

Disseny Prestacional **Metodologia i Projecte**

28/11/2024

F. Xavier Querol Esparch
Director Tècnic

pefipresa
MINIMAX GmbH GROUP



Diputació
Barcelona

FORÇA IMPULSORA PELS ESTUDIS PRESTACIONALS

REQUERIMENT PRESCRIPTIU DIFÍCIL DE COMPLIR	OBJECTIU DE SEGURETAT AFECTAT
<ul style="list-style-type: none">• Reacció al foc dels materials• Resistència al foc (o estabilitat) de les estructures• Resistència al foc dels tancaments• Limitació de l'ocupació• Limitació de distàncies d'evacuació• Mitjans d'evacuació• Sistemes de control del fum de l'incendi (activats automàticament amb la detecció)• Sistemes de detecció i alarma• Sistemes d'extinció/control de l'incendi• Enllumenat d'emergència• Senyalització	SEGURETAT DURANT L'EVACUACIÓ DELS OCUPANTS

FORÇA IMPULSORA PELS ESTUDIS PRESTACIONALS

REQUERIMENT PRESCRIPTIU DIFÍCIL DE COMPLIR	OBJECTIU DE SEGURETAT AFECTAT
<ul style="list-style-type: none">• Accessibilitat• Grandària dels sectors• Reacció al foc dels materials• Resistència al foc de les estructures• Resistència al foc dels tancaments• Limitació de distàncies d'evacuació (seran igualment vies d'intervenció)• Mitjans d'evacuació• Sistemes de control del fum de l'incendi (activats automàticament amb la detecció, amb retard o manuals)• Sistemes d'extinció/control de l'incendi• Enllumenat d'emergència• Senyalització	SEGURETAT DURANT LA INTERVENCIÓ DE BOMBERS

FORÇA IMPULSORA PELS ESTUDIS PRESTACIONALS

REQUERIMENT PRESCRIPTIU DIFÍCIL DE COMPLIR	OBJECTIU DE SEGURETAT AFECTAT
<ul style="list-style-type: none">• Distàncies entre establiments• Accessibilitat• Grandària dels sectors• Reacció al foc dels materials• Resistència al foc de les estructures• Resistència al foc dels tancaments• Sistemes d'extinció/control de l'incendi	EVITAR DANY A ESTABLIMENTS / EDIFICIS PROPERS

FORÇA IMPULSORA DELS ESTUDIS PRESTACIONALS

Possibles raons pels incompliments

- Necessitats tècniques de processos productius o d'emmagatzematge.
- Impossibilitats econòmiques.
- Edificis, establiments, urbanitzacions existents al inici de l'activitat (augment, modificació).
- Informes del Serveis de Prevenció / Protecció Civil.

Justificacions per acceptar aquestes solucions

- El marge de seguretat pot variar considerablement en determinades condicions (grans alçaries, grans superfícies, baixa càrrega de foc).
- Els requisits prescriptius poden ser molt conservadors envers els objectius pretesos pel cas en particular.

DEFINICIÓ. QUÈ ÉS UN DISSENY PRESTACIONAL?

SFPE Engineering Guide to Performance-Based design, 2007

*“Un mètode d’enginyeria per al disseny de la protecció contra incendis basat en: (1) **fites i objectius** de la seguretat contra incendis establerts, (2) anàlisi determinística o probabilística dels **escenaris d’incendi**, i (3) **avaluació quantitativa** de les alternatives de disseny respecte les fites i objectius de la seguretat contra incendis utilitzant eines, metodologies i criteris de prestacions acceptats en l’enginyeria.”*

COMPARATIVA ENTRE DISSENY PRESCRIPTIU I PRESTACIONAL

	Avantatges	Desavantatges
Codis prescriptius	<ul style="list-style-type: none">• Fàcils d'aplicar.• Basats en lliçons i experiència del passat.• Control administratiu més senzill.	<ul style="list-style-type: none">• Basats en normes rígides d'assaig / classificació.• Poden ofegar la innovació tecnològica en processos productius, d'emmagatzematge o de protecció contra incendis.
PBD	<ul style="list-style-type: none">• Permet tenir en compte les característiques úniques de l'edifici i els seus usos.• Permet un coneixement millor i més profund de com es comportarà l'edifici en cas d'incendi.	<ul style="list-style-type: none">• Requereix molta més expertesa que el disseny prescriptiu.• Pot ser més sensible als canvis d'ús de l'edifici.

DIFICULTATS DEL DISSENY PRESTACIONAL

- Objectius de seguretat, criteris d'anàlisi i procediment de treball **no estan clarament definits als reglaments d'incendis.**
- Què és **seguretat equivalent**?
- **Coneixement limitat** de l'enginyeria de seguretat contra incendis entre **projectistes i autoritats competents**
- Quin enginyer o entitat té el **coneixement necessari** per fer un disseny prestacional?
- Pot ser necessari un **equip multi-disciplinar** (coneixements de física i química de l'incendi, anàlisi de riscos, simulació computacional, càlcul estructural en situació d'incendi, mitjans de protecció activa i passiva, comportament humà en situacions d'emergència, comportament dels materials en situació de incendi,...)

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

D'acord amb la guia d'aplicació de l'RSCIEI el projecte hauria de basar-se en:

- **UNE-ISO 23932**: Enginyeria de Seguretat contra Incendis. Principis Generals.
- **UNE-ISO 16733-1**: Enginyeria de Seguretat contra Incendis. Part 1- Selecció d'escenaris d'incendis de disseny.
- **UNE-ISO 16730-1** (o una altra especificació equivalent): Enginyeria de Seguretat contra Incendis. Procediments i requisits per a la verificació i la validació de mètodes de càlcul.

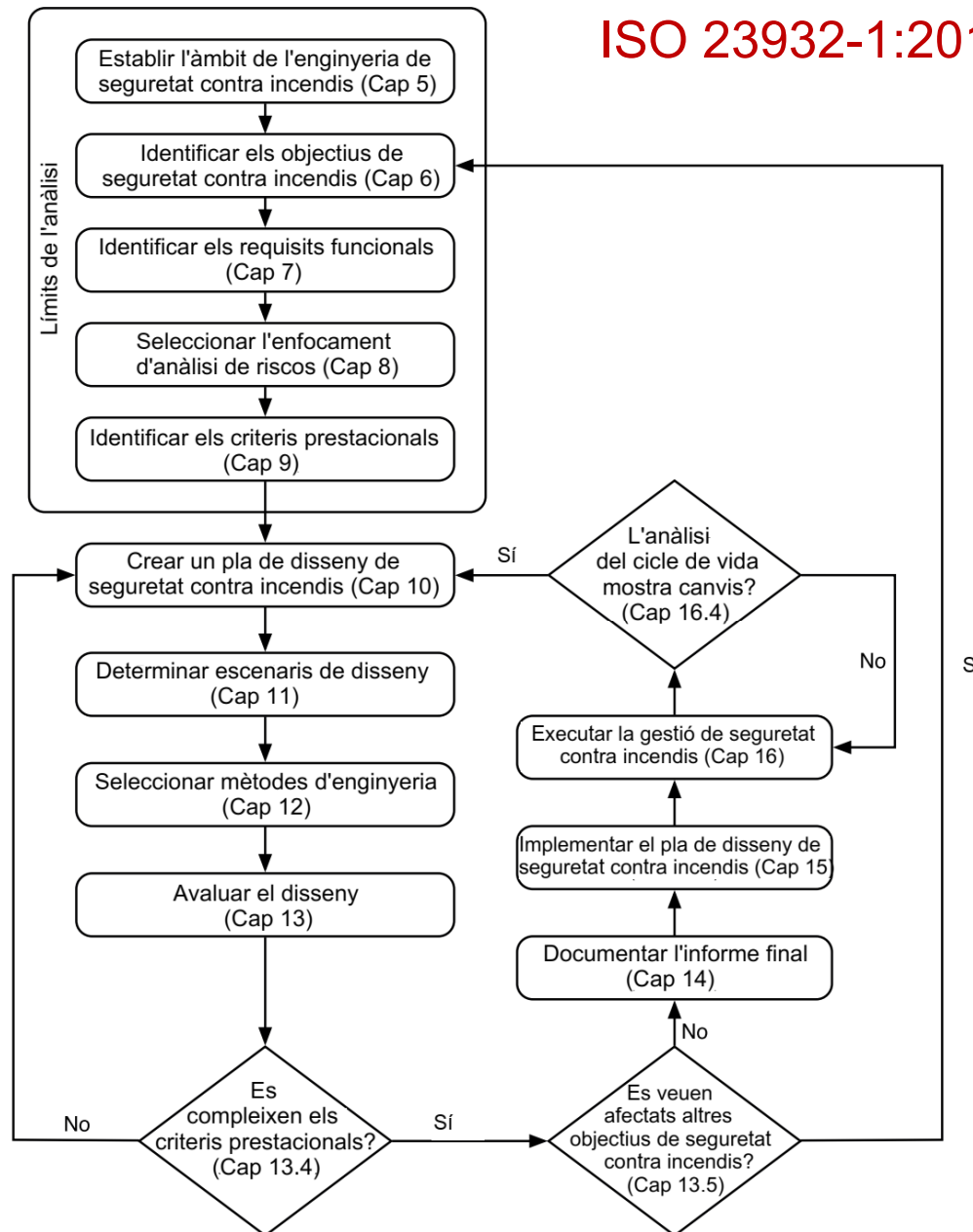
El CTE no estableix metodologia per al disseny prestacional.

