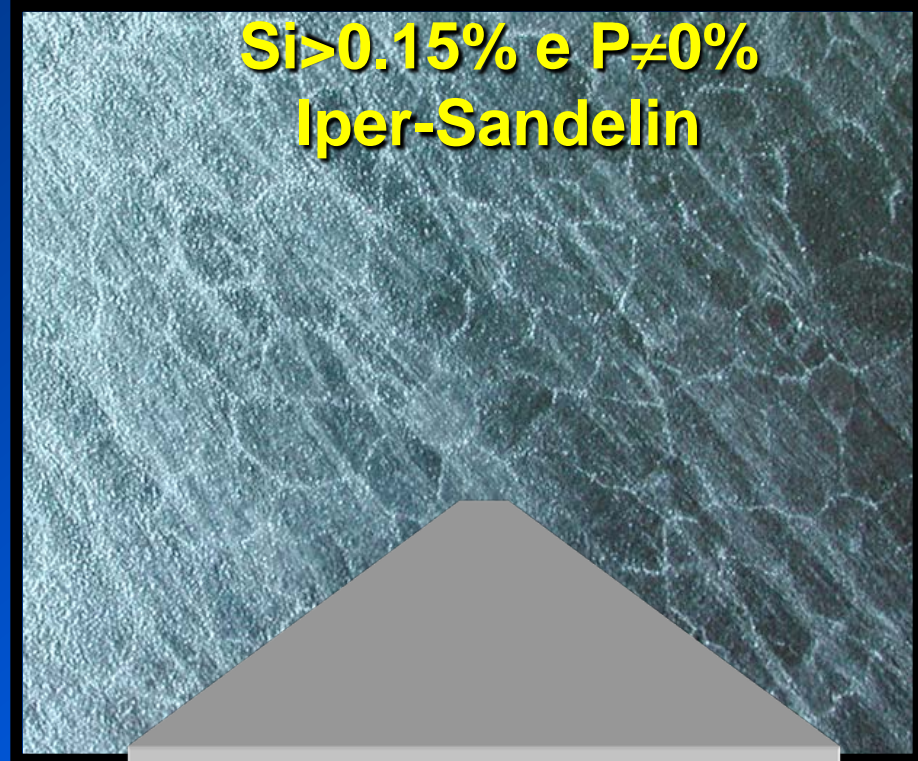




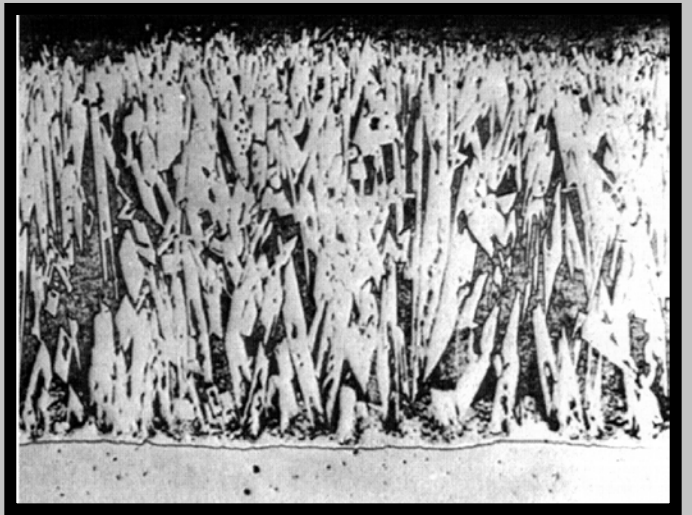
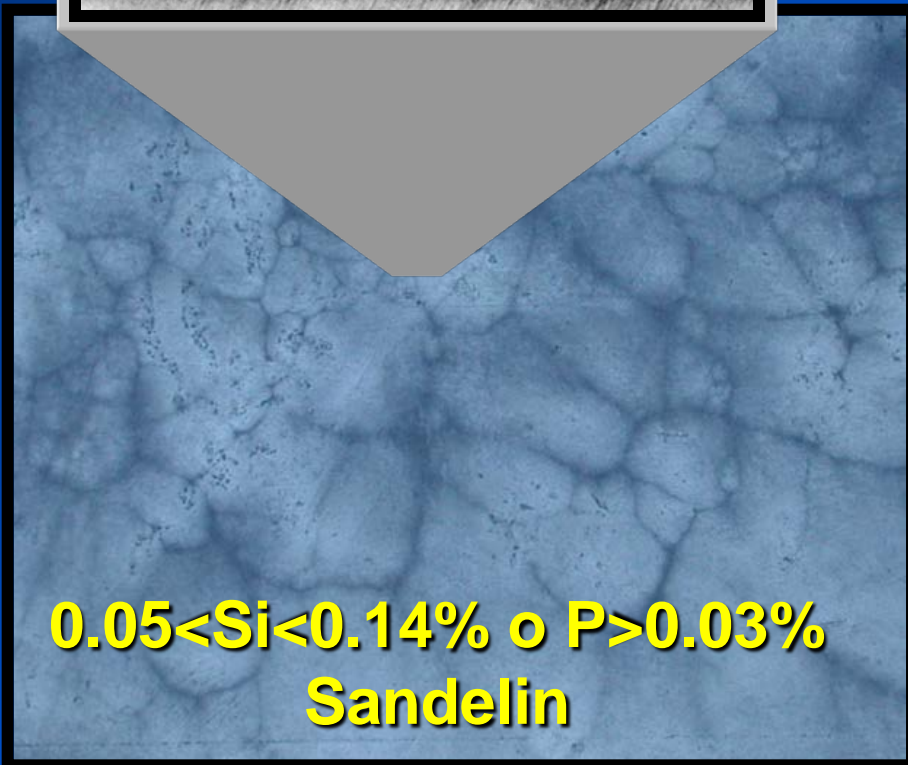
# CARATTERISTICHE DEL RIVESTIMENTO



