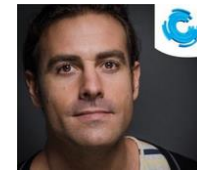
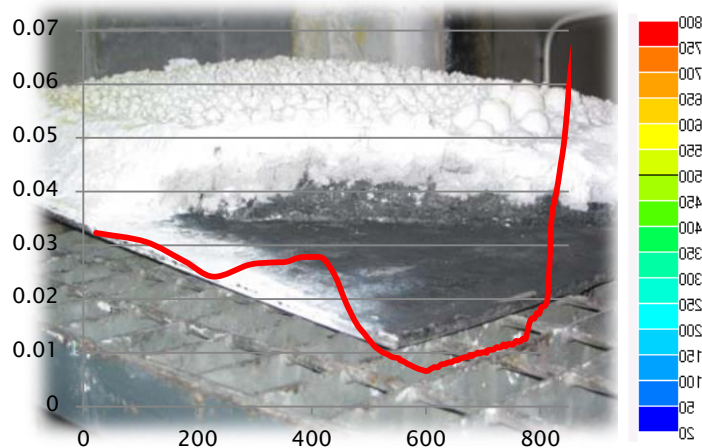


# Càlcul i optimització de protecció passiva en estructures metàl·liques amb pintures intumescent



**Albert Jiménez Morales**  
**Ingeniero Industrial UPC**  
**Departamento de I+D de Construsoft S.L.**

*Albert.jimenez@construsoft.com*

*Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona*



**Autor:** Albert Jiménez Morales

**Tutor:** Dr. Frederic Marimón Carvajal


# Objectius, Abast del Projecte i resultats







## Objectius i Resultats del Projecte

### Objectius del Projecte

- Estudi de l'estat d'art actual de les pintures intumescent (normatives, fabricants, com s'utilitzen etc...)
- **Desenvolupament d'un innovador mètode per a la valoració de l'aïllament eficaç de les pintures intumescent no utilitzat fins al moment.**
- Aplicació del nou mètode a una pintura intumescent del mercat Euroquímica Paints:  **Euroquímica**
- Estudi de les avantatges del mètode en exemples de reals

### Resultats del Projecte

- S'ha aconseguit la 1<sup>a</sup> Acreditació emesa a l'estat espanyol per el laboratori oficial de resistència al foc AFITI del mètode de valoració proposat al PFC per a la pintura d'Euroquímica  **AFITI**  
Asociación para el Fomento de la Investigación y la Tecnología de la Seguridad contra Incendios
- Ha millorat la competitivitat del fabricant de pintura i ha ampliat el mercat d'aplicació
- Permet economitzar els costos la PPCI en estructures d'acer  **CONSTRUSOFT**
- Ha permès a la empresa de software Construsoft la realització d'un software útil perquè els enginyers i arquitectes puguin optimitzar l'aplicació de pintures

# Introducció a la PPCI i les Pintures Intumescent





## Sistemes de Protecció Contra Incendis

### Protecció Contra Incendis

#### Activa

*Tot allò que APAGA*

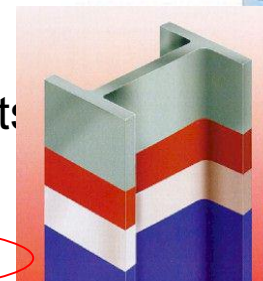
- Extintors
- Espumes
- Mantes
- Sprinklers
- BIE
- Instal·lacions Aigua



#### Passiva

*Tot allò que EVITA*

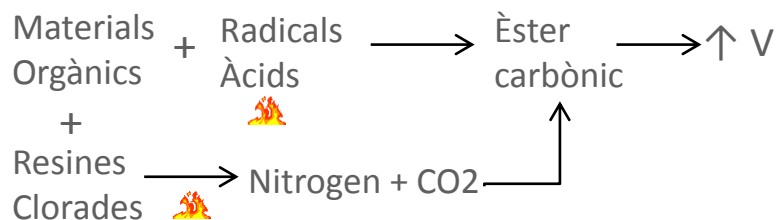
- Recobriments aïllants
- Protecció amb projectats
- Sistema hidràulics
- Pintures intumescent





## Les Pintures Intumescent

### 1. Reacció química

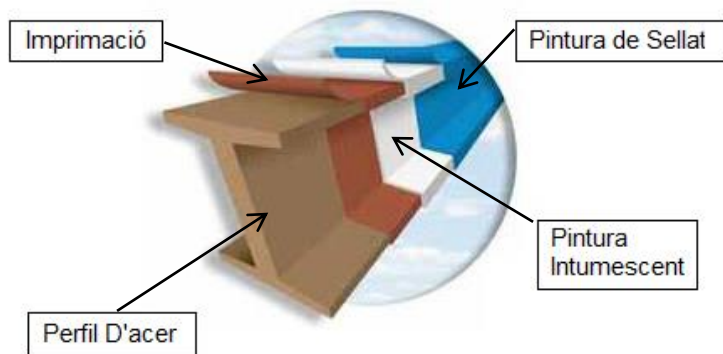


- Base Aigua
- Base Dissolvent
- Base Epoxi

### 2. Fases de la (Intumescència)

- Fusió de la pintura (melting)
- Reacció d'intumescència (intumescence)
- Formació d'una capa superficial (char formation)
- Degradació de la capa superficial (Char degradation)