Altres guies d'ús comú:

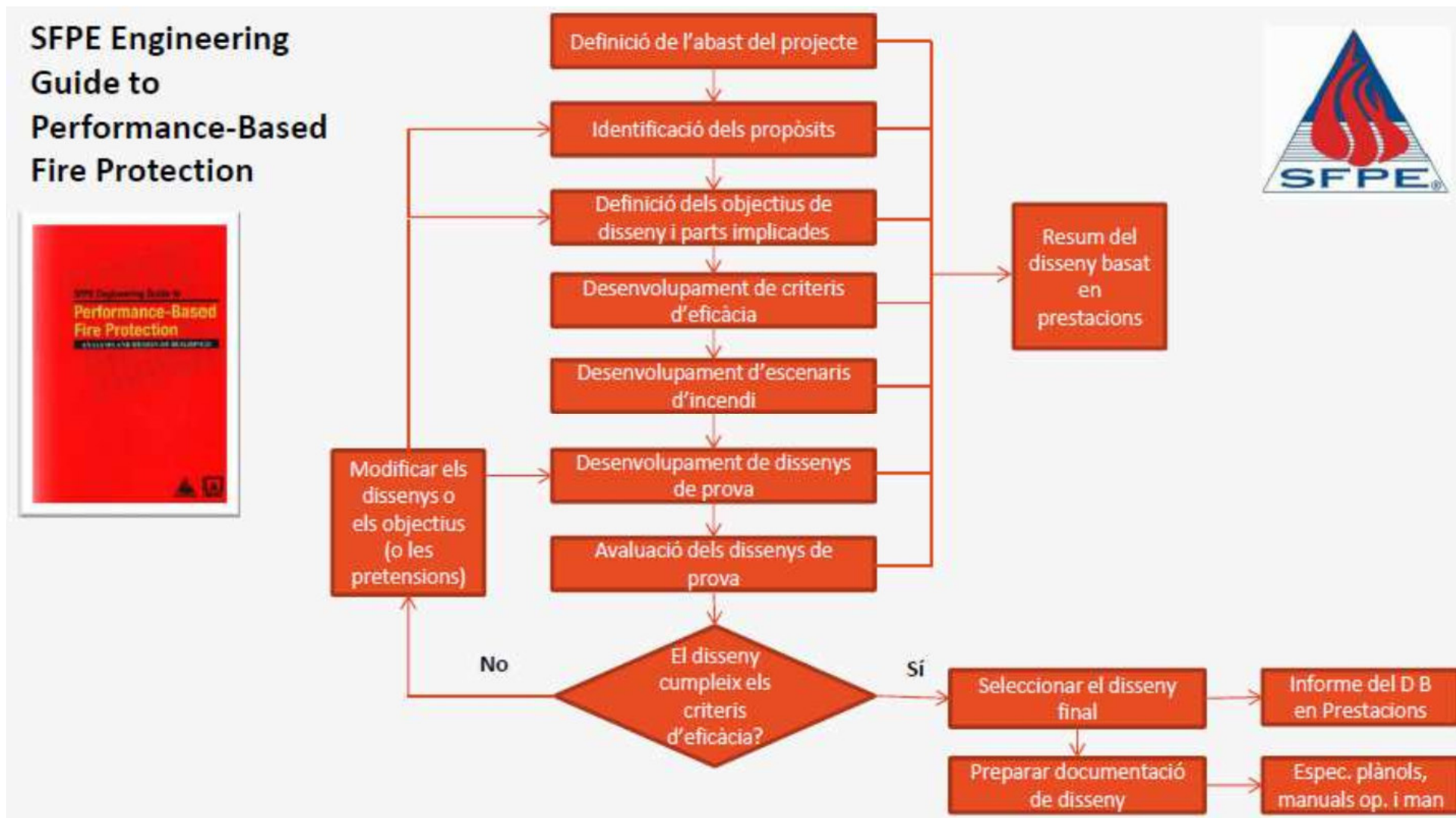
- SFPE, BS 7974, IFEG, Singapore.

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

ISO 23932-1:2018

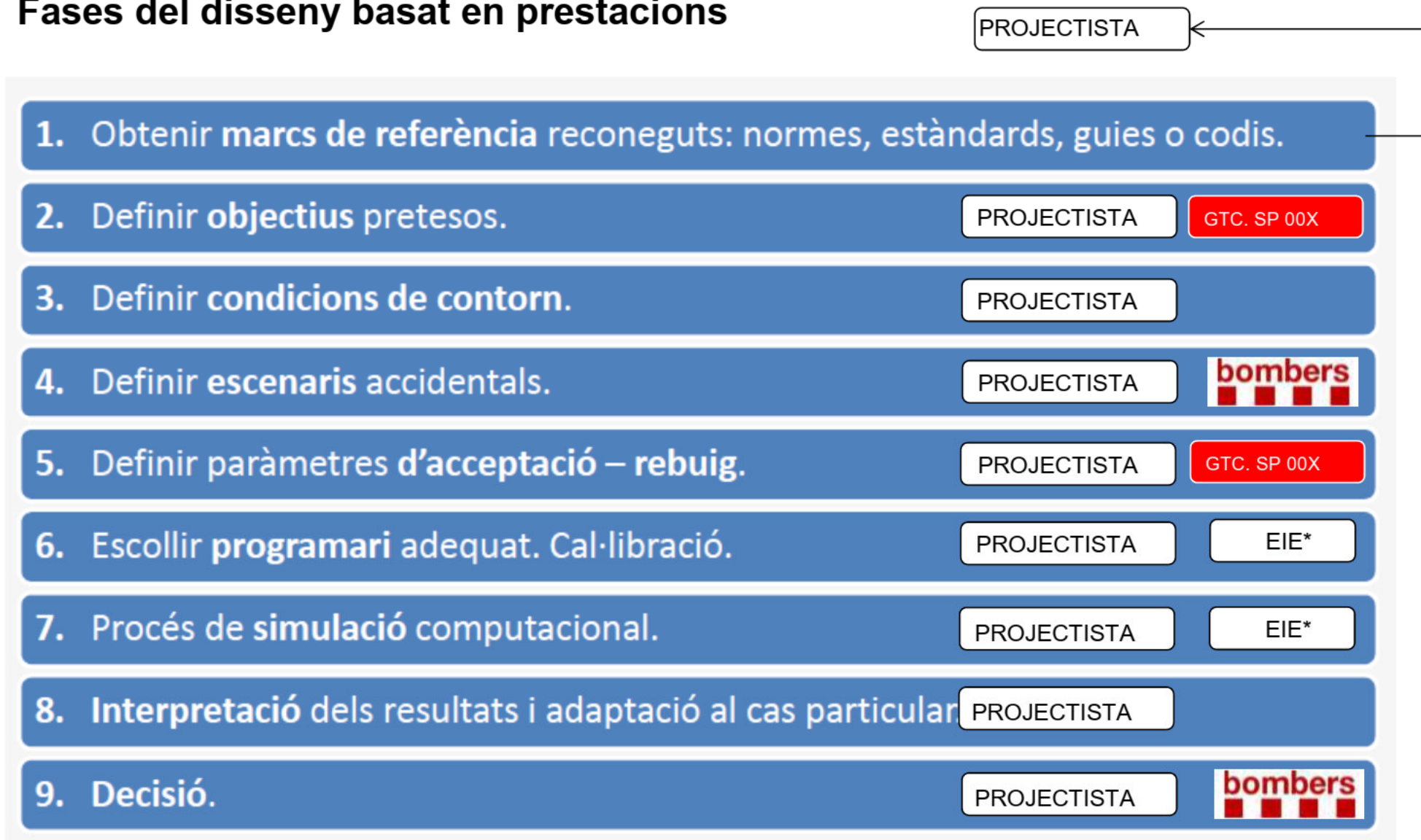


METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL



METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

Fases del disseny basat en prestacions

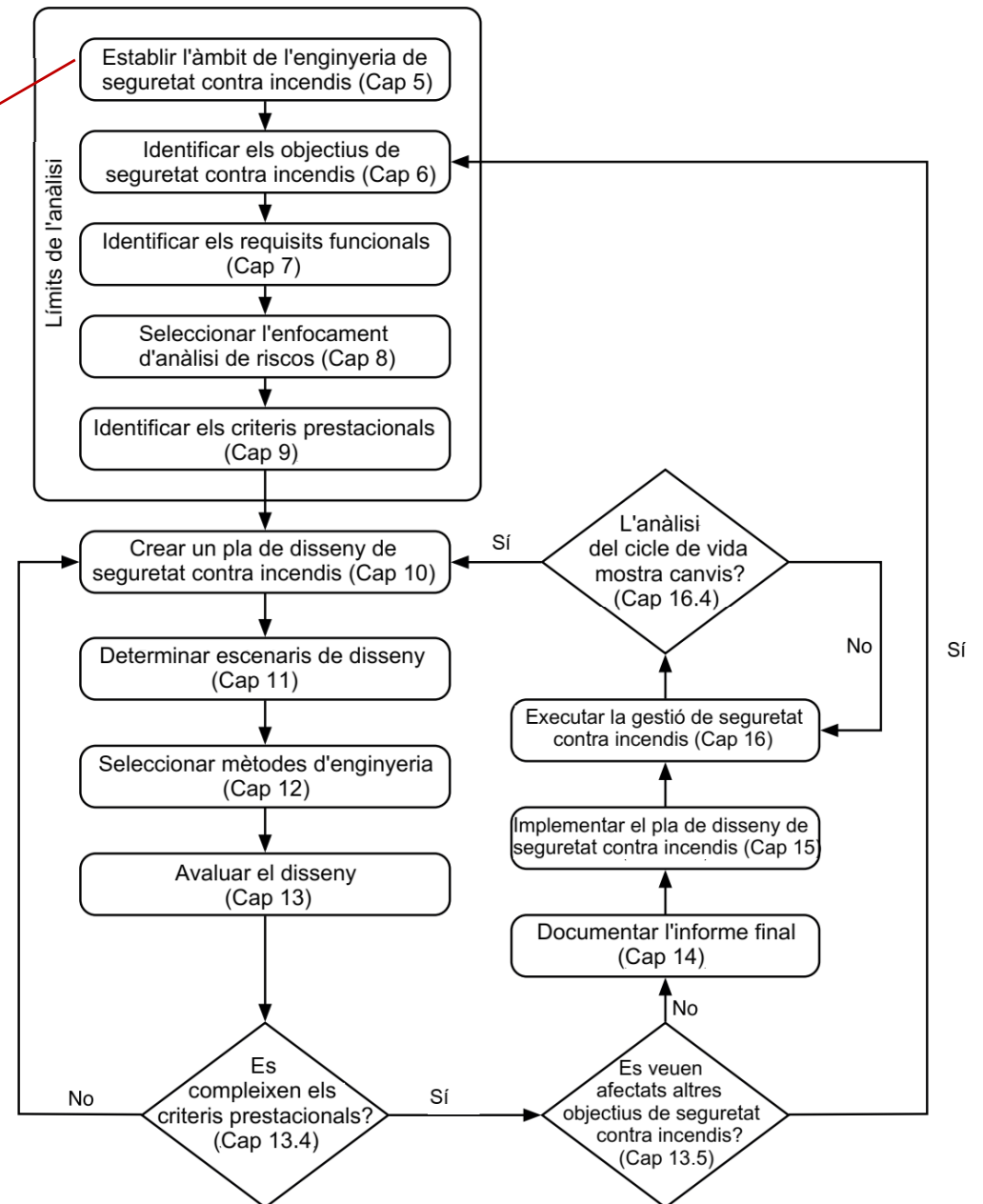


METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

Àmbit del projecte

En l'àmbit del projecte prestacional (enginyeria de seguretat contra incendis) s'identifiquen les parts d'un edifici o establiment que seran considerats en el disseny, les característiques desitjades del disseny i de l'edifici, i les normes que són d'aplicació.