**Si > 0.15% e P ≠ 0%**  
**Iper-Sandelin**

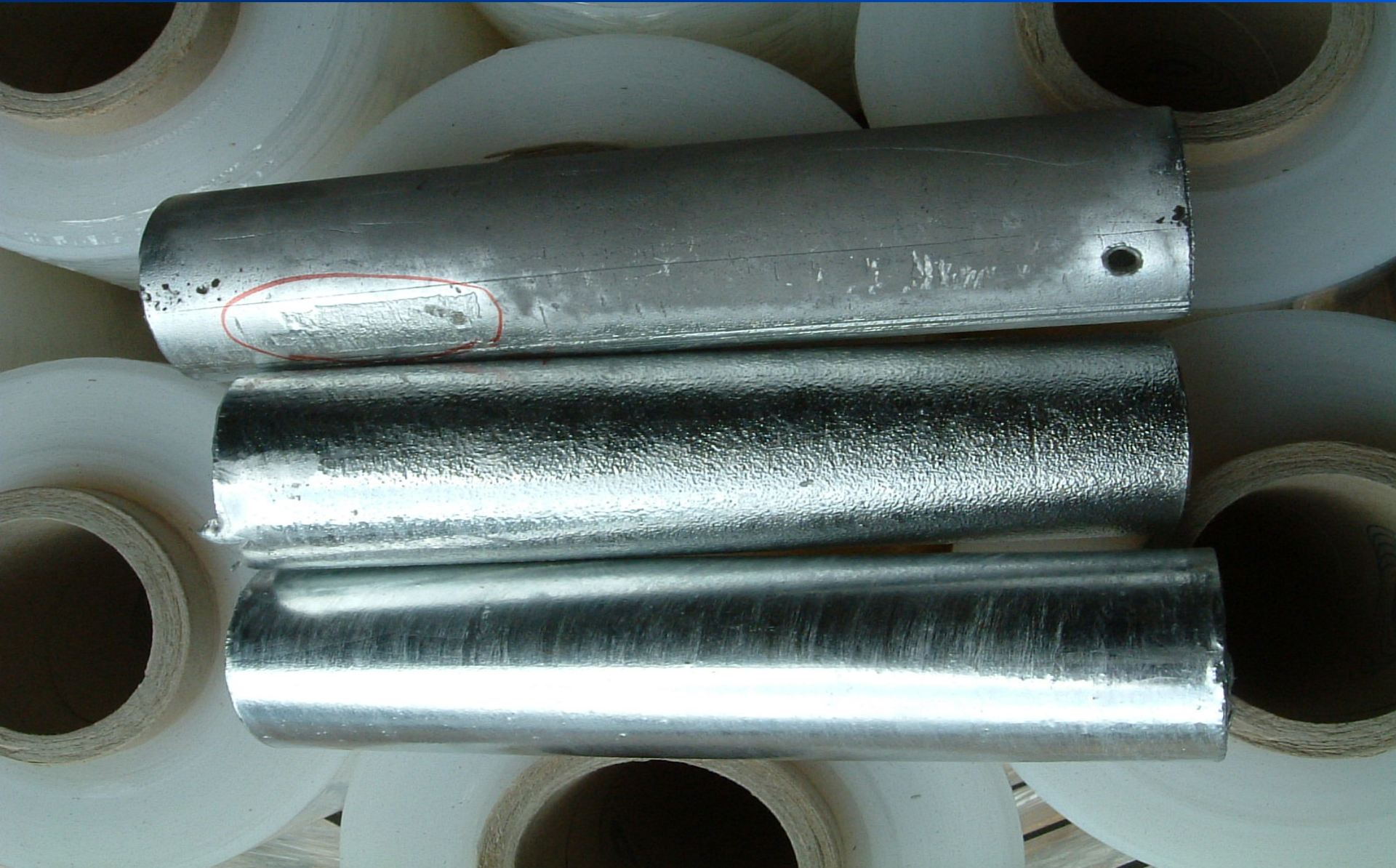


**0.05 < Si < 0.14% o P > 0.03%**  
**Sandelin**



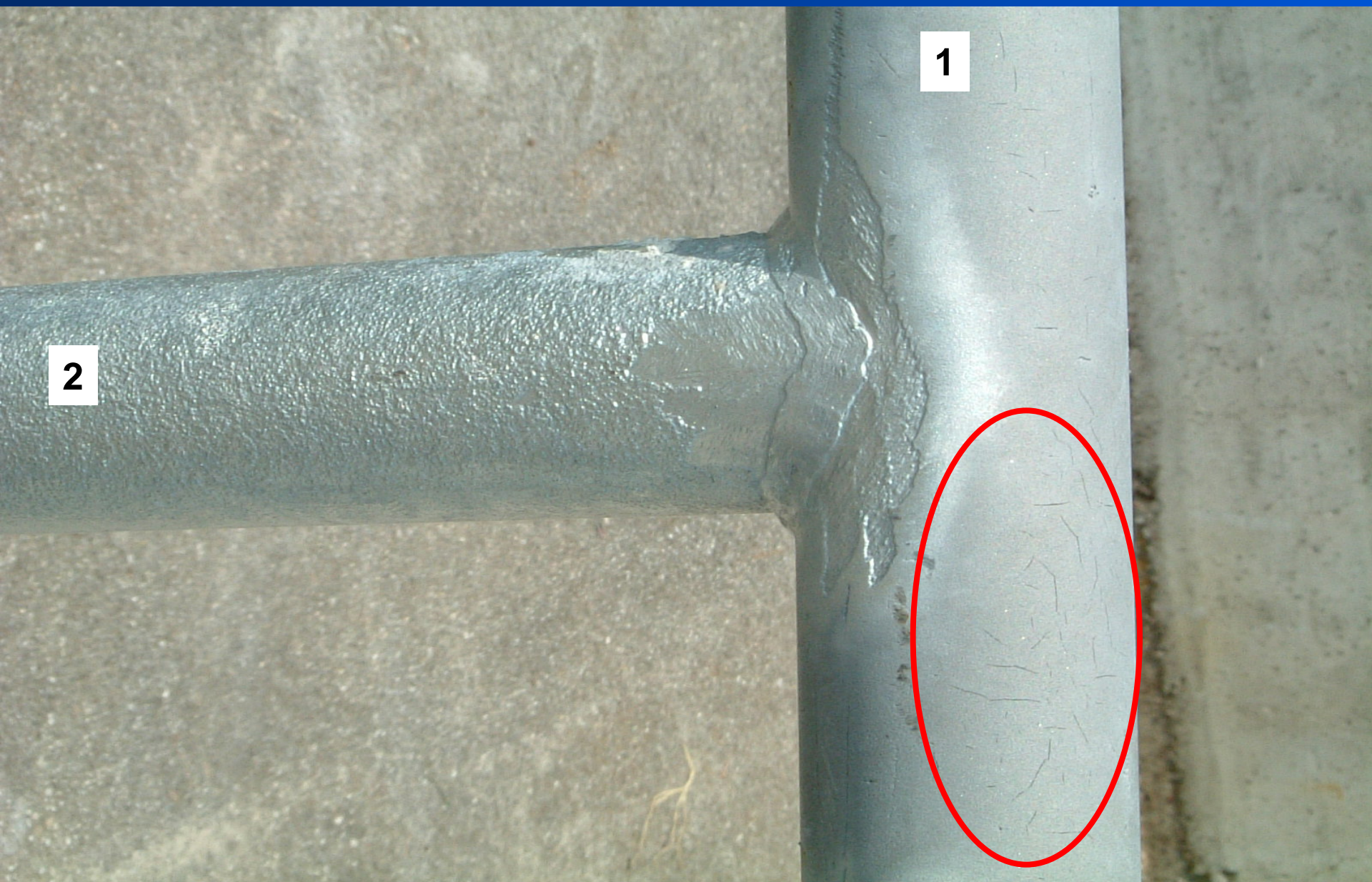


# CONFRONTO DELLA MORFOLOGIA SUPERFICIALE TRA TRE TUBI ZINCATI USATI IN UNO STESSO MANUFATTO





# CARATTERISTICHE DEL RIVESTIMENTO SU MANUFATTI DI ACCIAI REATTIVI



1

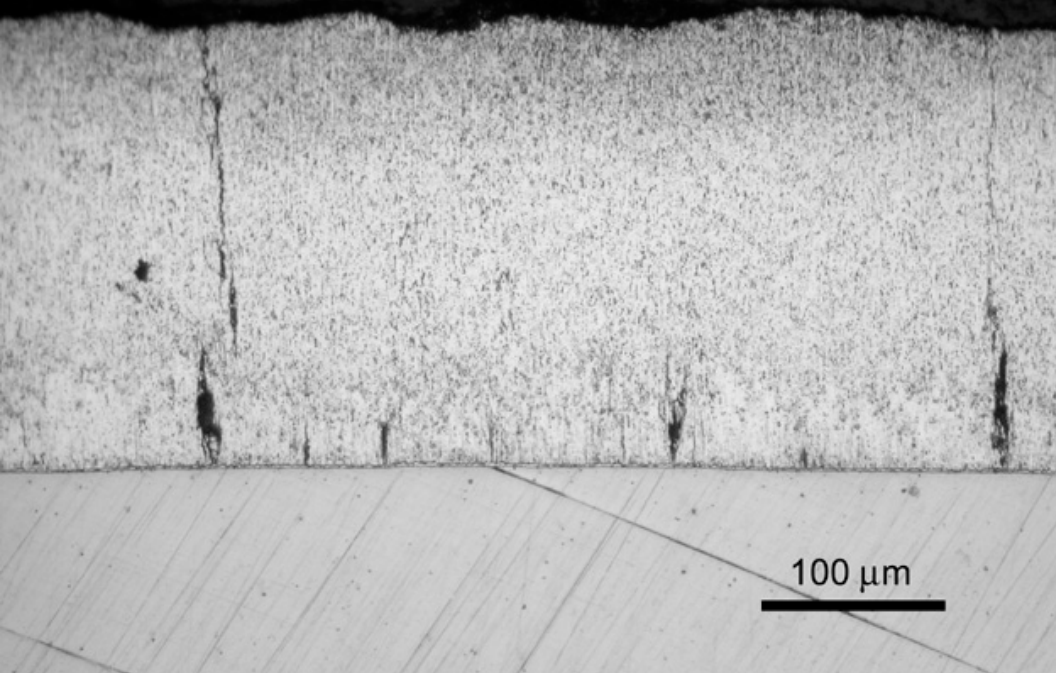
2



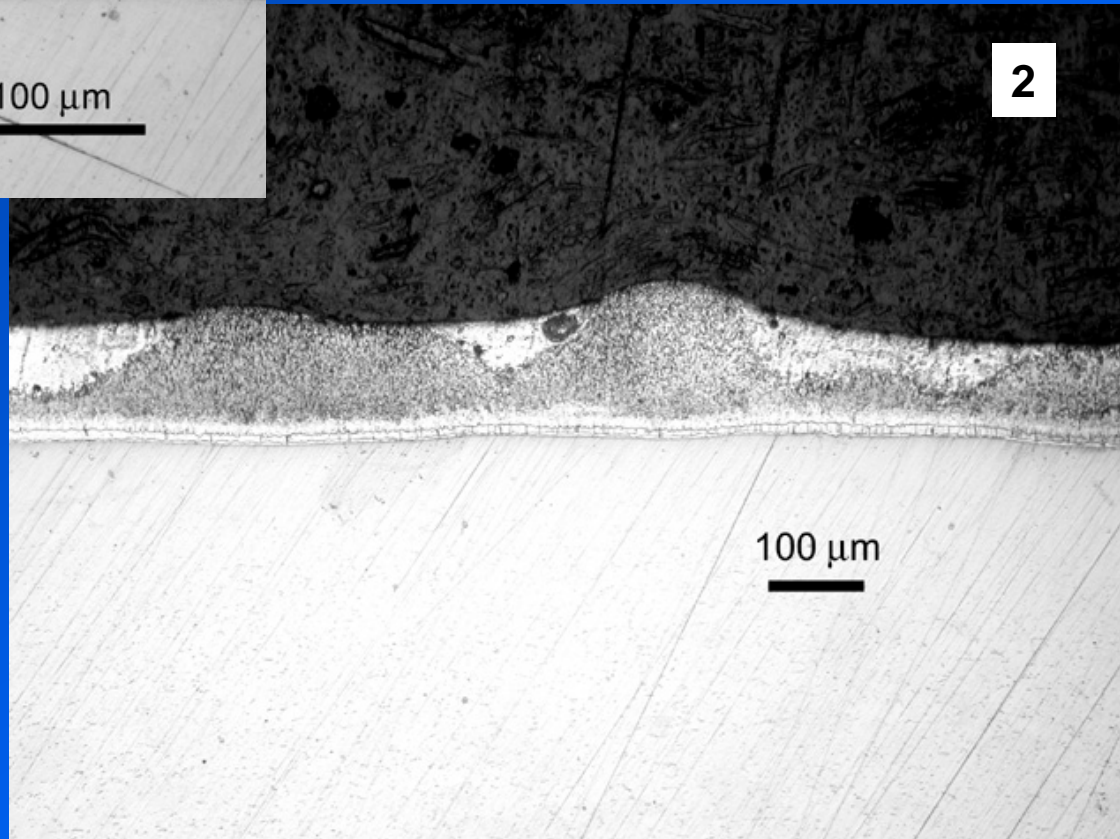