### 3. Aplicació de les pintures intumescent





## Avantatges i inconvenients de les Pintures Intumescent

### Avantatges

- Bon acabat decoratiu i respecta el disseny arquitectònic
- És el sistema de protecció que incrementa menys el pes de l'edifici
  - Interessant per a Rehabilitació
  - Imprescindible en estructures OFF-Shore
- Es de fàcil aplicació, té adherència directe i no requereix de malles ni elements de fixació



### Inconvenients

- Inspecció Rigorosa després de l'aplicació
- Necessiten de manteniment periòdic
- S'aconsegueix capacitats moderades  $R_{max}$  90-120min
- Normalment només assajades per focs cel·lulòsics ISO 834



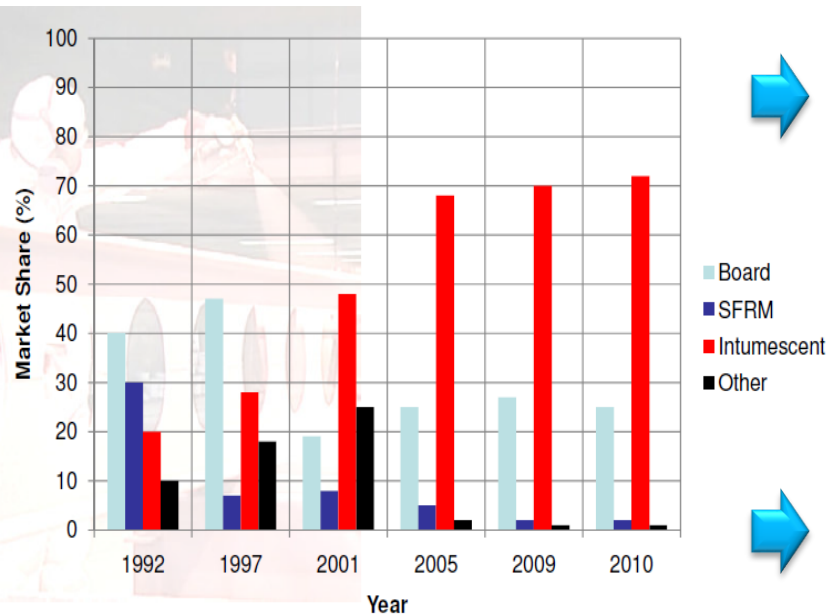
*Aparició de noves generacions de pintures per  $\uparrow$  R180 i focs d'hidrocarburs i explosions*































## Creixement del mercat i Fabricants de Pintures Intumescent

Estudi del creixement de la quota de mercat de les pintures

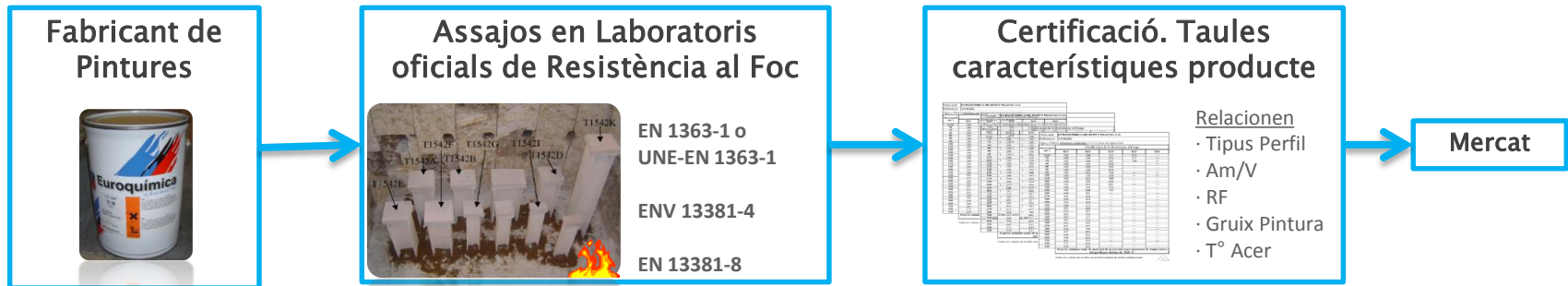


Fabricant	Logotip	Pintura	País	
Euroquímica Paints	 Euroquímica	STOFIRE	Espanya	
Valentine	 Valentine	C-THERM	Espanya	
Promat	 Promat	PromaPaint	Espanya	
Jallut	 Jallut®	INGNIJAL	Espanya	
Akzonobel (International Paints)	 AkzoNobel	INTERCHAR	US (UK)	
Sherwin-Williams	 SHERWIN-WILLIAMS.	FIRETEX	US (UK)	
PPG	 PPG	STEELGUARD	US (UK)	
Nullifire	 Nullifire	SC 900	UK	
Hensel	 HENSEL	HensoTherm	Alemanya	
Audax	 AUDAX	RENITHERM	Alemanya	
Hempel	 HEMPACORE	HempaCore	Dinamarca	
Sika	 Sika	UNITHERM	Suïssa	
Perstorp	 Perstorp WINNING FORMULAS	CHARMOR	Suècia	