L'àmbit també inclou la identificació de les parts interessades del projecte, és a dir tots aquells que tenen interès en l'èxit del disseny, com poden ser els propietaris de l'edifici, l'administració responsable, les companyies d'assegurances, els potencials llogaters, els bombers, etc.



METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

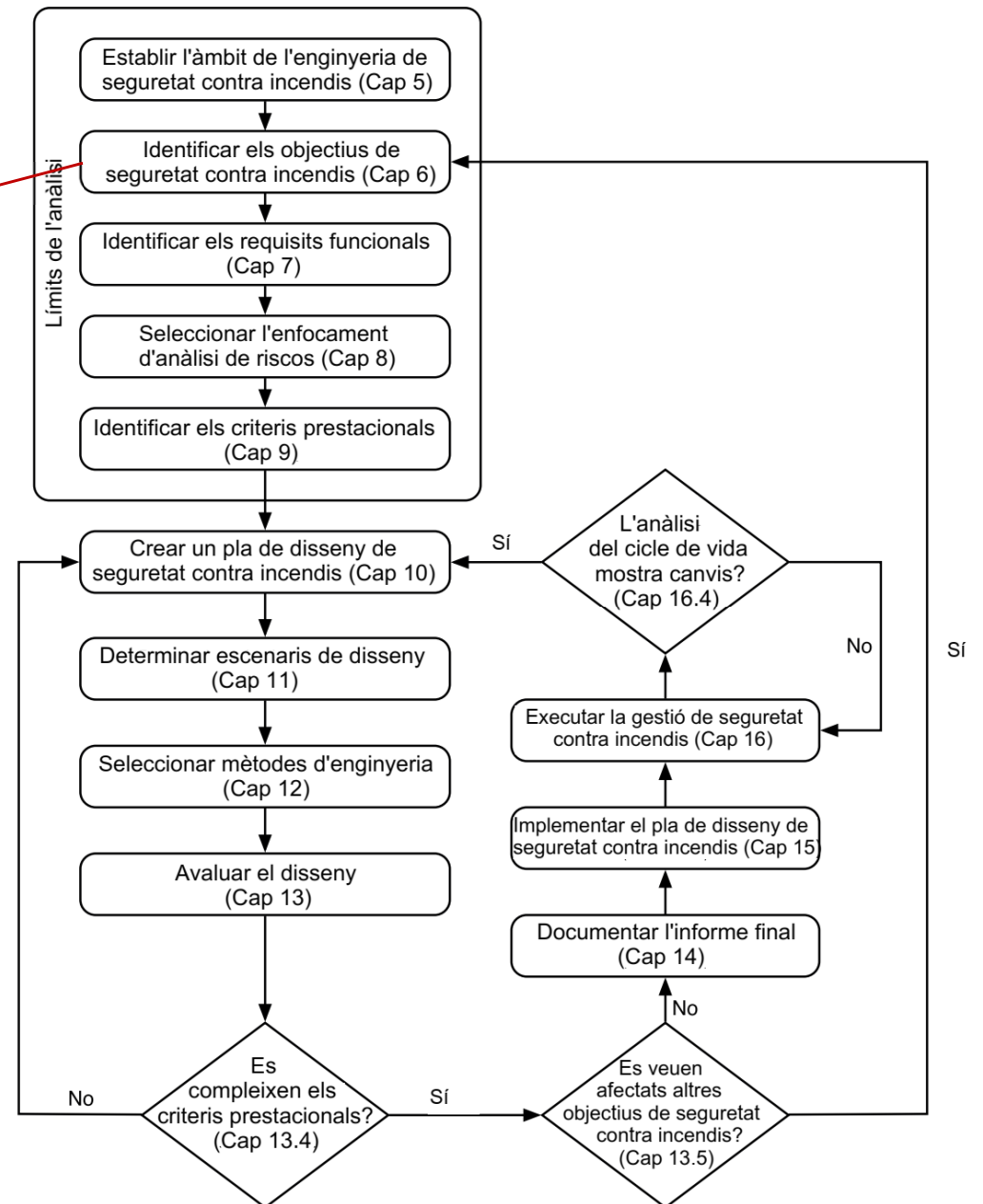
Objectius de seguretat

Són els **objectius de seguretat contra incendis més fonamentals** d'un projecte de disseny prestaional, expressats **en termes generics i qualitatus**, de tal manera que la gent corrent, sense experiència en enginyeria, pugui entendre.

La finalitat dels objectius és **facilitar l'entesa i l'acord** sobre com ha de respondre l'edifici en cas d'incendi.

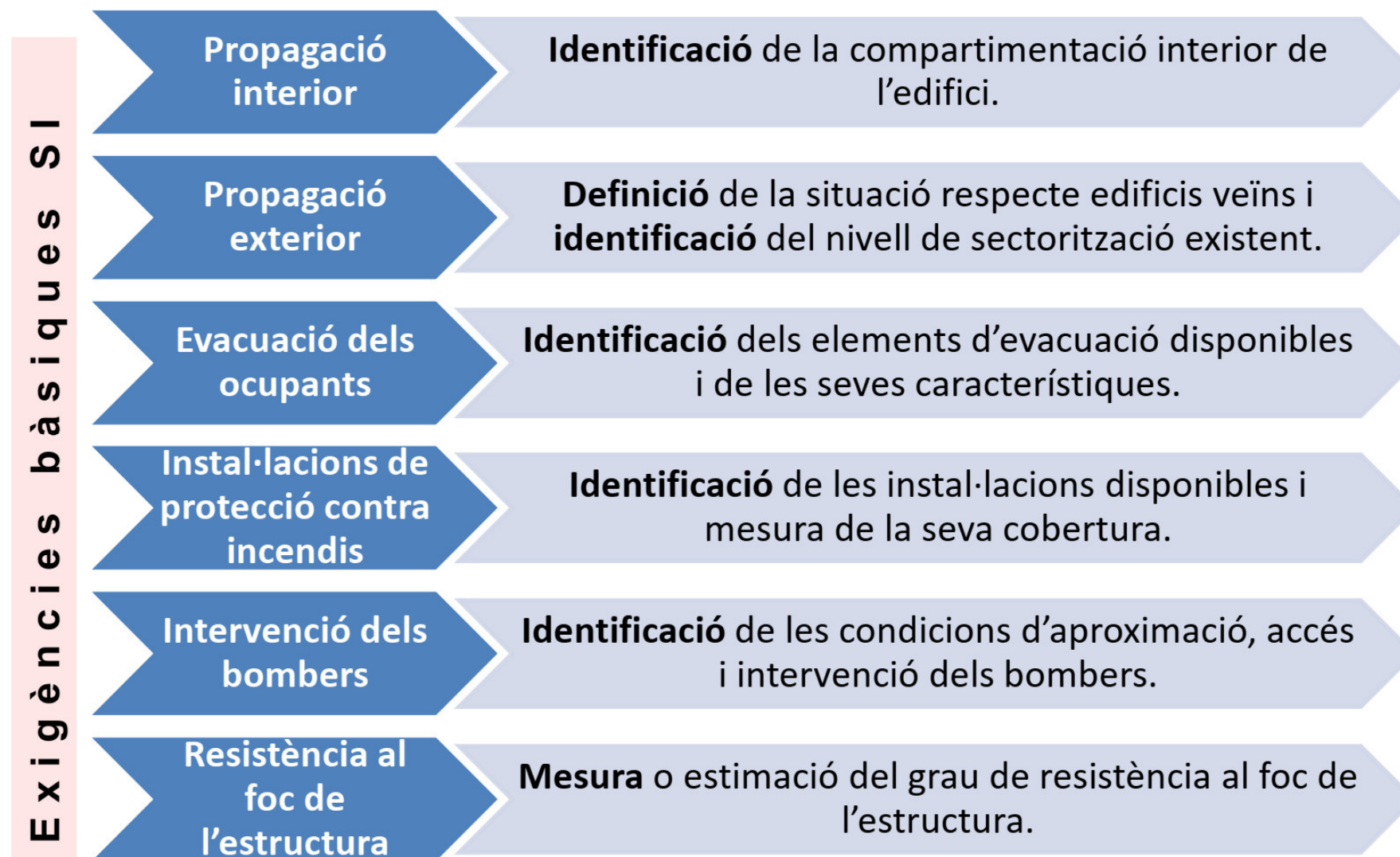
La guia de la SFPE identifica quatre grans fites per a la seguretat contra incendis?:

1. seguretat per a la vida
2. protecció dels béns
3. continuïtat del servei
4. protecció del medi ambient.



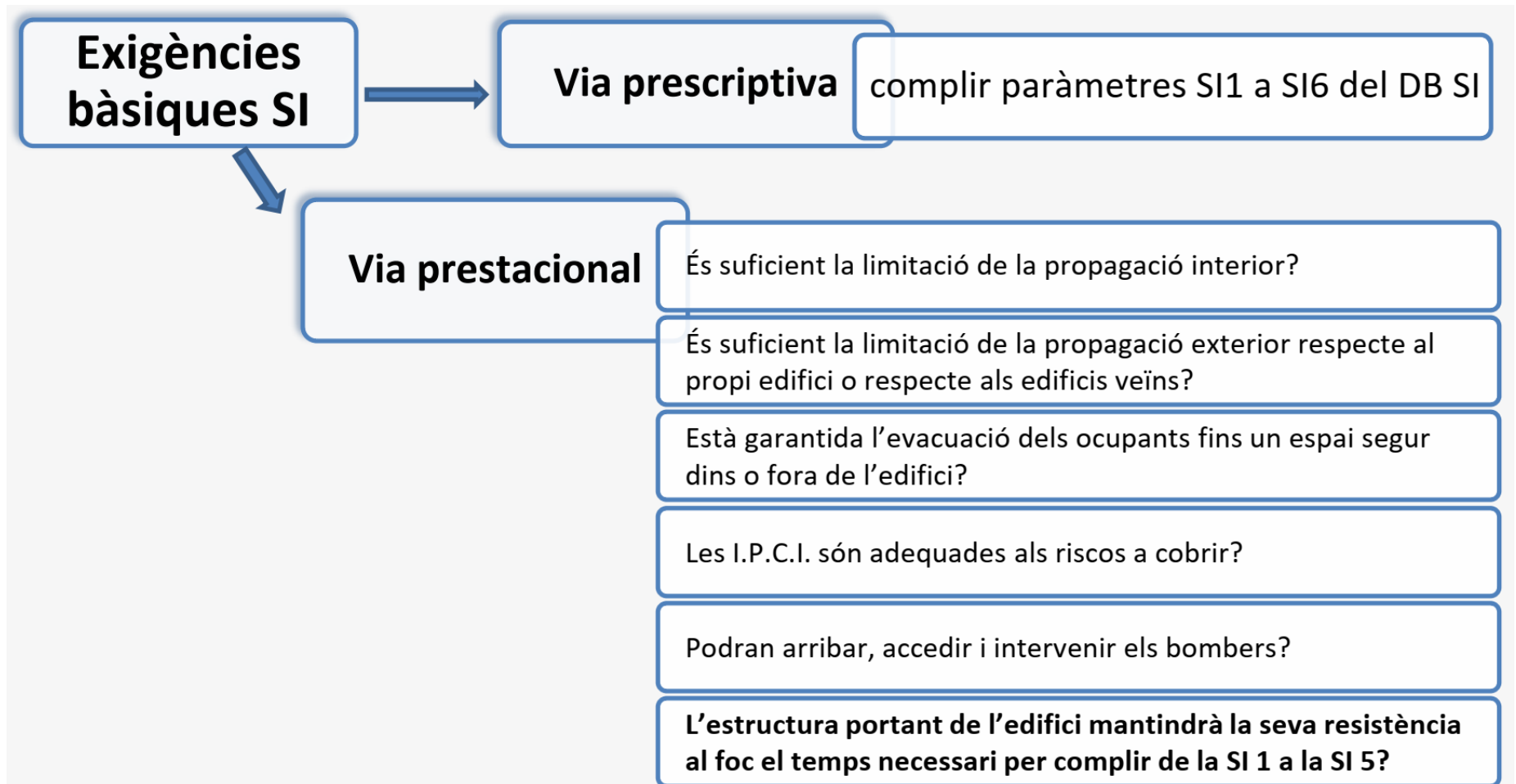
METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