# MORFOLOGIA SUPERFICIALE DI UN TUBO DI ACCIAIO IPOSANDELIN





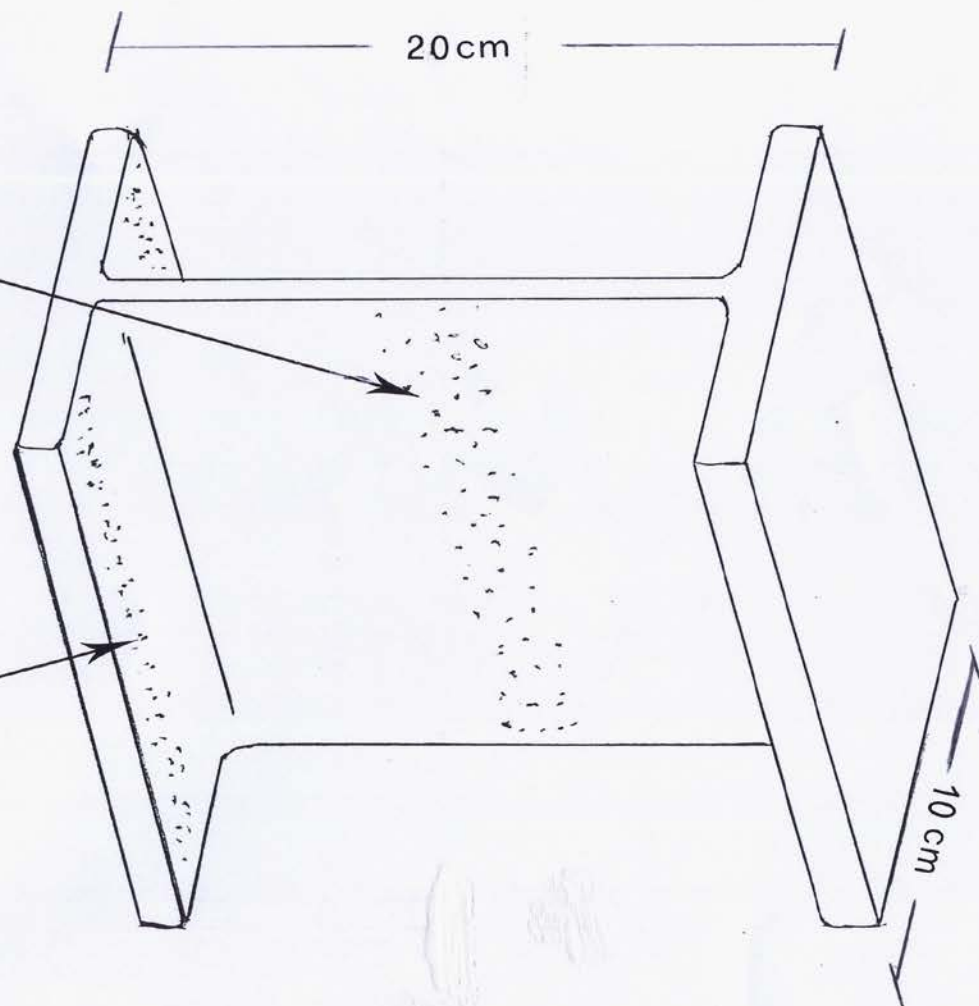
**1**

1- Microstruttura del rivestimento di zinco, che risulta avere uno spessore di circa 300  $\mu\text{m}$ . In evidenza la presenza di criccate che sono responsabili della fragilità e facile distacco del rivestimento. Ciò è da imputare alla presenza di un tenore di silicio nell'acciaio di 0.072%

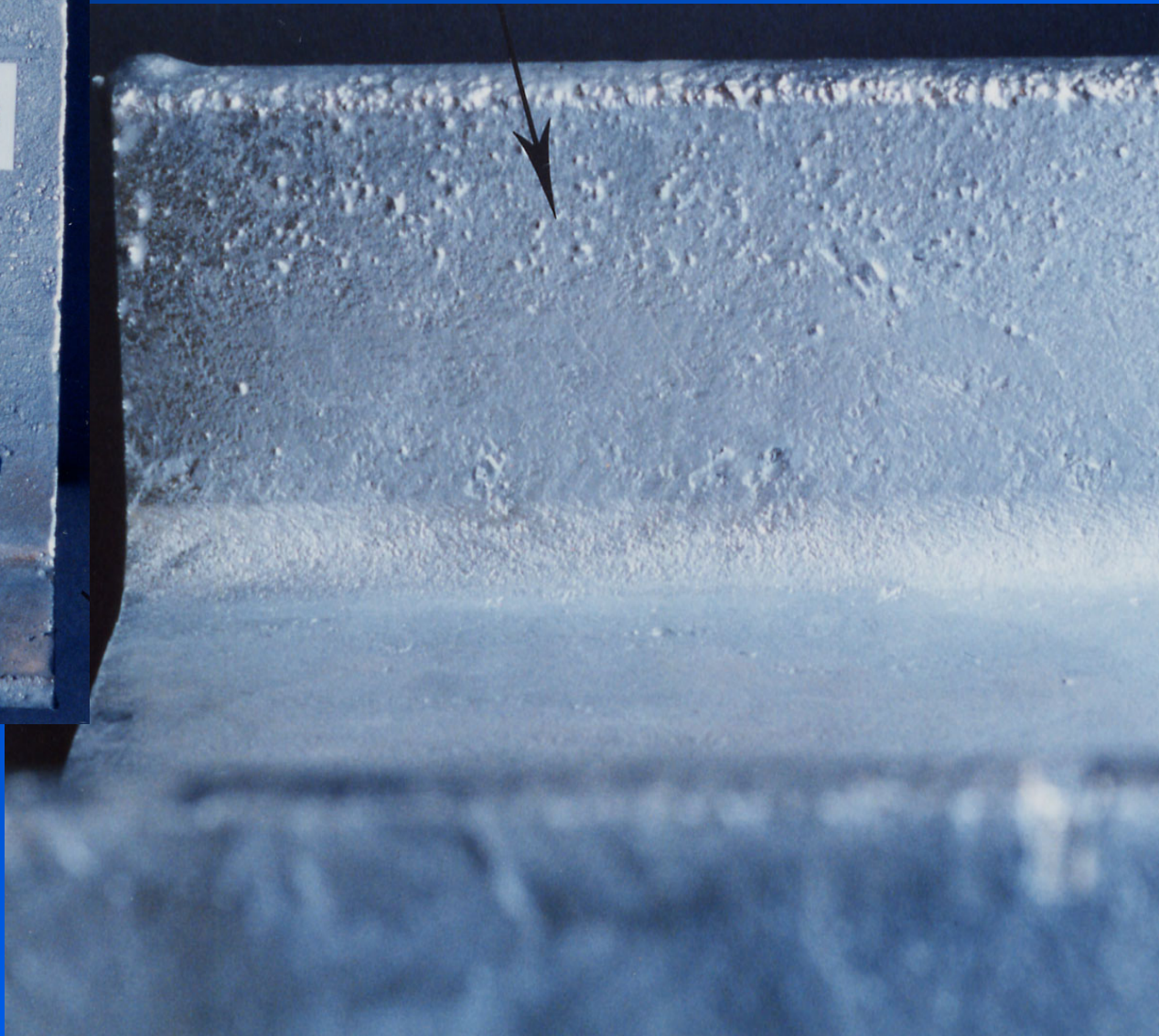
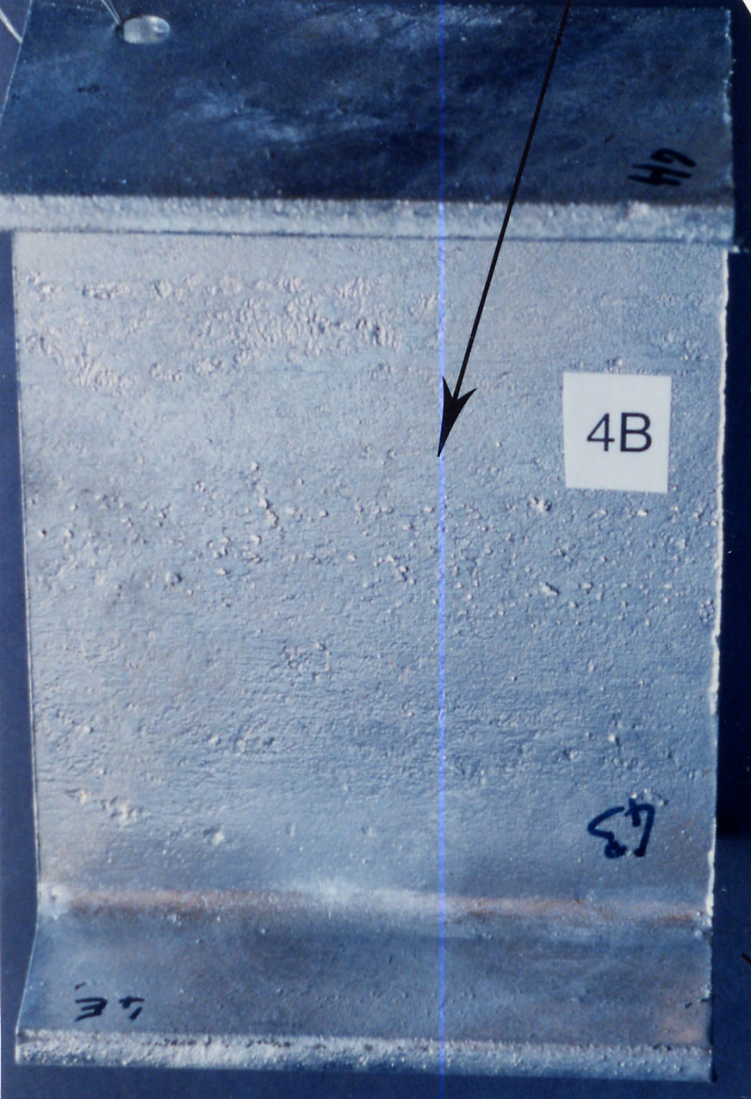
**2**