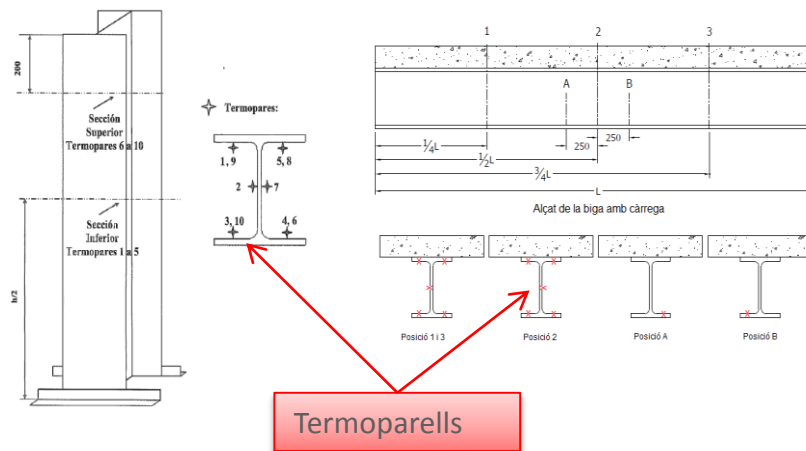




## Procés de validació d'una pintura intumescent



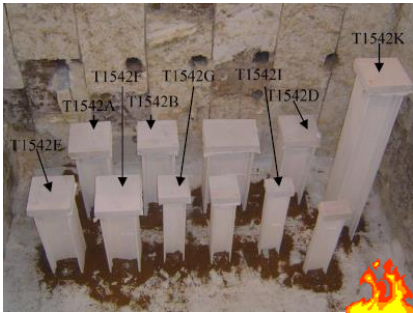
## Instrumentació i assajos amb mostres pintades





## Que es busca en els assajos de Pintures Intumescent?

### 1. Valoració de l'aïllament tèrmic que proporcionen (assaig amb pilars curts)



- Diferents seccions
- Diferents espessors de pintura
- Corba foc ISO 834

Tractament matemàtic per relacionar les diferents variables

**Dades Oficials D'assaig**

**Factors de Correcció**

### 2. Valoració de la pèrdua d'aïllament per la “enganxabilitat” (Stickability)



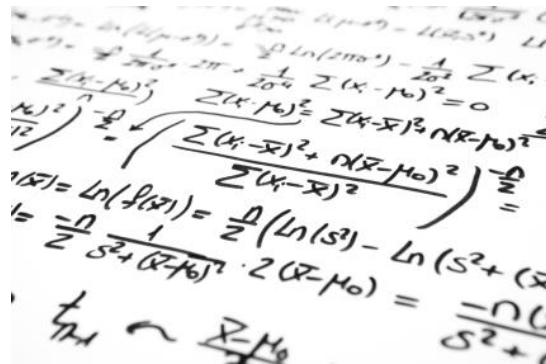
$$\frac{T^\circ \text{ Biga amb càrrega}}{T^\circ \text{ Biga sense càrrega}} = K(\theta_{LB})_{(\min)}$$

$$\frac{T^\circ \text{ Biga amb càrrega}}{T^\circ \text{ Biga sense càrrega}} = K(\theta_{LB})_{(\max)}$$

$$\frac{T^\circ \text{ Pilar Alt}}{T^\circ \text{ Pilar Curt}} = K(\theta_{TC})_{(\max)}$$

}  $K_{(\max)}$

# Enginyeria del Foc en la protecció passiva



Handwritten mathematical derivations showing the Fisher information matrix for a normal distribution with unknown mean  $\mu$  and known variance  $\sigma^2$ .

$$\frac{\partial}{\partial \mu} \ln(f(x)) = \frac{\partial}{\partial \mu} \left[ -\frac{1}{2\sigma^2} \sum (x_i - \mu)^2 \right] = -\frac{1}{\sigma^2} \sum (x_i - \mu)$$
$$\frac{\partial^2}{\partial \mu^2} \ln(f(x)) = \frac{\partial}{\partial \mu} \left[ -\frac{1}{\sigma^2} \sum (x_i - \mu) \right] = \frac{1}{\sigma^2} \sum (x_i - \mu)$$
$$I(\mu) = -E \left[ \frac{\partial^2}{\partial \mu^2} \ln(f(x)) \right] = \frac{1}{\sigma^2} E \left[ \sum (x_i - \mu) \right] = \frac{n}{\sigma^2}$$
$$I(\mu) = \frac{n}{\sigma^2} \rightarrow \sigma^2 \sim \frac{n}{I(\mu)}$$



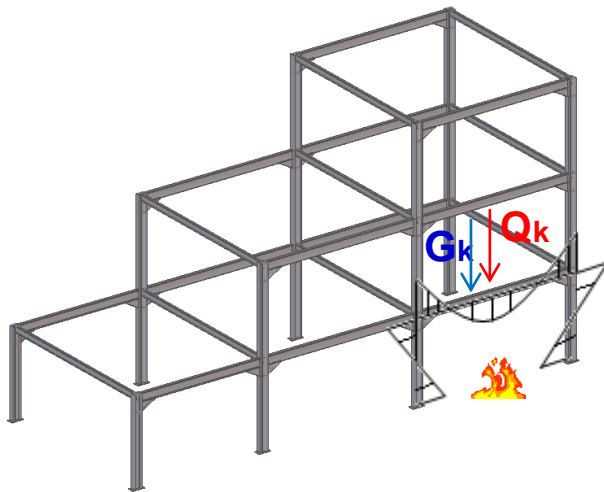
## Càlcul de protecció passiva amb mètode simplificat EN



### Problema Mecànic

Accions mecàniques EN1991-1-2

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + A_d + \gamma_{Q,1} \cdot \underbrace{(\psi_{1,1})}_{\text{Valor frecuente}} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \underbrace{(\psi_{2,i})}_{\text{Valor quasi permanente}} Q_{k,i}$$