OBJECTIUS - CTE DB SI



METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

OBJECTIUS - CTE DB SI



METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

DEFINICIÓ D'OBJECTIUS

Reglamentaris: obligatoris

- Garantir l'evacuació: L'edifici disposarà dels mitjans adequats per facilitar que els ocupants puguin abandonar-lo o aconseguir un lloc segur dins del mateix en condicions de seguretat.
- Garantir la intervenció: Facilitar la intervenció dels equips de rescat i d'extinció d'incendis. En edificis aïllats <15 m, els bombers disposaran d'almenys 60 minuts d'intervenció ofensiva / rescat, amb condicions d'intervenció aptes i resistència estructural, amb ruixadors i control de fums funcionant.
- No afectar a edificis veïns: Es limitarà la propagació de l'incendi a edificis o establiments veïns.

Empresarials: voluntaris

- Continuació d'activitat.
- Protecció de béns propis.
- Limitar els danys mediambientals.
- Limitar els danys a construccions o productes patrimonials

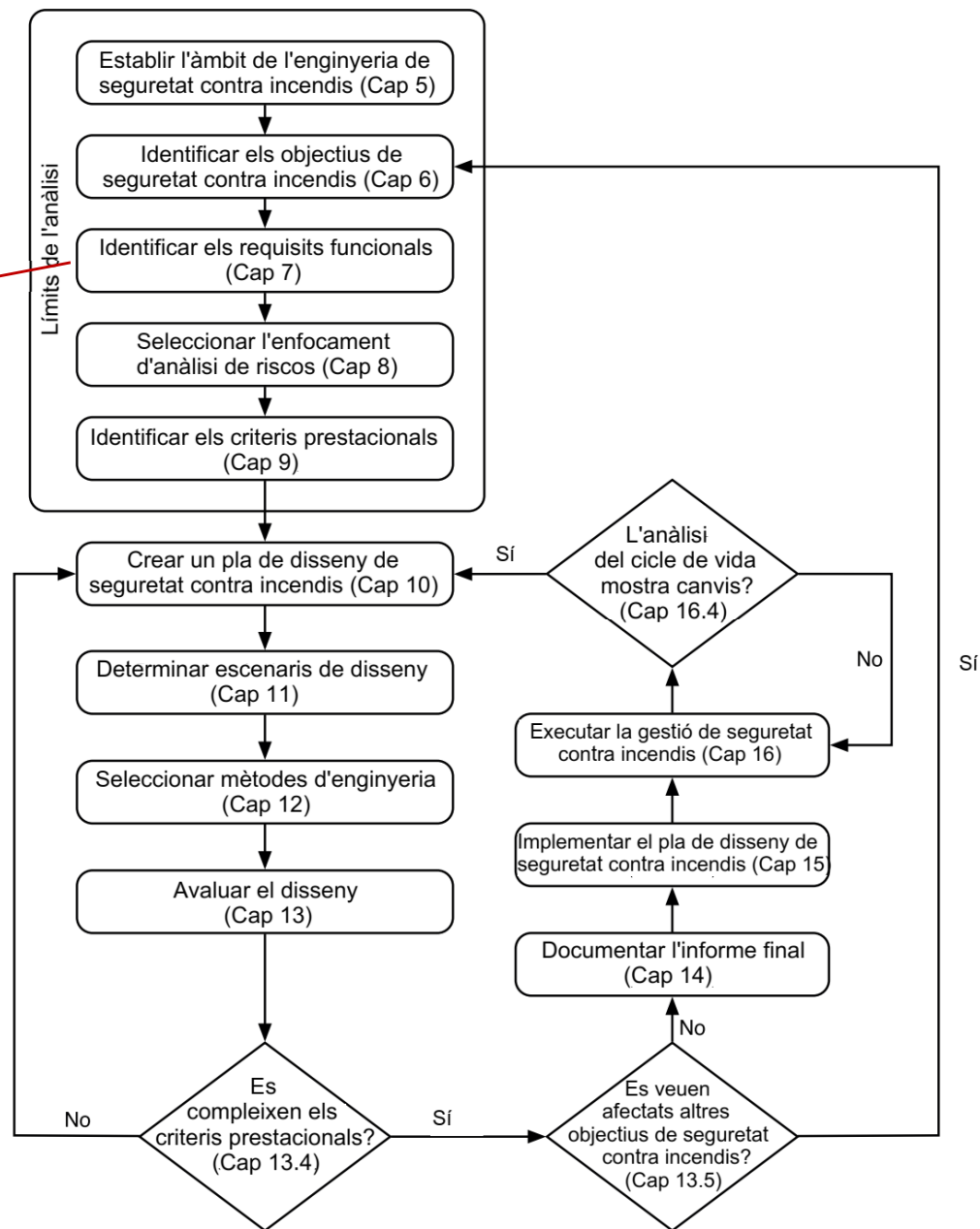
METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

Exigències o requisits funcionals

Els **requisits / exigències funcionals** han de ser expressats de manera que siguin mesurables i quantificables i que conduixin cap als objectius plantejats.

La guia de la SFPE defineix dos tipus:

- De les **parts interessades** (ex. màxim nivell de dany a les persones permès, danys als béns o equips crítics o de la durada de l'aturada del servei)
- De **disseny**. Es centren en els ítems que s'han de protegir del foc i descriuen les condicions màximes o mínimes necessàries per complir els objectius.



METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

Exigències o requisits funcionals – CTE DB SI

Està garantida l'evacuació dels ocupants fins un espai segur dins o fora de l'edifici?

SI

Seguridad
en caso
de incendio

PRESCRIPTIU

1. Ocupació/densitat
2. Sortida de planta /EES
3. Distància evacuació
4. Capacitat element
5. evacuació
6. Enllumenat
7. Senyalització

PRESTACIONAL

Tipus ocupant edifici
Característiques risc
Incendi de disseny
Elements de supressió incendi
Control de fums
Posició incendi
Temps d'evacuació
Visibilitat
Alçada lliure de fums
Paràmetres de supervivència
Radiació
Temperatura
Toxicitat
Interacció amb altres sistemes de PCI

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

Exigències o requisits funcionals

1. OBJECTIU D'EVACUACIÓ DELS OCUPANTS	
Objectiu 1.1	Considerant l'acció d'incendi previsible al recinte o edifici, en un escenari normalitzat i un emplaçament més desfavorable, s'assegurarà que es pot dur a terme l'evacuació dels ocupants en condicions segures.
Objectiu 1.1.1	Evitar condicions de <i>flashover</i> a l'àrea on s'ha originat l'incendi.
Objectiu 1.1.2	Mantenir el recorregut d'evacuació en unes condicions adequades de temperatura ($^{\circ}\text{C}$).
Objectiu 1.1.3	Mantenir el recorregut d'evacuació amb unes condicions adequades de concentració d'oxigen (O_2).
Objectiu 1.1.4	Mantenir el recorregut d'evacuació amb unes condicions adequades de concentració de monòxid de carboni (CO).
Objectiu 1.1.5	Mantenir el recorregut d'evacuació amb unes condicions adequades de concentració de diòxid de carboni (CO_2).
Objectiu 1.1.6	Mantenir el recorregut d'evacuació dels ocupants amb un flux tèrmic adequat (kW/m^2).
Objectiu 1.1.7	Mantenir el recorregut d'evacuació dels ocupants amb una visibilitat adequada (m).
Objectiu 1.1.8	Garantir que les condicions de senyalització implantades a l'aparcament son suficients per evacuar l'escenari d'incendi fins a un lloc segur.
Objectiu 1.1.9	Garantir una il·luminació dels recorreguts d'evacuació adequada d'acord amb l'escenari d'incendi i ajustada a les condicions avaluades.
Objectiu 1.1.10	Garantir que les persones amb mobilitat reduïda (PMR) i les seves condicions de mobilitat han estat considerades a l'estudi d'evacuació respecte el moviment de les persones.
Objectiu 1.1.11	Garantir que les persones amb discapacitats visuals i auditives han estat considerades a l'estudi d'evacuació respecte els mitjans d'avís a les persones.

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

Exigències o requisits funcionals

Limitar l'impacte al medi ambient

- Evitar que l'incendi provoqui danys mediambientals (flames, fums).
- Limitar danys mediambientals per l'aigua o els agents extintors.
- Sistemes de recollida o tractament d'abocaments amb capacitat suficient.
- Extinció efectiva en el menor temps possible.
- Actuació primerenca del serveis d'intervenció.