2- Microstruttura del rivestimento di zinco, che risulta avere uno spessore variabile mediamente intorno a 140  $\mu\text{m}$ . In evidenza le esplosioni localizzate di fase  $\zeta$  che sono responsabili dell'aspetto puntinato e rugoso, del rivestimento. Ciò è da imputare alla presenza di un tenore di fosforo nell'acciaio di 0.022%

# TRAVE IPE 100 X 200 CON RUGOSITA' SUPERFICIALE LOCALIZZATA







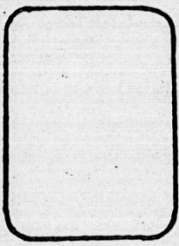
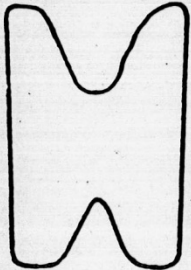
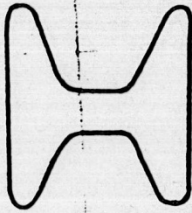
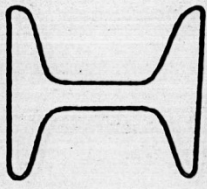
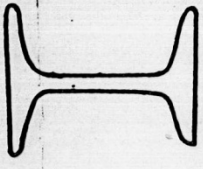
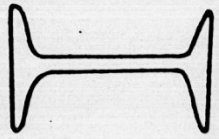

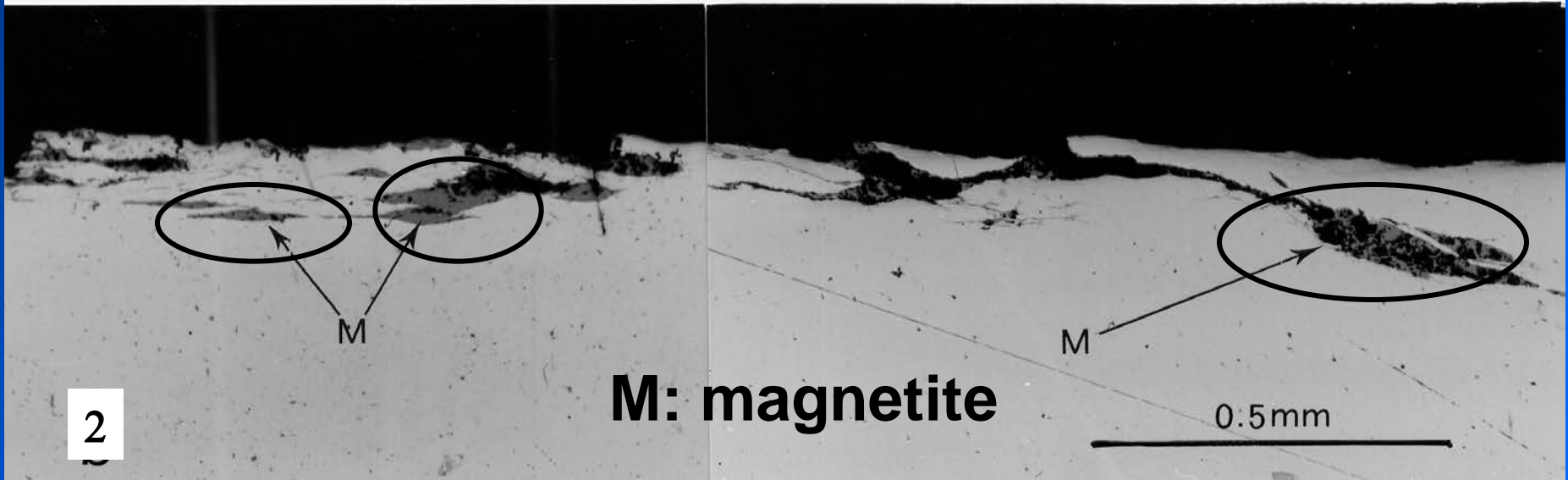
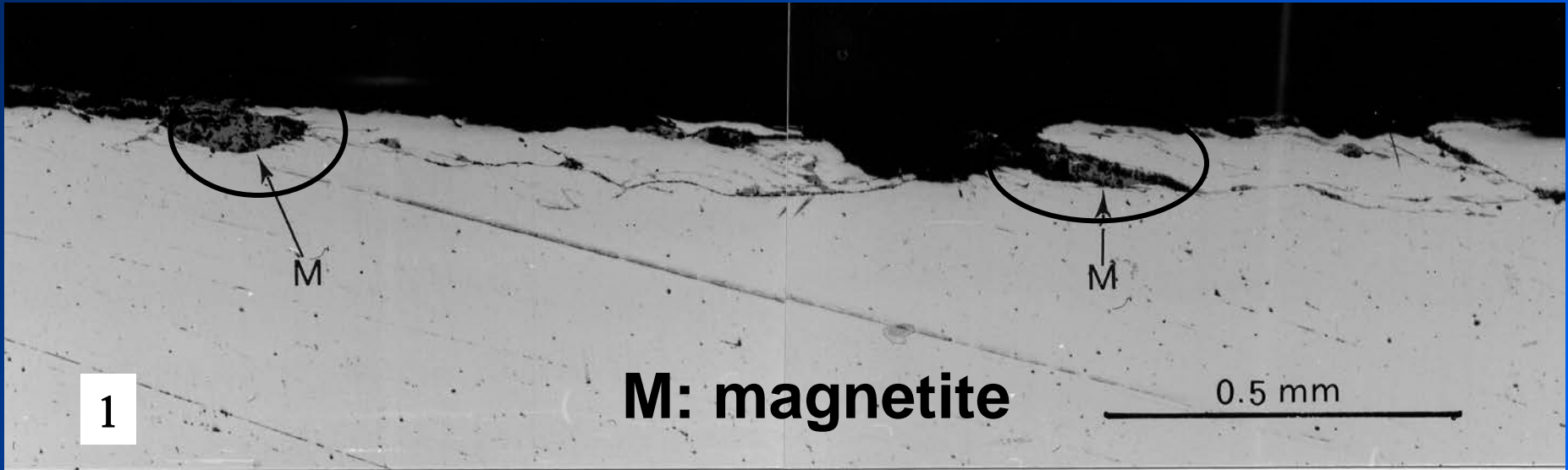
profilato	billetta	1° passaggio	2° passaggio	3° passaggio	4° passaggio	5° passaggio	finito
I NP 300							

Fig. 4.16 Calibrazione di un profilato.