Resistència Mecànica EN1993-1-2

$$\mu_{i0} = E_{S,d} / R_{S,d,0} \quad \theta_{cr} = 39.19 \cdot \ln \left[ \frac{1}{0.9674 \mu_{i0}^{3.833}} - 1 \right] + 482$$

$$\frac{N_{d,S,d}}{\chi_{0.9} A k_{\gamma,S}} + \frac{k_{\gamma} M_{d,S,d}}{W_{pl,y} k_{\gamma,S}} + \frac{k_{\gamma} M_{d,S,d}}{W_{pl,z} k_{\gamma,S}} \leq 1$$

$$\frac{N_{d,S,d}}{\chi_{1.0} A k_{\gamma,S}} + \frac{k_{\gamma} M_{d,S,d}}{\chi_{1.0} W_{pl,y} k_{\gamma,S}} + \frac{k_{\gamma} M_{d,S,d}}{\chi_{1.0} W_{pl,z} k_{\gamma,S}} \leq 1$$

Temperatura Crítica

T crit, RF (min)

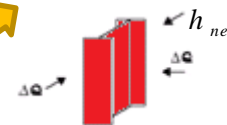
T crit, RF (min)

T crit, RF (min)

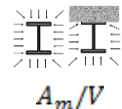
### Problema Tèrmic

Càlcul escalfament perfils EN1993-1-2

Perfils no protegits

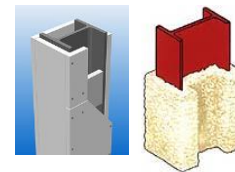


$$\Delta \theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t$$



Plaques i projectats

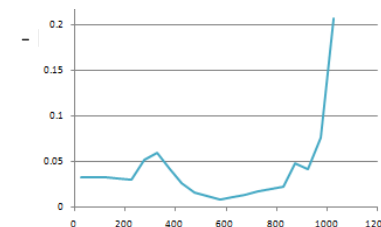
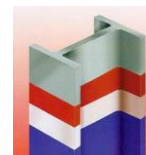
- Propietats tèrmiques conegudes ( $\lambda, c, \rho$ )



$$\Delta \theta_a = \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{1}{\rho_a \cdot c_a} \cdot \frac{A_p}{V} \left( \frac{1}{1 + \phi/3} \right) (\theta_s - \theta_a) \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta \theta_s$$

Pintures Intumescentes

- Càlcul de ( $\lambda, c, \rho$ ) i procedir com anterior

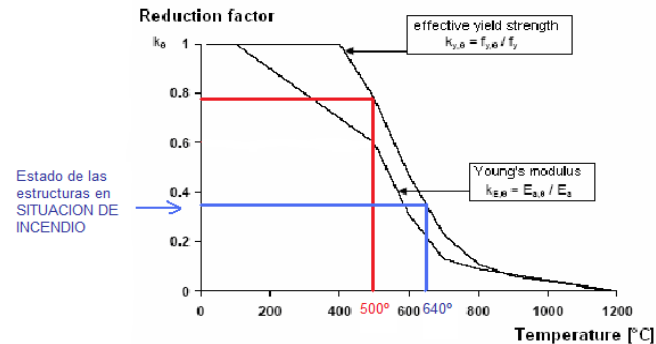


( $\lambda, c, \rho$ )

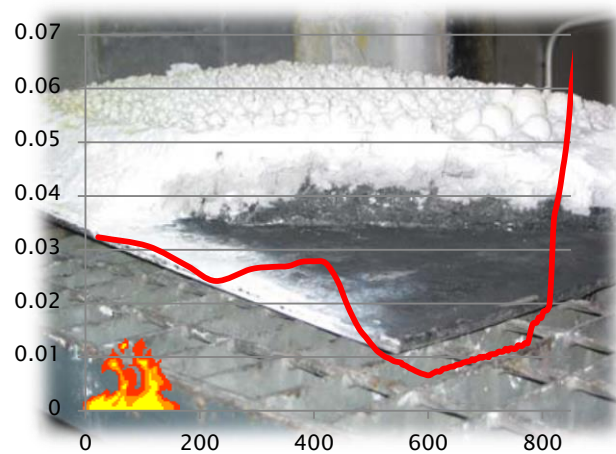


## Inconvenients tradicionals per determinar pintura

- No es disposava de cap dada termomecànica de la pintura per a poder calcular l'escalfament del perfil ni fer simulacions, només taules de fabricants.
- L'estudi de pintura s'acaba fent un cop l'obra esta construïda (Post design), dificulta la solució optima
- Alguns fabricants nomes disposaven de taules d'espessors de pintura per  $\theta_{cr}$  500 °C.
- No es podia aplicar conceptes bàsics d'enginyeria de foc amb pintures intumescent.
- El procediment actual no permetia la implementació en software estructural



# Estudi de noves metodologies per a la avaluació de pintures intumescentes





## Estratègia del projecte

### Finalitat

1. Obtenir dades termo-mecàniques de una pintura que permeti realitzar simulacions i aplicar conceptes d'enginyeria del foc **en estats inicials dels projectes**.

### Passos seguits en el projecte

1. Es va contactar amb un Fabricant de Pintures per obtenir dades reals d'una pintura intumescent.
2. Hem visitat als laboratoris de Resistència al Foc per entendre la finalitat dels assajats, les normatives que els regulen i totes les dades assajades.
3. Hem implementat matemàticament el nou mètode proposat a les normatives d'assaig i trobat bons resultats.
4. Validació del laboratori de la solució proposada .
5. S'han entregat els resultats basats en el nou mètode a Euroquímica.