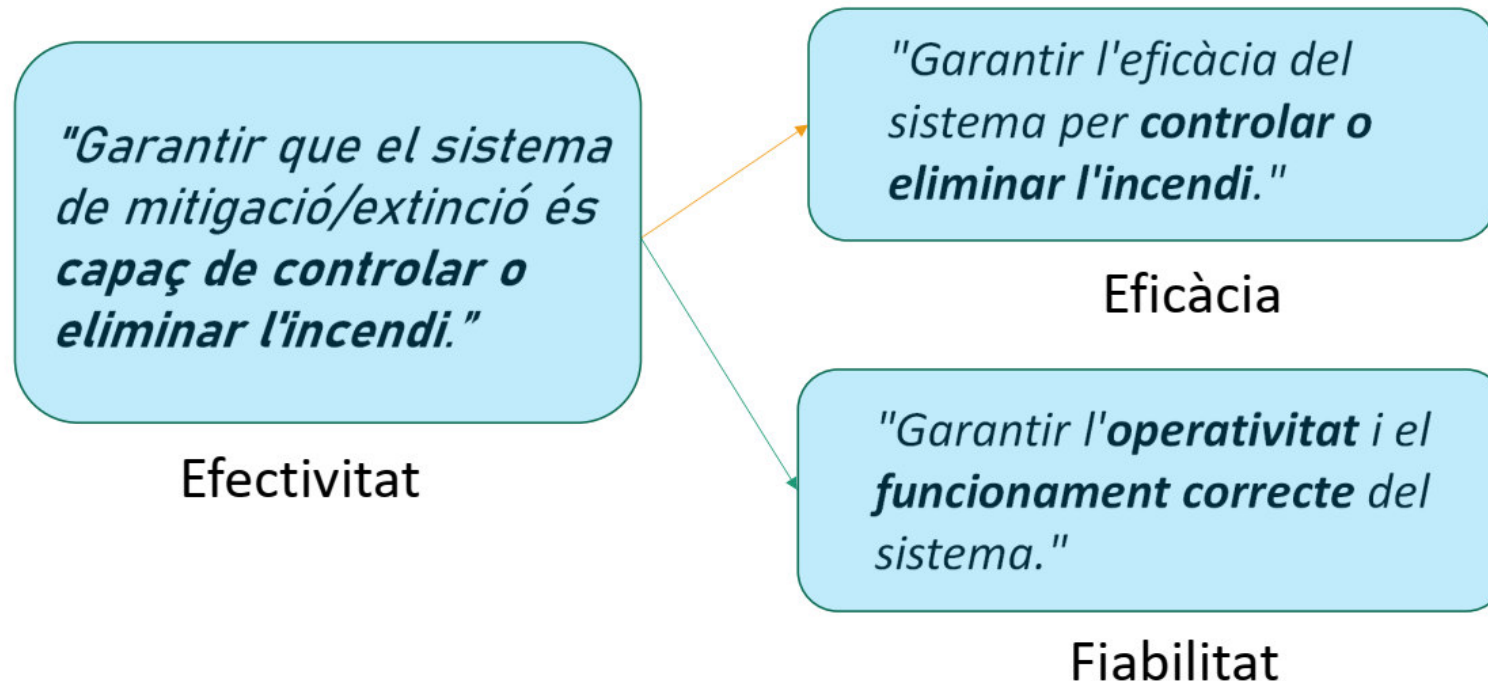
Protecció dels bens

- Reduir les fonts d'ignició.
- Limitar la càrrega de foc en illes d'emmagatzematge.
- Evitar el "flashover" (Combustió sobtada generalitzada).
- Limitar les temperatures en els elements estructurals.
- Detecció i extinció eficaç.

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

Exigències o requisits funcionals

En els sistemes de protecció activa i passiva l'objectiu comú és:



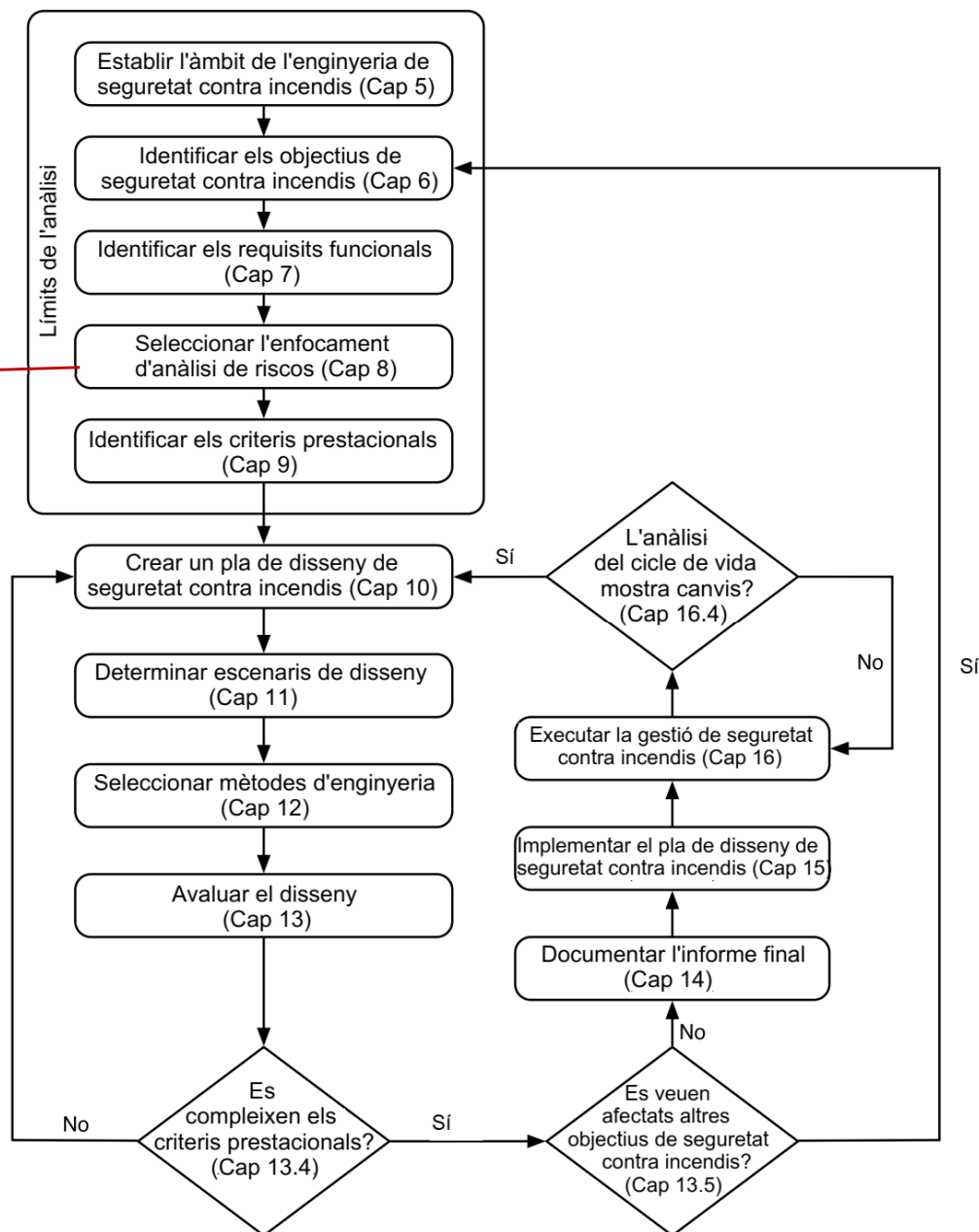
$$\text{Efectivitat} = \text{Eficàcia} \times \text{Fiabilitat}$$

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

Enfocament d'anàlisi de riscos

Es fa una comparació entre el risc estimat i el **risc tolerable** amb algun tipus de mesura de risc. El risc tolerable es pot enfocar de manera absoluta o de manera comparativa, però sempre s'hauria d'**indicar explícitament**.

El nivell més baix de **tractament de la incertesa** s'aconsegueix mitjançant l'**anàlisi qualitativa**. Un nivell intermedi mitjançant l'**anàlisi determinista**, en la qual s'avaluen un conjunt de pitjors escenaris creïbles, exposant el disseny a un repte greu, assumint una exposició pitjor que la mitjana. El nivell més alt s'aconsegueix mitjançant l'**anàlisi probabilística**, en la qual s'identifiquen i avaluen tota la gamma d'escenaris representatius.



METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

Enfocament d'anàlisi de riscos

Perill i Risc – Determinista o probabilístic

$$Risc = \sum Risc_i = \sum [f_i \cdot Conseqüències_i]$$

Cal triar l'enfocament determinista (perill) o probabilístic (risc) a l'inici del projecte

Probabilístic: Risc total < lllindar → Conseqüències ponderades
Determinista: escenaris on $P > P_{llindar}$ → Conseqüències < lllindar

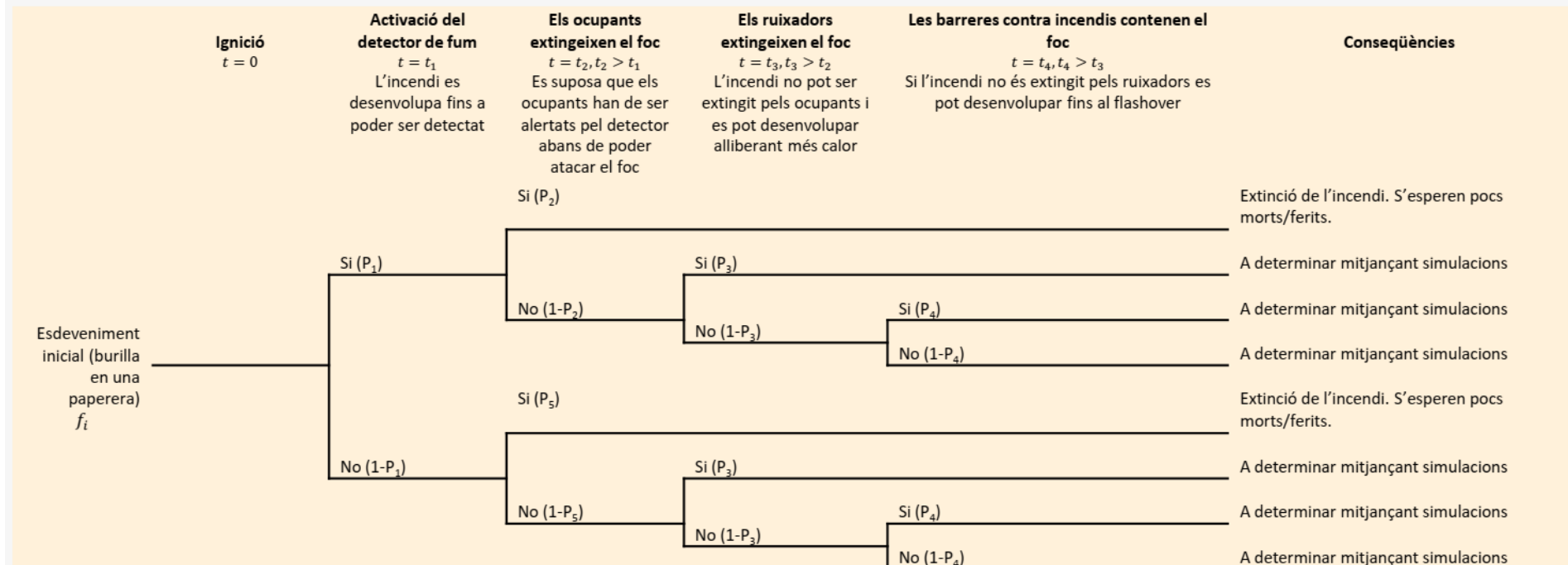
Generalment els PBD es basen en el perill, és a dir en un enfocament determinista, on es busca que els efectes o les conseqüències d'un determinat escenari no superin un lllindar prefixat.