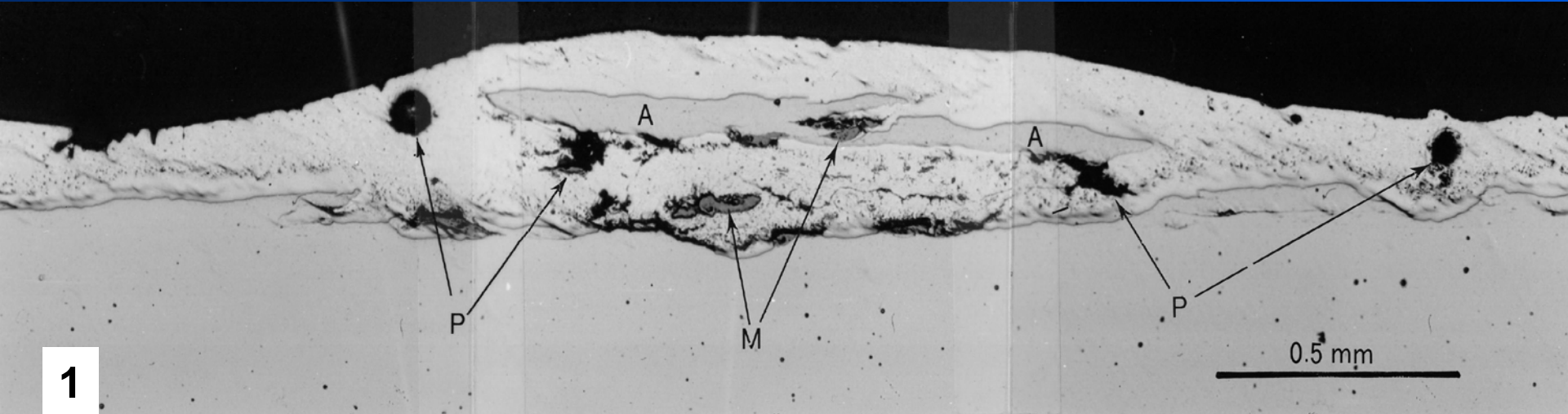


# SEZIONI DELLA TRAVE IN CORRISPONDENZA DELLA SUPERFICIE SCABROSA





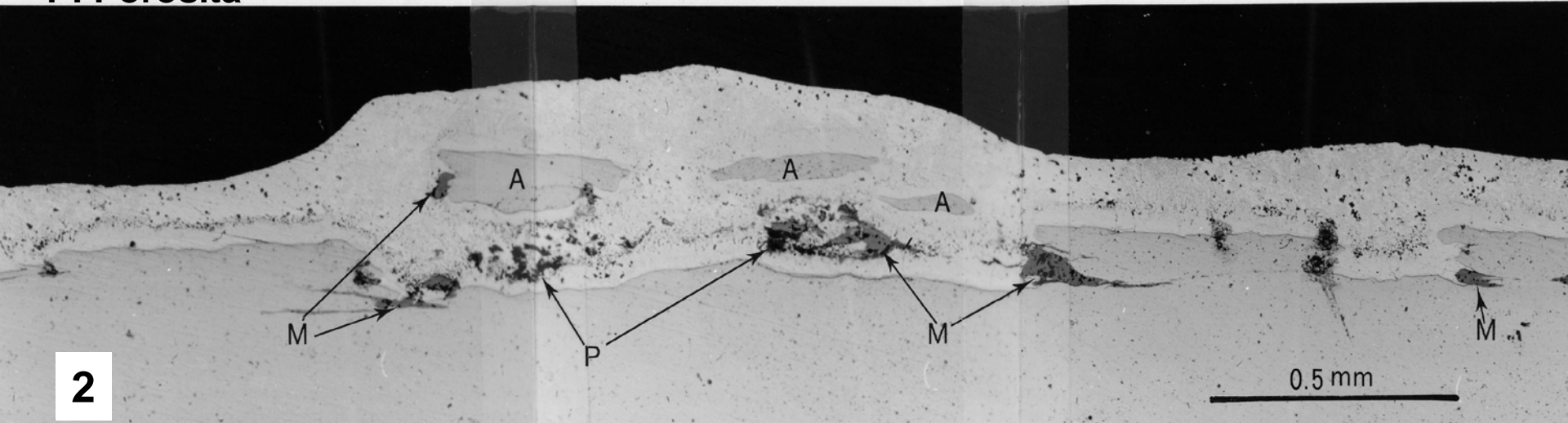
# SEZIONI DELLA TRAVE IN CORRISPONDENZA DELLA SUPERFICIE SCABROSA



1

M: Magnetite  
A: Acciaio  
P: Porosità

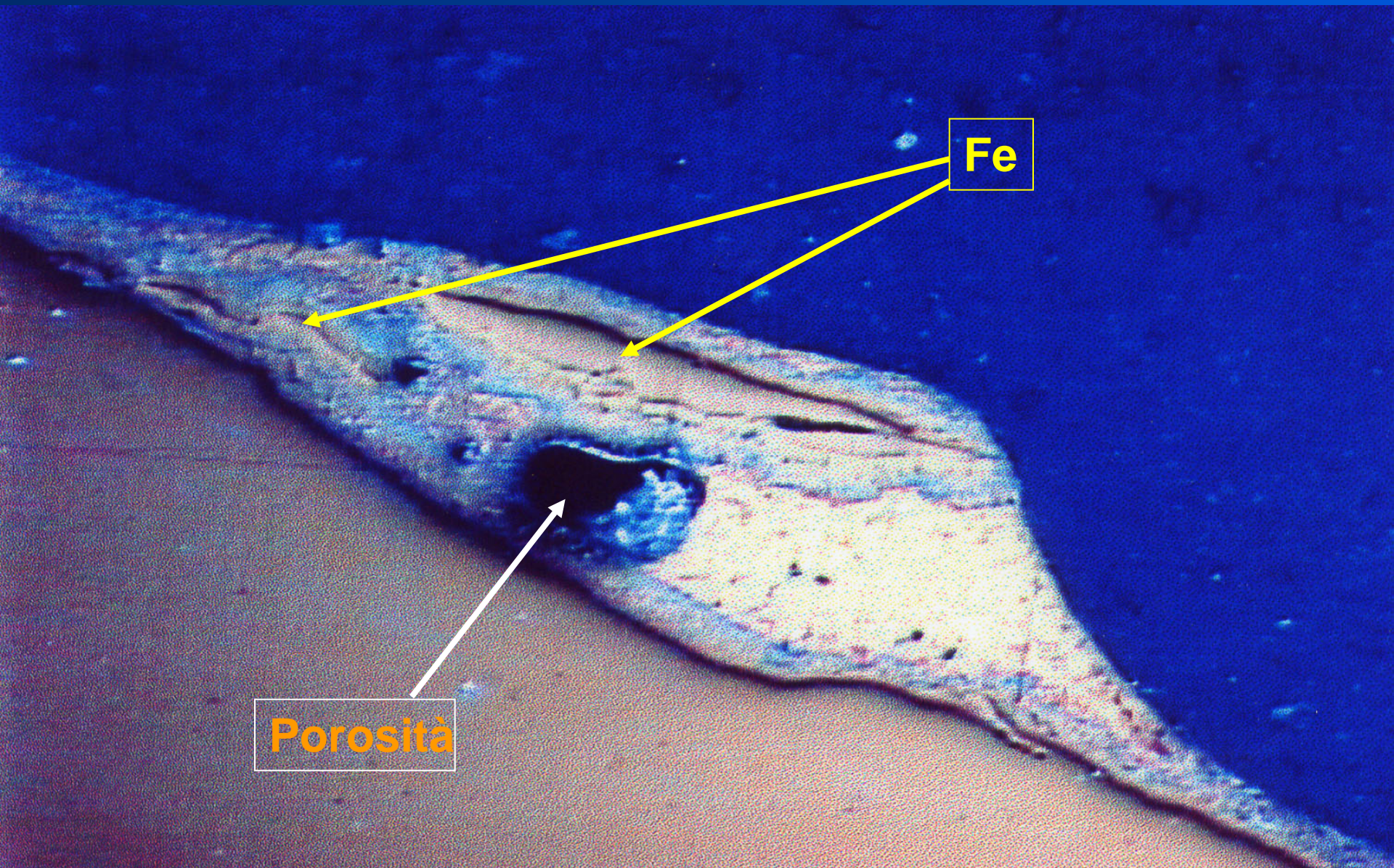
Analisi chimica elementare all'interno delle porosità:  
Si=1,5% - Fe=6,5% - Ca=0,7% - Cl=3,3% - Zn=88%