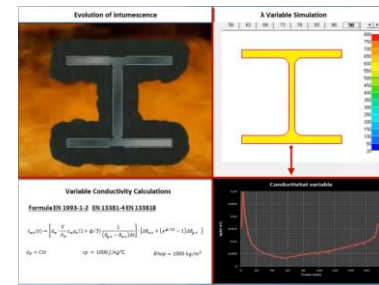
# Càlcul i optimització de protecció passiva en estructures metàl·liques amb pintures intumescent

## Bases del mètode de conductivitat variable de una pintura


- Consisteix en suposar que totes les reccions termomecàniques d'intumescència queden resumides en una conductivitat tèrmica "equivalent" referida al gruix de pintura inicial  $\lambda_p$

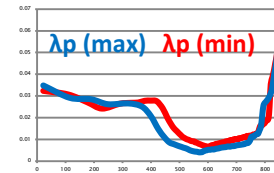
$$EN\ 1993-1-2 \quad \Delta\theta_a = \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{1}{\rho_a \cdot c_a} \cdot \frac{A_p}{V} \left( \frac{1}{1+\phi/3} \right) (\theta_s - \theta_a) \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_s$$

$$EN\ 13381-8 \quad \lambda_{p,t}(t) = \left[ d_p \cdot \frac{V}{A_p} c_a \rho_a (1 + \phi/3) \frac{1}{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t} \right] \cdot [\Delta\theta_{a,t} + (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t}]$$



El Comportament de la  $\lambda$  depèn de:

- Gruix del Recobriment ( $d_p$ )  $\longrightarrow$  Trobar 2 Valors  $\lambda$
- Forma del Perfil   $\longrightarrow$   $\lambda_{(CHS)}$   
 $\lambda_{(I, H)}$
- Factor de Forma del Perfil  $\longrightarrow$  S'ha d'acotar el rang d'aplicació (rangs factors de forma)



Avantatges del mètode:

- Permet fer simulacions de l'escalfament del perfil
- Matemàticament es pot utilitzar per qualsevol corba de foc  $\longrightarrow$  El fabricant ho hauria de verificar amb assajos
- Permet la implementació en software de càlcul





## Acreditació oficial del mètode per Afiti-Licof

- Gràcies a la demostració realitzada en el present projecte dels criteris d'acceptabilitat del mètode i el software de càlcul, el laboratori va poder emetre uns informes oficials.

GOBIERNO DE ESPAÑA  
MINISTERIO DE INDUSTRIA ENERGÍA Y TURISMO

LICOF. Laboratorio Oficial de Ensayos  
R.D. 1614/1985 de 1 de agosto  
O.M. de 21 de mayo de 1991

**AFITI LICOF**  
Centro de Ensayos e Investigación del Fuego  
Asociación para el Fomento de la Investigación y la Tecnología de la Seguridad contra Incendios

## Informe Técnico

Laboratorio de Resistencia al Fuego

**SOLICITANTE:**  
EUROQUÍMICA PAINTS, S.A.

**INFORME:**  
Evaluación de la contribución a la Resistencia al Fuego de la protección mediante pintura a elementos de acero.

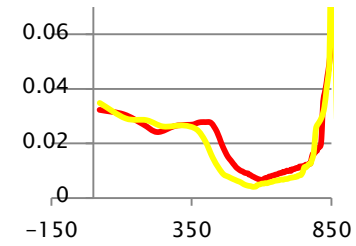
- Norma ensayo: UNE-EN 13381-4:2005
- Informe de ensayo: 1542T08
- Muestra: Protección de estructura metálica mediante pintura.

> Fabricante: Euroquímica Paints, S.A.  
 > Referencia: "STOFIRE"  
*Perfiles de secciones en "I" y en "H"*



### CURVES $\lambda$

Espesor Mínimo e [mm]   208,72		Espesor Mínimo e [mm]   214,42	
T	$\lambda_{avg}$	T	$\lambda_{avg}$
RC	W/100 AC	RC	W/100 AC
25	0.025928	25	0.079898
75	0.016169	75	0.051766
125	0.014962	125	0.015346
175	0.012419	175	0.039554
225	0.012179	225	0.038829
275	0.012050	275	0.037500
325	0.011630	325	0.032029
375	0.011499	375	0.026556
425	0.010904	425	0.018988
475	0.010124	475	0.009387
525	0.012748	525	0.006488
575	0.007401	575	0.007119
625	0.009038	625	0.006206
675	0.009756	675	0.007618
725	0.010649	725	0.009720
775	0.021526	775	0.012063
825	0.021329	825	0.023908
875	0.008384	875	0.012946
925	0.013537	925	0.010326
975	0.018739	975	0.016160
1025	0.021015	1025	0.024737



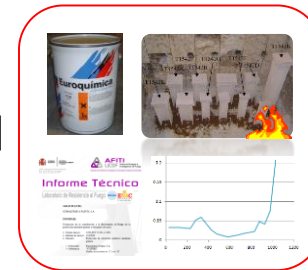
# Software per al Càlcul de Pintures Intumescents