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

Enfocament d'anàlisi de riscos

Perill i Risc – Determinista o probabilístic

$$Risc = \sum Risc_i = \sum [f_i \cdot Conseqüències_i]$$







METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

Enfocament d'anàlisi de riscos: ISO 16733-1 també per l'anàlisi determinista

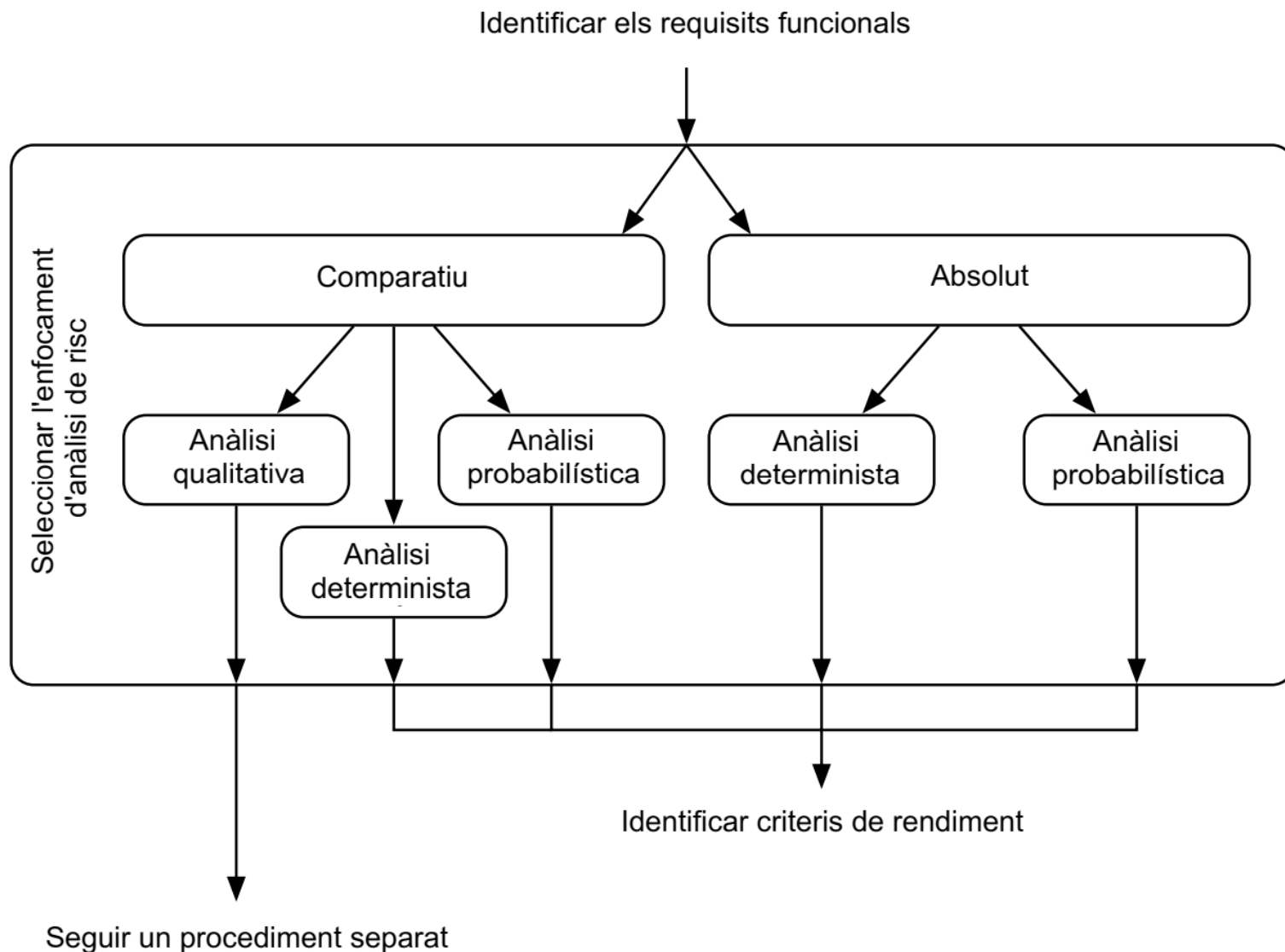
		Frecuencia			
		Más allá de extremadamente improbable	Extremadamente improbable	Improbable	Previsto
Consecuencias	Altas		Riesgo moderado	Riesgo alto	Riesgo alto
	Moderadas		Riesgo bajo	Riesgo moderado	Riesgo alto
	Bajas		Riesgo bajo	Riesgo bajo	Riesgo moderado
	Negligibles				

Leyenda

	Riesgo alto
	Riesgo moderado
	Riesgo bajo
	Riesgo negligibile

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

Enfocament d'anàlisi de riscos



METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

CTE / RSCIEI DEMANEN SEGURETAT EQUIVALENT

Què és seguretat equivalent? I equivalent a què?

El permís per utilitzar els PBDs és doncs en mode **COMPARATIU**:

- Anàlisi dels **objectius perseguits pel reglament** a cada prescripció.
- Anàlisi dels **objectius que s'han de perseguir en el projecte**, en funció de les prescripcions reglamentàries que no es poden complir.
- Anàlisi de la **seguretat aportada per les mesures alternatives** proposades a fi de determinar si aporten a l'establiment una seguretat equivalent a la que s'aconseguiria amb el compliment reglamentari.
- Anàlisi del projecte basat en prestacions per **comprovar que s'acredita el compliment dels objectius plantejats**.

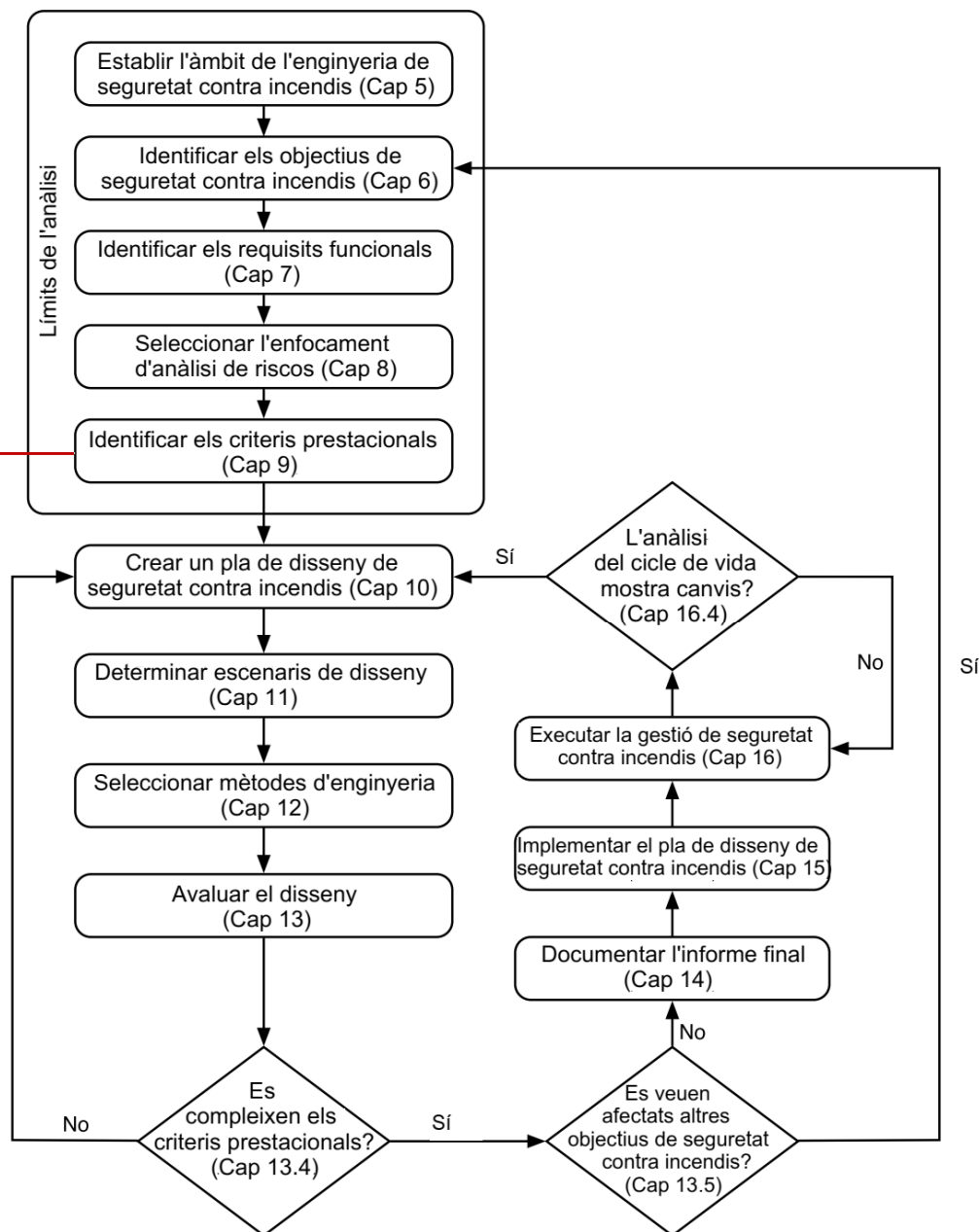
METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

Creris prestacionals

Els criteris de prestacions són **valors llindar** que, si s'excedeixen, indicaran que s'ha produït un dany inacceptable.

Poden incloure **temperatures** de materials, temperatura de gasos, **concentració** del fum o nivells d'**opacitat**, concentracions de carboxihemoglobina, **fluxos de calor radiant**, etc

Els criteris de prestacions s'han de **poder predir mitjançant eines d'enginyeria** com els models d'incendi.



METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

EXEMPLES DE CRITERIS D'ACCEPTACIÓ / ANÀLISI

Permeten comprovar el compliment dels objectius de seguretat.