2



# PARTICOLARE INGRANDITO DI UNA SCABROSITA'



Fe

Porosità



# Lamiere Sendzimir

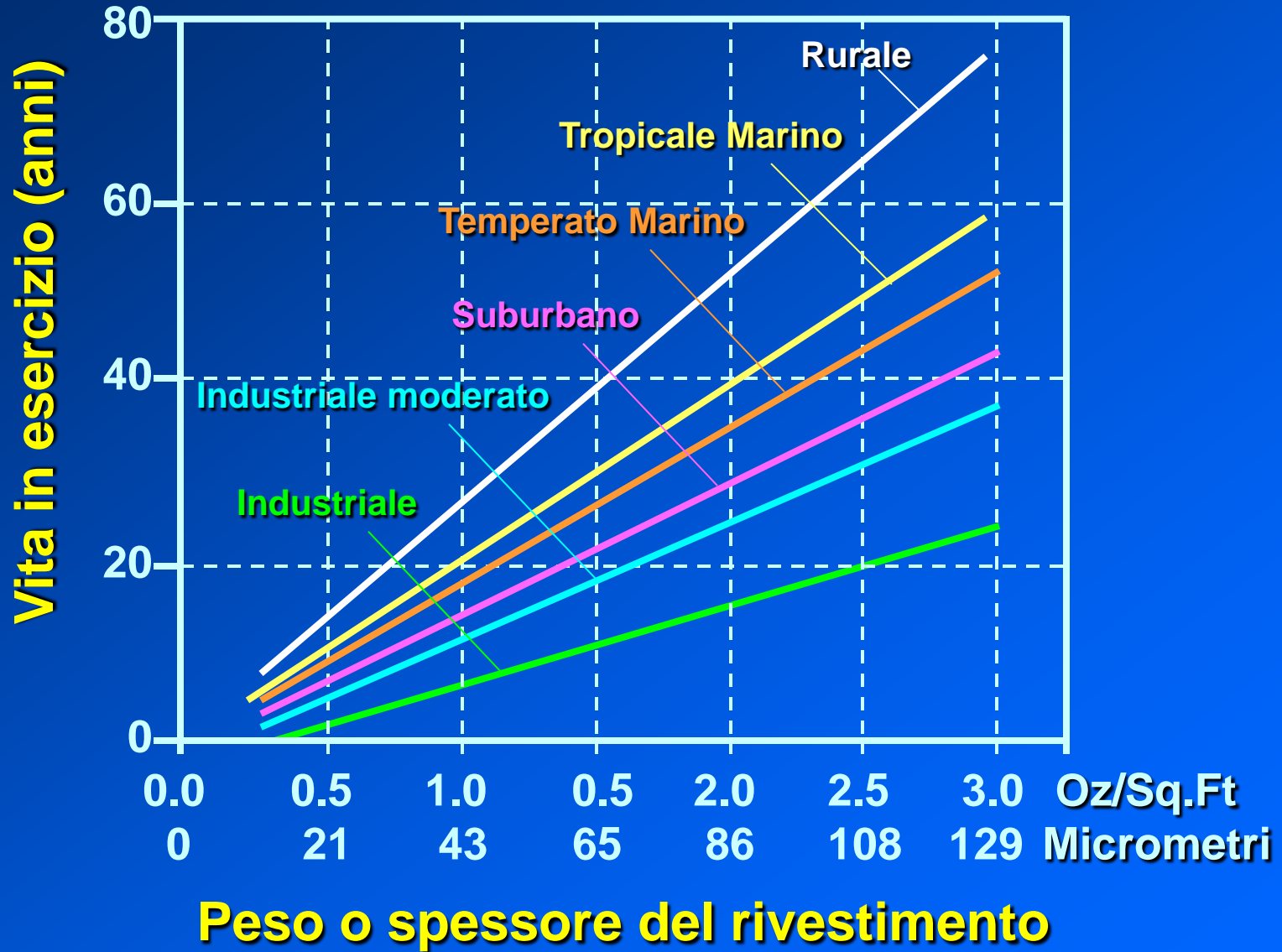
Rivestimento	Massa del rivestimento su entrambe le facce (gr/m <sup>2</sup> )		Spessore $\mu\text{m}$
	<i>Prova su 3 punti</i>	<i>Prova su un punto</i>	media
<b>Z 200</b>	200	185	15
<b>Z 275</b>	275	235	20
<b>Z 350</b>	350	300	25
<b>Z 600</b>	600	510	40

# MECCANISMO DI REAZIONE DELLO ZINCO IN DIFFERENTI ATMOSFERE

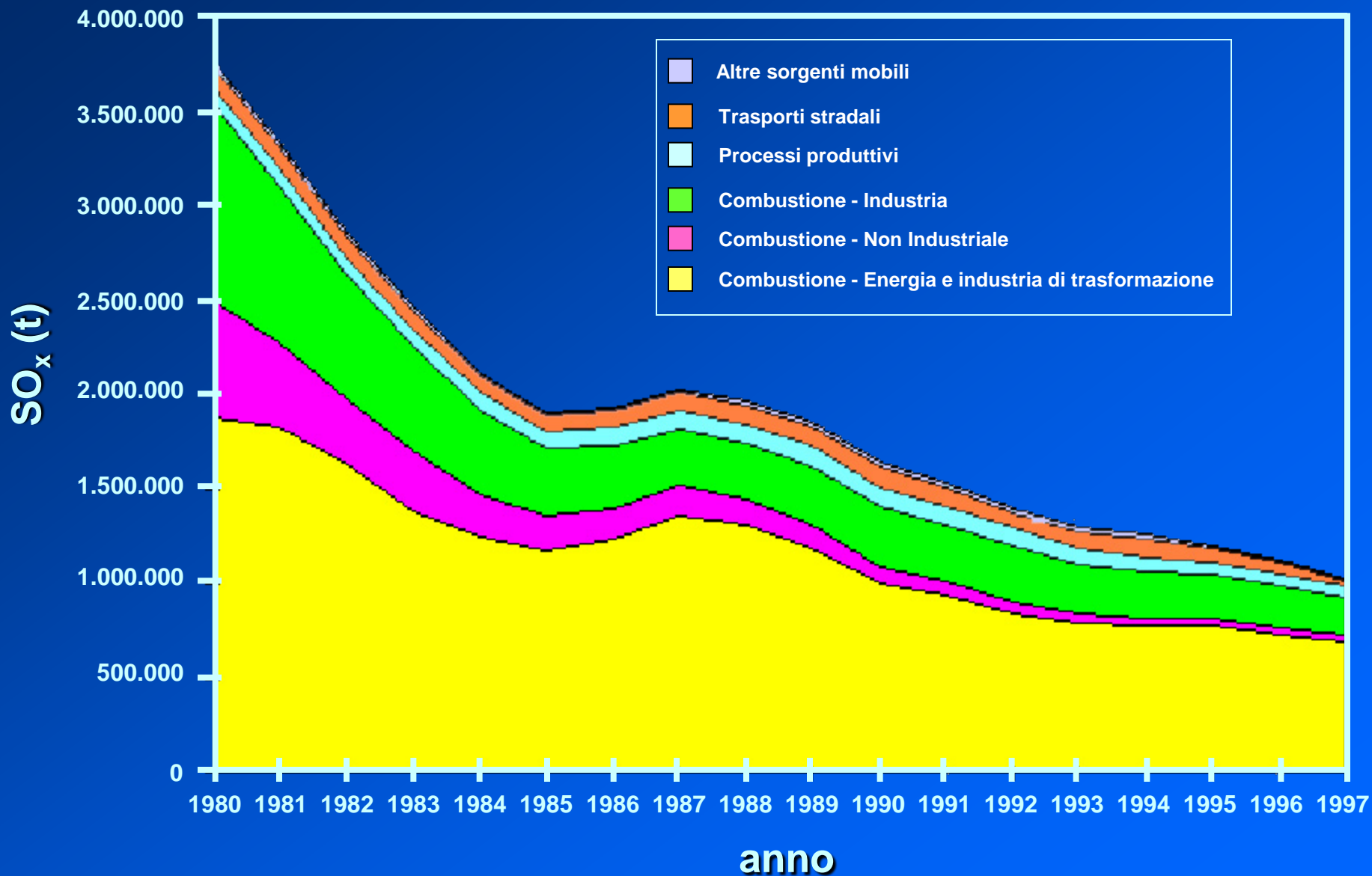
TIPO DI ATMOSFERA	AGENTI	PRODOTTI DI CORROSIONE		VELOCITÀ DI CORROSIONE
		COMPOSIZIONE	SOLUBILITÀ IN ACQUA	
Rurale	$O_2 + H_2O + CO_2$	$ZnO \rightarrow Zn(OH)_2 \rightarrow$ $\rightarrow 2ZnCO_3 \cdot 3Zn(OH)_2$	Molto bassa	Molto bassa
Marina	$O_2 + H_2O + CO_2 + Cl^-$	$ZnO \rightarrow Zn(OH)_2 \rightarrow$ $\rightarrow 2ZnCO_3 \cdot 3Zn(OH)_2 \rightarrow$ $\rightarrow ZnCl_2 \cdot 4Zn(OH)_2$ e/o $ZnCl_2 \cdot 6Zn(OH)_2 +$ $+ Zn_3OCl_4$ e/o $Zn_3OCl_6$	Moderata	Bassa
Urbana e Industriale	$O_2 + H_2O + CO_2 + SO_2$	$ZnO \rightarrow Zn(OH)_2 \rightarrow$ $\rightarrow 2ZnCO_3 \cdot 3Zn(OH)_2 \rightarrow$ $\rightarrow ZnS + ZnSO_3 + ZnSO_4$	Buona	Alta