# Càlcul i optimització de protecció passiva en estructures metàl·liques amb pintures intumescent

## Aplicacions del Software



### Aplicació gratuïta per càlcul d'elements

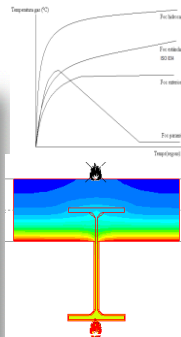
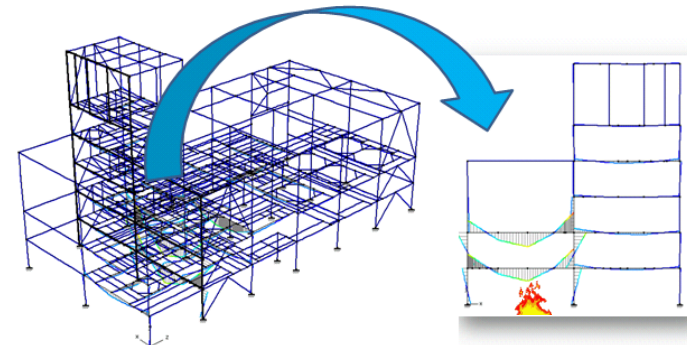
- Càlcul mecànic per a casos simples Construsoft + UPC



[www.euroquimica.com](http://www.euroquimica.com)

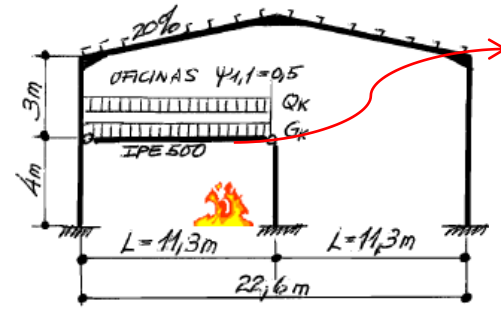
### Aplicació per Software de Càlculo Global

- Càlcul mecànic per a estructures 3D



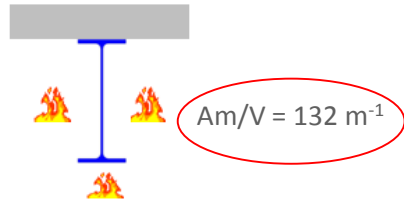


## Exemple de Càlcul i avantatges del mètode

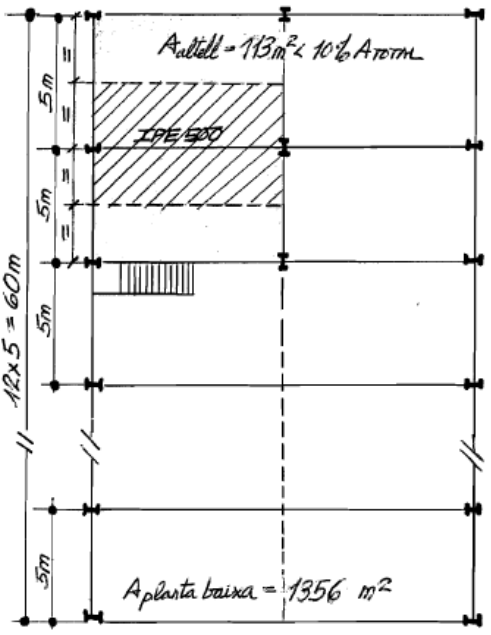


### Aplicació a un cas real (RSIEI)

- Anàlisi biga forjat IPE 500 d'acer S355JR
- Càrregues:
  - Càrrega permanent:  $g_k = 3,00 \text{ kN/m}^2$
  - Sobrecàrrega (oficines)  $q_k = 4,00 \text{ kN/m}^2$
- Impediment bolcada lateral per l'efecte diafragma del forjat
- Exposició a foc per 3 cares



- Estudi de Pintura necessària per a R15, R30, R60, R90



## 1. Resolucio Mètode Tradicional

**Euroquímica**  
Protective Coatings & Industrial Paints

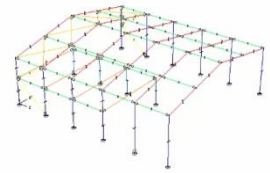
**TABLAS STOFIRE AL DISOLVENTE**  
PERFILES ABIERTOS

empeny	15	30	60	90	120
catàleg	1302/2018	1302/2018	2406/2018	2406/2018	1876/2018
50	195	279	752	1444	2043
55	195	279	752	1444	2043
60	195	279	752	1444	2043
65	195	279	752	1444	2230
70	195	302	752	1574	2421
75	195	324	807	1702	2614
80	195	345	882	1827	2810
85	195	365	957	1949	3010
90	195	384	1029	2069	
95	195	402	1100	2186	
100	195	419	1170	2301	
105	195	419	1170	2301	
110	195	450	1304	2524	
115	195	450	1304	2524	
120	195	479	1434	2737	
125	195	479	1434	2737	
130	195	506	1558		
135	195	506	1558		
140	195	531	1678		
360	195				
365	195				
370	195				
375	195				