Estan lligats als efectes de l'incendi sobre les persones i els materials:

- Visibilitat
- Toxicitat
- Temperatura
- Flux Tèrmic
- Deformacions
- Mode de col·lapse
- Control o Extinció del Foc

Fonts:

- Normes (ISO, EN, ...)
- SFPE Handbook
- Assajos

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

EXEMPLES DE CRITERIS D'ACCEPTACIÓ / ANÀLISI

B. CRITERIS D'ACCEPTACIÓ PROPOSATS

Criteri B.1	Per una alçada lliure de fums ≥ 2 m per sobre dels recorreguts d'evacuació i fora de la <i>zona d'incendi</i> (radi de 10 des de el perímetre de l'incendi) les condicions de supervivència dels ocupants mesurades a 1,8 m del terra no superaran els següents valors:
Criteri B.1.1	En el temps estimat d'evacuació, es garanteix una temperatura inferior a 60 °C, a 1,8 m d'alçada en els recorreguts d'evacuació dels ocupants.
Criteri B.1.2	En el temps estimat d'evacuació, es garanteix una concentració d'oxigen no inferior al 18%, a 1,8 m d'alçada en els recorreguts d'evacuació d'ocupants.
Criteri B.1.3	En el temps estimat d'evacuació es garanteix una dosi efectiva (DEF) monòxid de carboni (CO) inferior a 150 ppm, a 1,8 m d'alçada en els recorreguts d'evacuació dels ocupants.
Criteri B.1.4	En el temps estimat d'evacuació es garanteix una dosi efectiva (DEF) de diòxid de carboni (CO ₂) inferior a 0,03 mol/mol, a 1,8 m d'alçada en els recorreguts d'evacuació dels ocupants.
Criteri B.1.5	En el temps estimat d'evacuació, es garanteix una radiació tèrmica no superior a 2,5 kw/m ² , a 1,8 m d'alçada en els recorreguts d'evacuació dels ocupants.
Criteri B.1.6	En el temps estimat d'evacuació, es garanteix una visibilitat general superior a 20 m, a 1,8 m d'alçada dels recorreguts d'evacuació dels ocupants. I en cap cas de forma local els recorreguts superaran els 10 metres.
Criteri B.1.7	A les vies d'evacuació es mantindrà un nivell mínim d'il·luminació horitzontal en el paviment d'1 lux a l'eix central i 0,5 lux a la banda central que compregui com a mínim la meitat de l'amplada de la via.
Criteri B.1.8	La visualització de la senyalització dels recorreguts d'evacuació no serà inferior a 20 metres.

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

EXEMPLES DE CRITERIS D'ACCEPTACIÓ / ANÀLISI

Estabilitat estructural - seguretat de les persones / béns:

- Temps i mode de ruïna compatibles amb l'evacuació i la intervenció.
- Col·lapse cap a l'interior per no fer mal als bombers durant la intervenció.
- Deformació sense fer malbé compartimentació.
- Absència de col·lapse generalitzat.

Efectes de l'incendi a l'exterior de l'edifici:

- Col·lapse cap a l'interior de les estructures per evitar danys a establiments/edificis propers o envair parcel·les veïnes.
- Radiació controlada per evitar propagacions: distàncies de seguretat / pantalles.

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

OBJECTIUS / REQUISITS / CRITERIS PRESTACIONALS

Fita de la protecció contra incendis	Objectius de les parts interessades	Objectius del disseny	Criteris de prestacions
Minimitzar el nombre de persones ferides a causa de l'incendi i prevenir les morts injustificables	No hi poden haver morts fora de l'habitació o compartiment on s'ha originat l'incendi.	Prevenir el flashover en l'habitació o compartiment on s'ha iniciat el foc.	Temperatura a la capa de fums inferior a 200 °C. Nivell de COHb inferior al 12%. Visibilitat superior als 7 m.
Minimitzar els danys a l'edifici i el seu contingut	No hi poden haver danys tèrmics fora de l'habitació o compartiment on s'ha originat el foc	Minimitzar la probabilitat que el foc propagui més enllà de l'habitació o compartiment on s'ha originat.	Temperatura a la capa de fums inferior a 200 °C.
Minimitzar les aturades injustificables del servei i per tant dels beneficis del negoci a causa dels danys ocasionats per l'incendi.	El temps d'inactivitat del servei no pot superar les 8 h.	Limitar l'exposició al fum a menys del que suposaria un dany inacceptable.	HCl no pot superar els 5 ppm, les partícules no poden superar els 0,5 g/m ³ .
Limitar l'impacte ambiental del foc i de les mesures de protecció utilitzades en el medi.	Evitar la contaminació de l'aigua pels escolaments de l'aigua d'extinció	Proporcionar mitjans adequats per recollir l'aigua d'extinció.	Capacitat d'embassament com a mínim 1,2 vegades el volum de descàrrega de disseny.

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

Escenaris d'Incendis

Els escenaris d'incendi descriuen els tipus de focs pels quals el disseny que es prova ha d'oferir protecció.

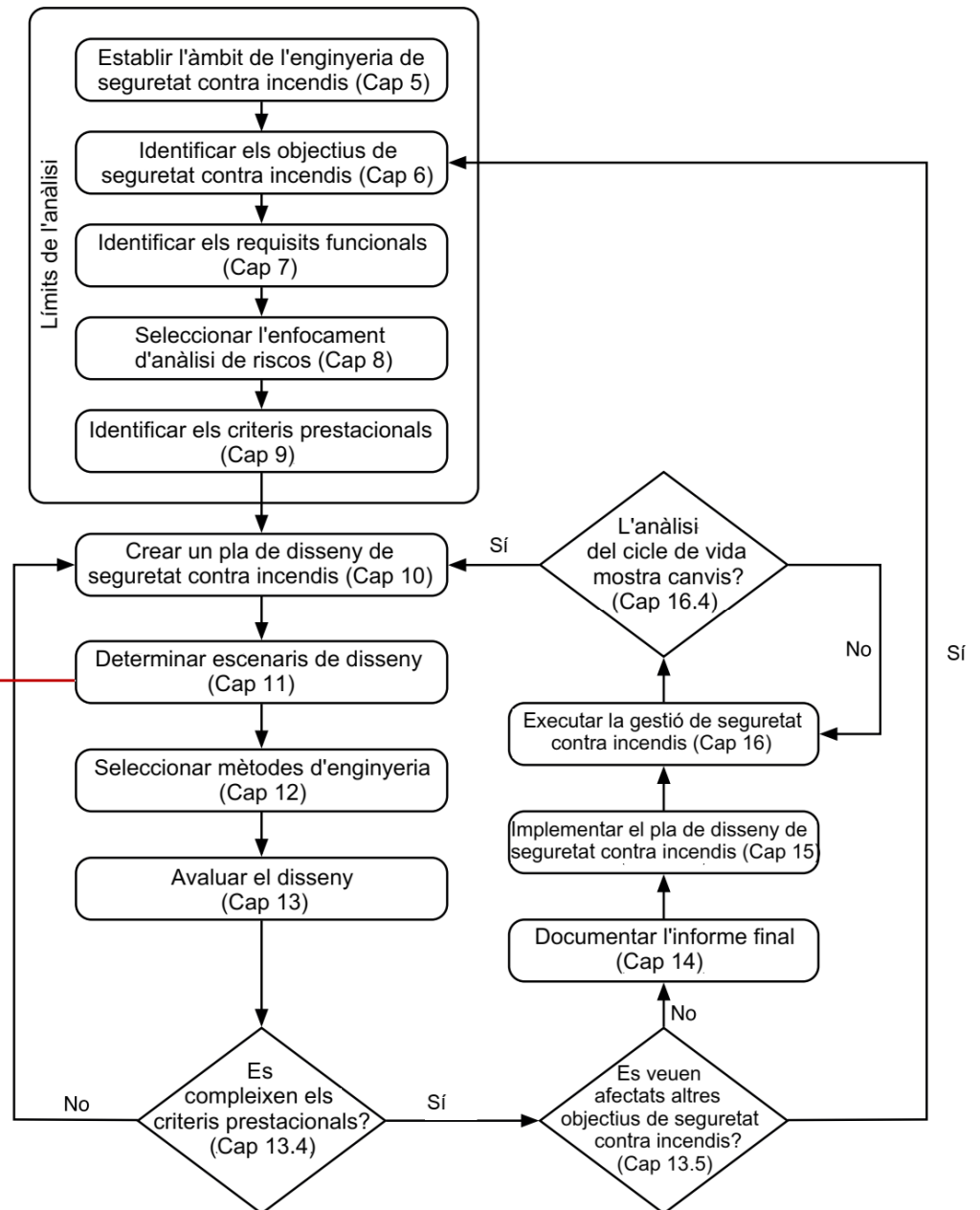
Un escenari d'incendi ha de contemplar

tres tipus de característiques:

- Característiques de l'edifici
- Característiques dels ocupants
- Característiques del foc.

La guia de la SFPE suggereix dos passos a l'hora de definir els escenaris d'incendi:

- 1) **Considerar tots** els escenaris d'incendi possibles que es poden produir
- 2) **Reduir aquesta** població d'escenaris en un conjunt més reduït i per tant manejable.



METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

ISO 16733-1 Desenvolupa el Capítol 11 de la ISO 23932-1

1. Identificar les posades a prova específiques de seguretat.
2. Ubicació de l'incendi.
3. Tipus d'incendi.
4. Perills que potencialment poden conduir a altres escenaris d'incendi.
5. Sistemes i característiques amb impacte a l'incendi.
6. Accions dels ocupants amb impacte a l'incendi.
7. Selecció d'escenaris d'incendi de disseny.
8. Modificar la selecció d'escenari sobre la base de la disponibilitat i fiabilitat del sistema.
9. Selecció final i documentació.

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

CARACTERÍSTIQUES DE L'EDIFICI

- Característiques **arquitectòniques** tals com la geometria dels compartiments, els acabats interiors, els materials de construcció utilitzats i les obertures existents.
- Característiques dels **components estructurals** incloent les proteccions que puguin portar.
- La **càrrega de foc**. Estimació en funció del tipus d'ocupació i previsió de variabilitat de la mateixa amb el temps.
- Components d'**evacuació**, incloent localització i capacitat de les rutes d'evacuació.
- Sistemes de **protecció contra incendis**.
- Serveis de l'edifici tals com els **equips de ventilació**.
- Característiques operacionals de l'edifici incloent els **horaris d'ocupació** diari i setmanal.
- Característiques de la resposta a la lluita contra incendis incloent localització, capacitat i **temps de resposta dels bombers**, accessibilitat, etc.
- Característiques **ambientals**, incloent rang de temperatures i humitats interiors i exteriors, condicions de vent (que creen diferències de pressions i efecte xemeneia) i nivells sonors (que poden afectar nivell d'audició de l'alarma).