# STIMA GRAFICA DELLA VITA IN ESERCIZIO DEI MANUFATTI ZINCATI A CALDO



# EMISSIONI NAZIONALI DI OSSIDI DI ZOLFO

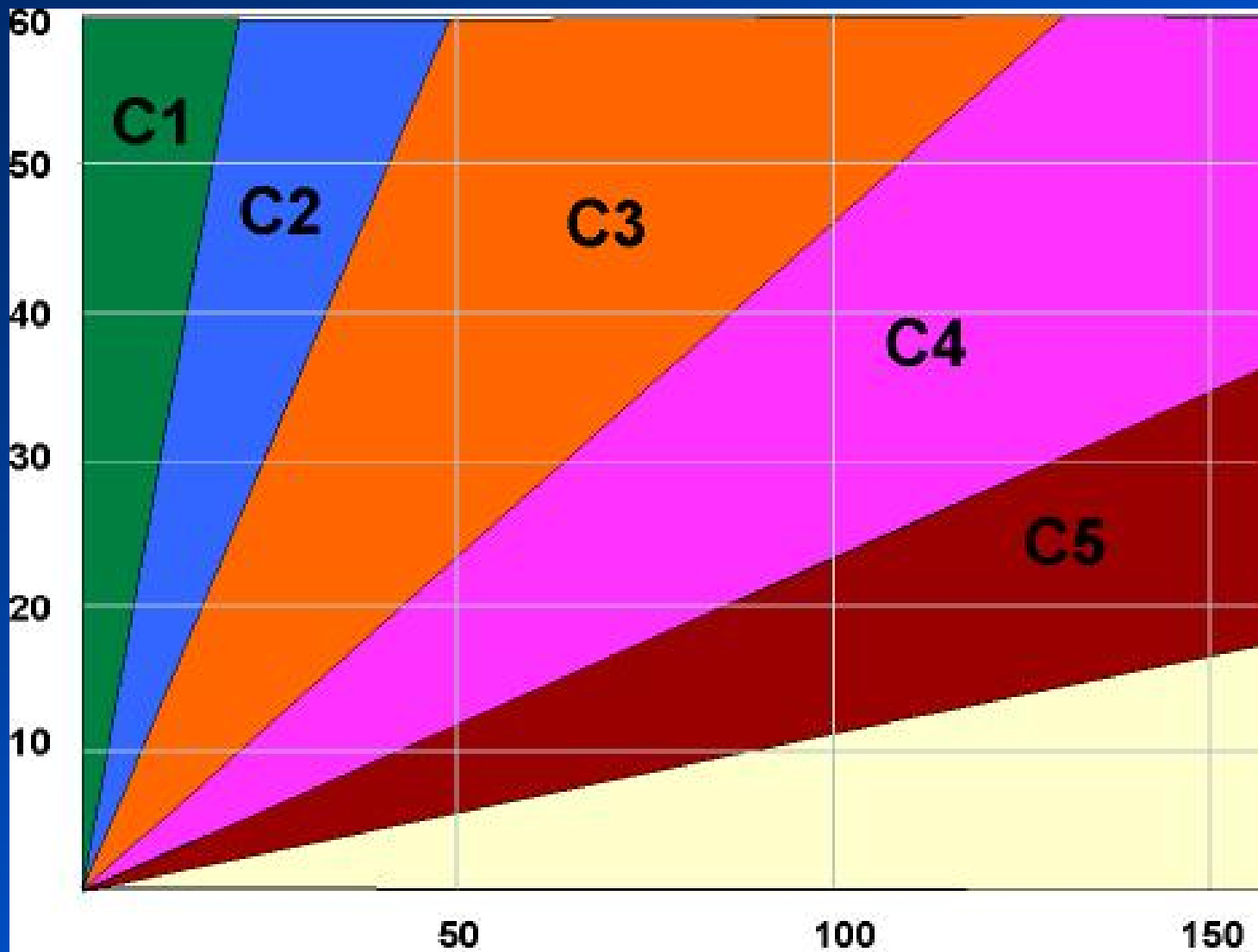




# CATEGORIE AMBIENTALI E RELATIVI RISCHI DI CORROSIONE (ISO 9223)

CATEGORIE AMBIENTALI	RISCHIO DI CORROSIONE	TIPOLOGIA AMBIENTALE	TASSO DI CORROSIONE DELLO Zn
C <sub>1</sub>	Molto basso	Interno: asciutto	0 – 0.7 g/m <sup>2</sup> anno 0 – 0.1 μm/anno
C <sub>2</sub>	Basso	Interno: condensa occasionale Esterno: ambiente rurale	0.7 – 5 g/m <sup>2</sup> anno 0.1 – 0.7 μm/anno
C <sub>3</sub>	<b>MEDIO</b>	<u>INTERNO</u> : alta umidità <u>ESTERNO</u> : ambiente urbano o costiero temperato	5 – 15 g/m <sup>2</sup> anno 0.7 – 2.1 μm/anno
C <sub>4</sub>	Alto	Interno: piscine, impianti chimici Esterno: ambiente industriale o urbano costiero	15 – 30 g/m <sup>2</sup> anno 2.1 – 4.2 μm/anno
C <sub>5</sub>	Molto alto	Esterno: ambiente industriale con alta umidità o alta salinità costiera	30 – 60 g/m <sup>2</sup> anno 4.2 – 8.4 μm/anno

**Durata (anni)**



**Spessore ( $\mu\text{m}$ )**



**PILONE  
TRALICCIATO  
ENEL IN CAMPO  
DA 33 ANNI**



# SPESSORI MEDI DEL RIVESTIMENTO DI ZINCO SU TRALICCI ENEL IN OPERA DA CIRCA 30 ANNI IN DUE DIVERSI AMBIENTI

<b>UBICAZIONE DEI TRALICCI</b>	<b>PROFILATO L 60×60×5 mm</b>	<b>PROFILATO L 90×90×8 mm</b>	<b><math>\Delta s</math> PRESUNTO (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b><math>\Delta s/\text{anno}</math> PRESUNTO (<math>\mu\text{m}/\text{anno}</math>)</b>
<b>zona rurale</b>	<b>80-90</b>	<b>160-170</b>	<b>20-25</b>	<b>0.6-0.8</b>
<b>zona marina</b>	<b>65-70</b>	<b>140-150</b>	<b>35-45</b>	<b>1.2-1.5</b>