## 2. Resolucio amb Software 2D



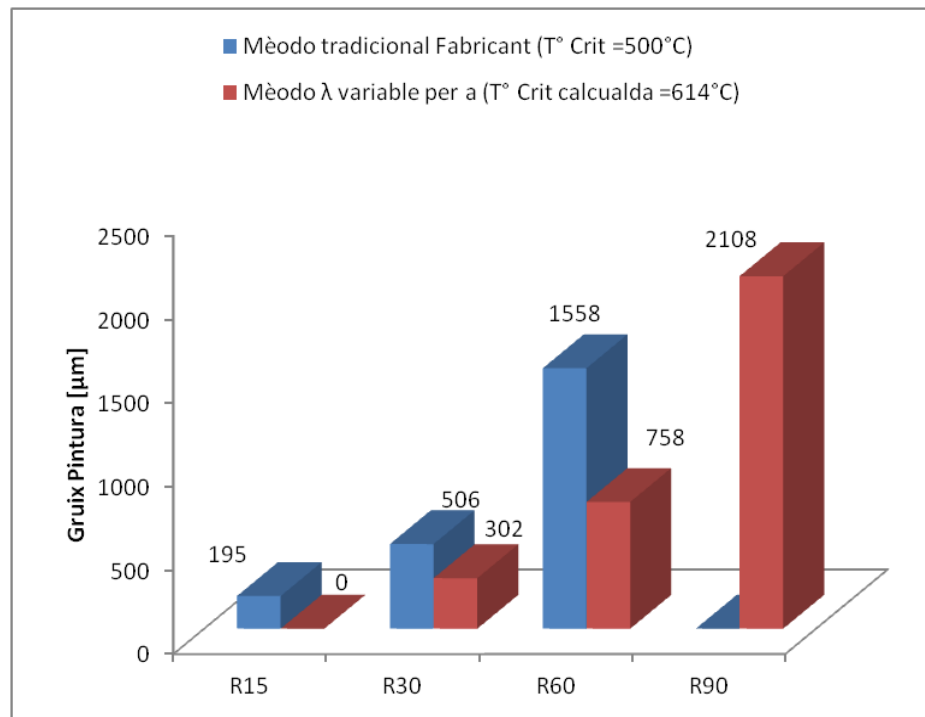
## 3. Resolució amb Software 3D





## Avantatges de càlcul de pintura en estat inicials del projecte

### Comparació de resultats



Espressors de pintura Stofire en µm	R15	R30	R60	R90
Mètode tradicional Fabricant (T° Crit =500°C)	195 µm	506 µm	1558	NO Possible
Mètode λ variable per a (T° Crit calculada =614°C)	NO Necessita	302 µm	758 µm	2108 µm
% de Reducció	-----	40.32%	51.35%	-----

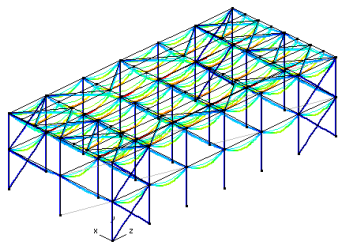
# Informació de pintures intumescentes en sistemes BIM



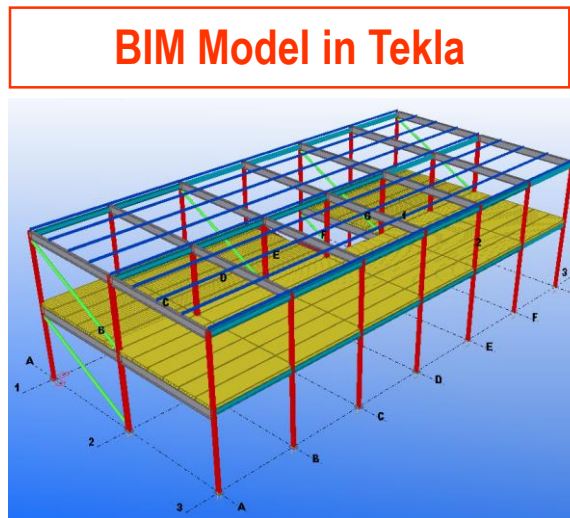
**BIM ==> gran revolution en el sector de la construcció**

*What is BIM??? All the Information in a 3D Model*

## Structural Analysys



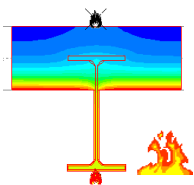
## BIM Model in Tekla



## Control



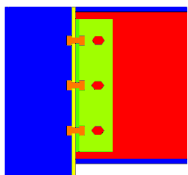
## Fire Protection Design



## Fabrication



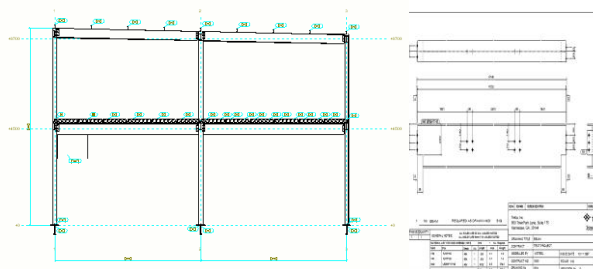
## Conection Design



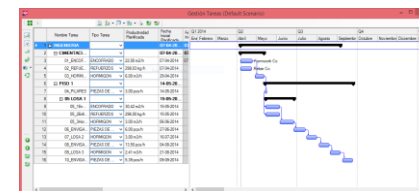
## Material List

Item	Material	Quantity	Unit
1.1	BEAM	1000.0	m
1.2	BEAM	1000.0	m
1.3	BEAM	1000.0	m
1.4	BEAM	1000.0	m
1.5	BEAM	1000.0	m
1.6	BEAM	1000.0	m
1.7	BEAM	1000.0	m
1.8	BEAM	1000.0	m
1.9	BEAM	1000.0	m
1.10	BEAM	1000.0	m
1.11	BEAM	1000.0	m
1.12	BEAM	1000.0	m
1.13	BEAM	1000.0	m
1.14	BEAM	1000.0	m
1.15	BEAM	1000.0	m
1.16	BEAM	1000.0	m
1.17	BEAM	1000.0	m
1.18	BEAM	1000.0	m
1.19	BEAM	1000.0	m
1.20	BEAM	1000.0	m

## Drawings



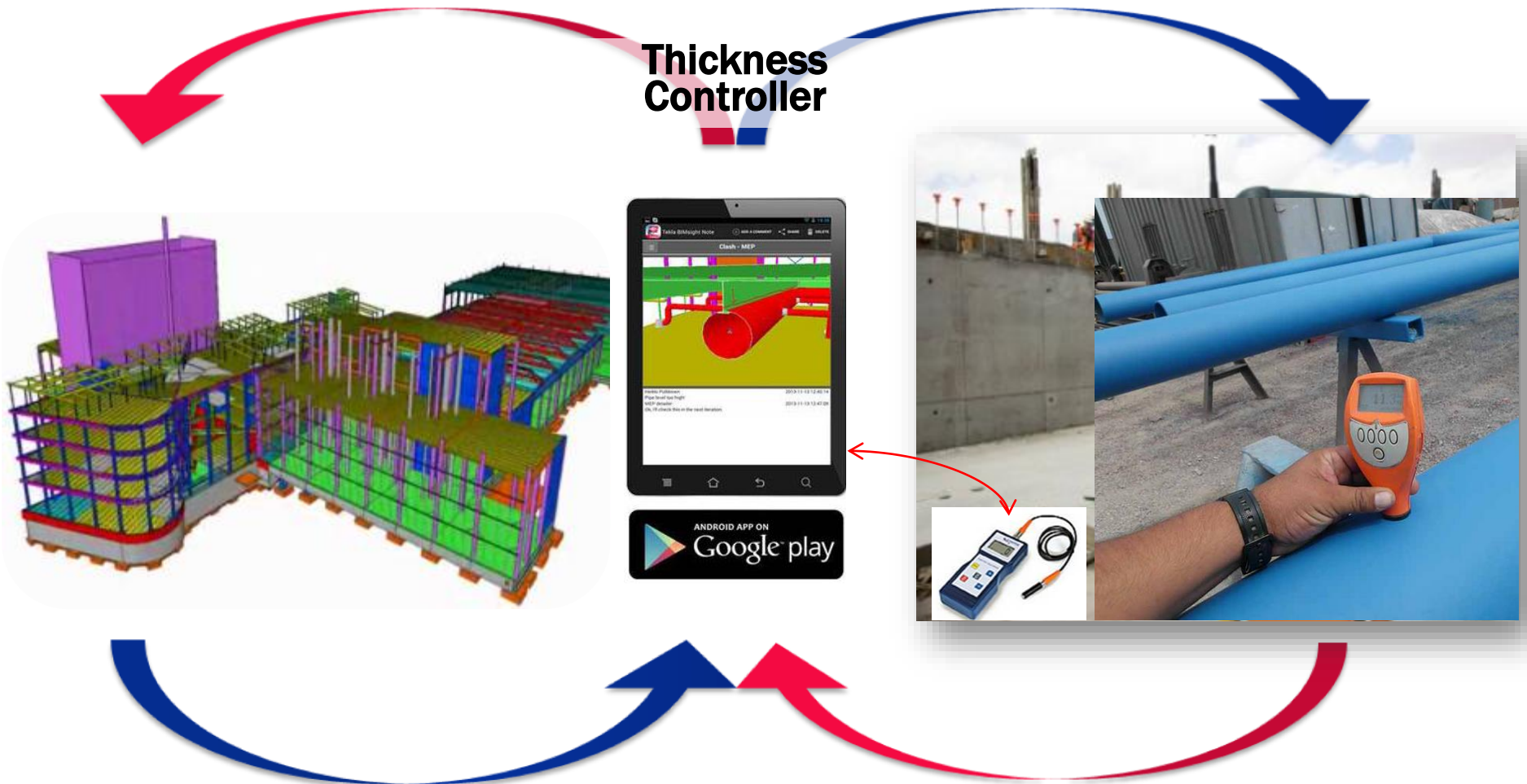
## Schedule



# APP applications to connect BIM models with real data in situ

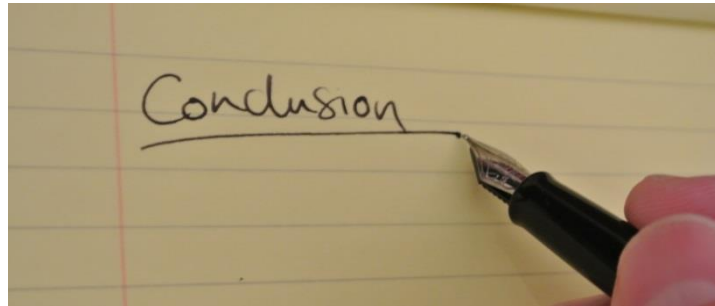
*Check the real data in construction from data in Model 3D*

## Thickness Controller





# Conclusions





## Conclusions

- La realització del projecte ha servit per obtenir el primer informe oficial basat en el mètode de conductivitat variable a l'estat espanyol.
- Aquest mètode permet aplicar conceptes d'enginyeria del foc amb pintures intumescent i dona més transparència a aquest sistema de protecció.
- El mètode permet demostrar aplicacions de pintura més òptimes i demostrar aplicacions a R90 i R120 quan abans no era possible.
- El resultat del projecte ha permès incrementar la competitivitat del Fabricant Euroquímica Paints i mercat d'aplicació.
- Els resultats del projecte afavoreix el sector de l'acer demostrant reduccions de costos en la PPCI quan s'utilitzen pintures intumescent.

**Gràcies per L'atenció**

# Torn de Preguntes