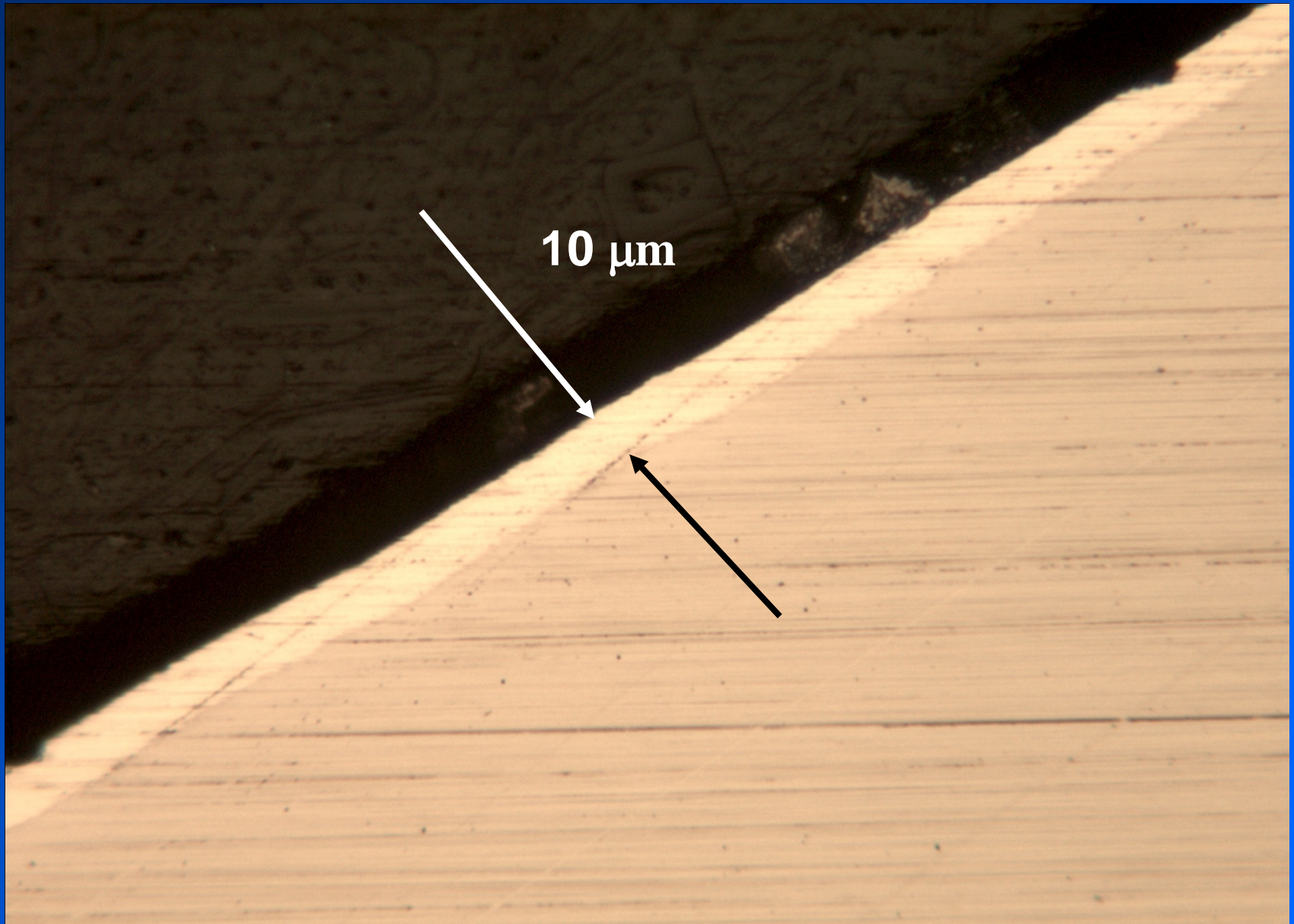


# VITI E BULLONI ZNCATI ELETTROLITICAMENTE

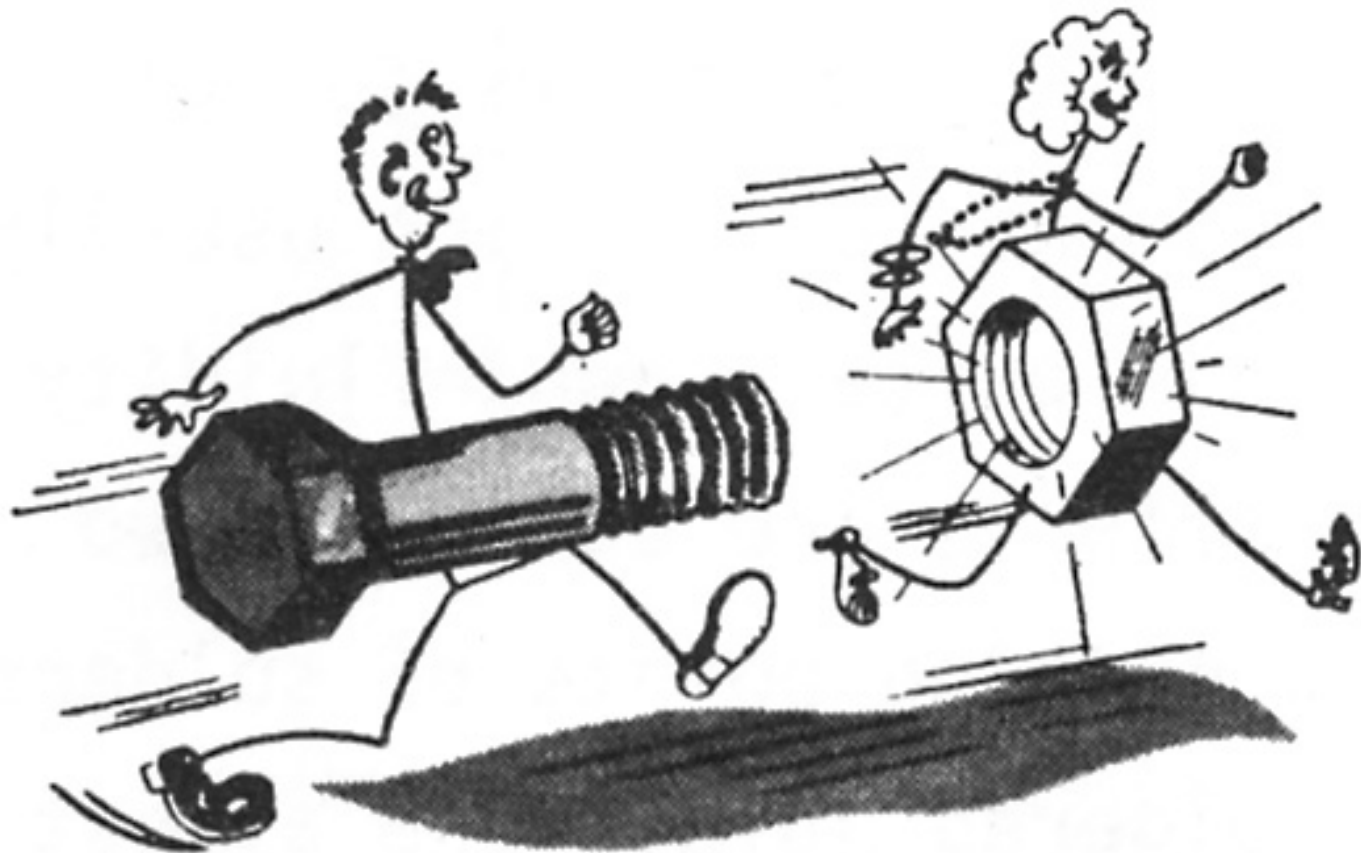




# SEZIONE DI UNA TESTA DI BULLONE ZINCATO PER VIA ELETTROLITICA







**NO! NO! NOT WITHOUT...  
GALVANIZING**

# DURABILITA' DEL SISTEMA DUPLEX

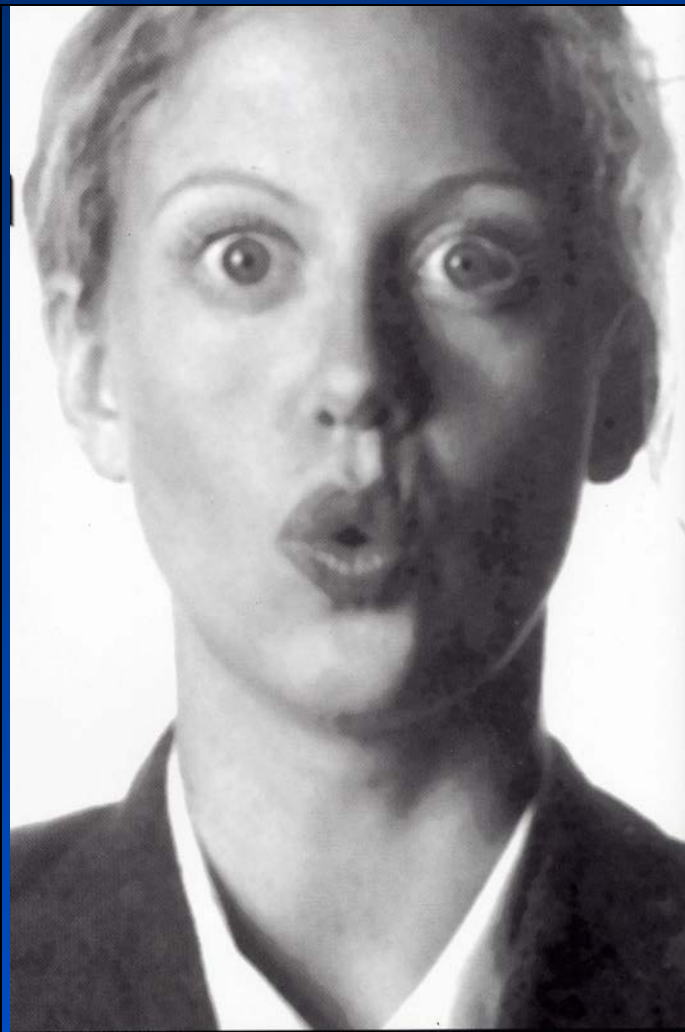
$$D_{\text{duplex}} = 1,5 \cdot 2,3 (D_{\text{zinco}} + D_{\text{vernice}})$$

**Fattore sinergico  
ambienti particolarmente  
aggressivi**

**Fattore sinergico  
ambienti poco  
aggressivi**



**PREVENIRE È MEGLIO CHE CURARE!!**



**prevenire**



**curare**