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

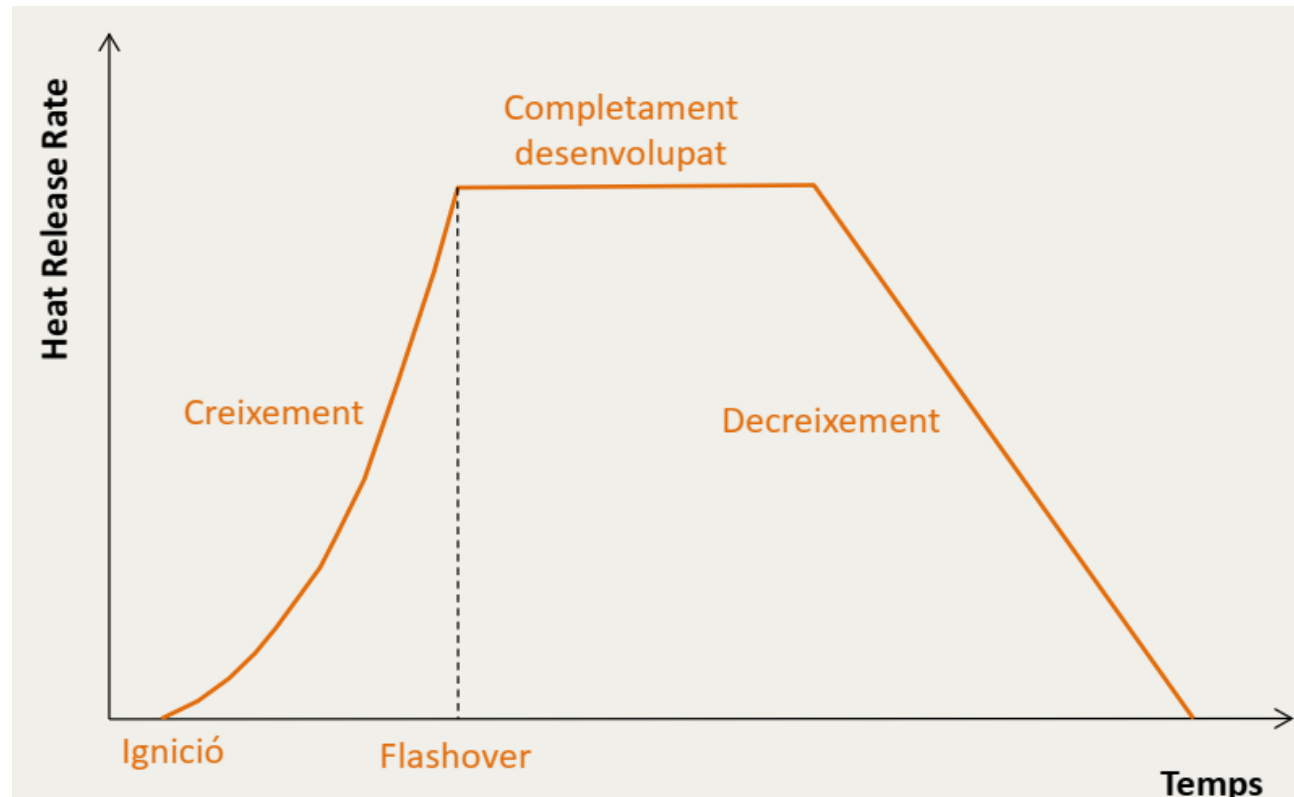
CARACTERÍSTIQUES DELS OCUPANTS

- Població (**nombre i densitat**)
- **Sola o amb altres**
- **Familiaritat amb l'edifici**
- **Distribució i activitats**
- **Nivell d'alerta**
- **Capacitat física i cognitiva**
- **Afiliació social**, afecta com l'individu reacciona sol o com a membre d'un grup.
- **Rol i responsabilitat**, que determinarà que l'ocupant lideri o segueixi els altres.
- **Localització**
- **Compromís de l'ocupant** amb la tasca que fa just abans de l'alarma.
- **Punt focal**, on l'ocupant estarà prestant atenció.
- **Condició de l'ocupant**, física i psicològica que pot anar variant al llarg de l'emergència per exposició al fum i l'estrès.

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

CARACTERÍSTIQUES DE L'INCENDI

- Les característiques de l'incendi es quantifiquen a partir del que s'anomenen **corbes d'incendi**, que proporcionen l'evolució de la mida de l'incendi en funció del temps. Generalment la mida de l'incendi es mesura **en termes de potència calorífica** (Heat Release Rate).



METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

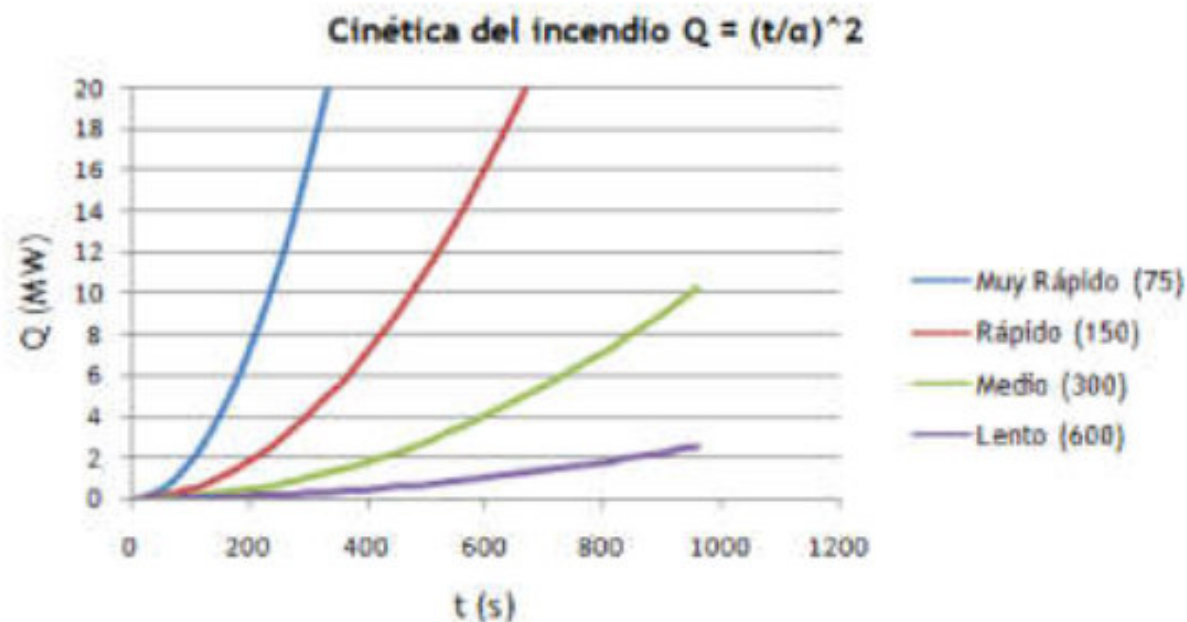
CARACTERÍSTIQUES DE L'INCENDI

Fonts d'ignició i iniciació

Ubicació (fixe o en desplaçament)

Cinètica de creixement

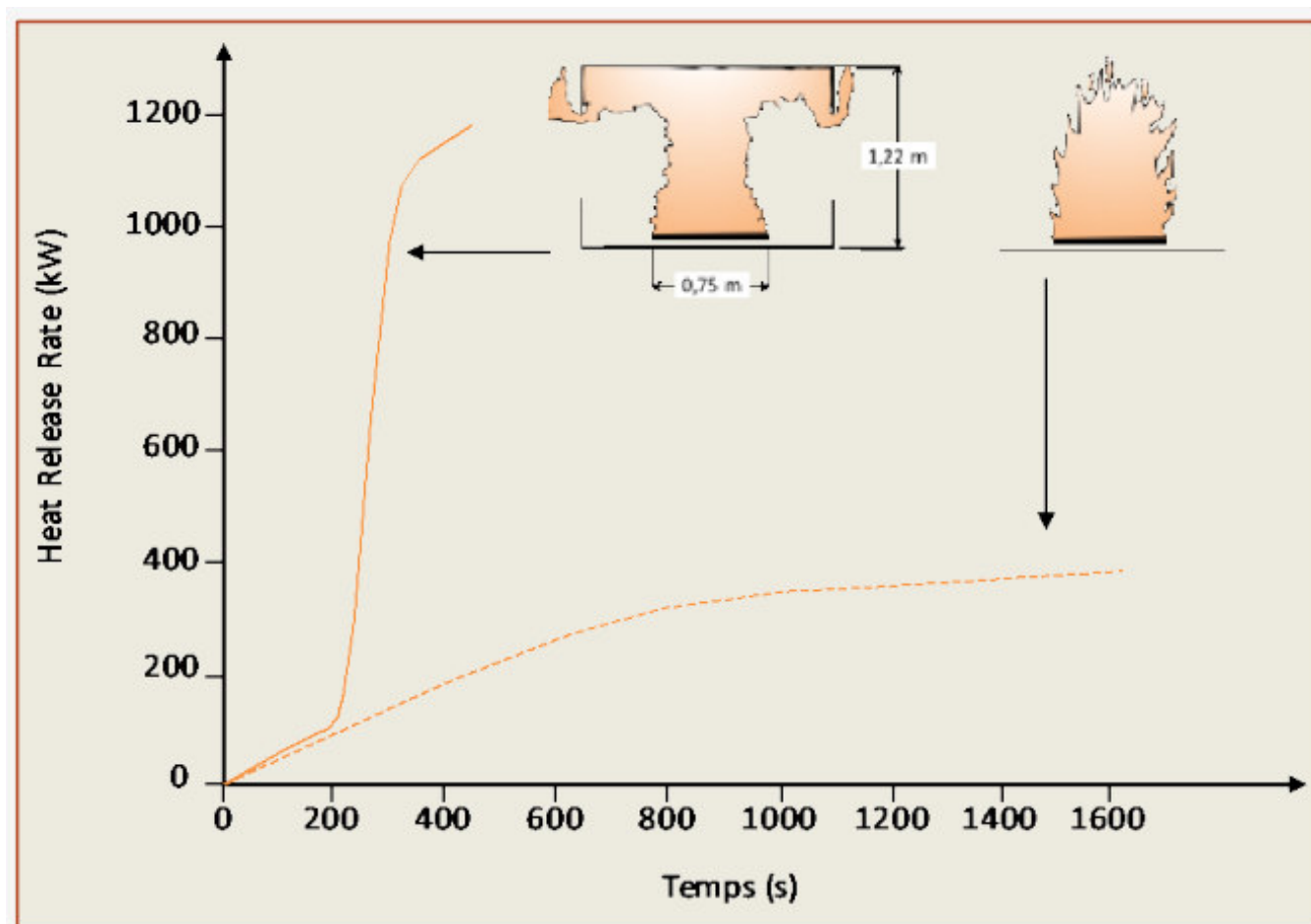
Propagació



METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

CARACTERÍSTIQUES DE L'INCENDI

Efectes del contorn



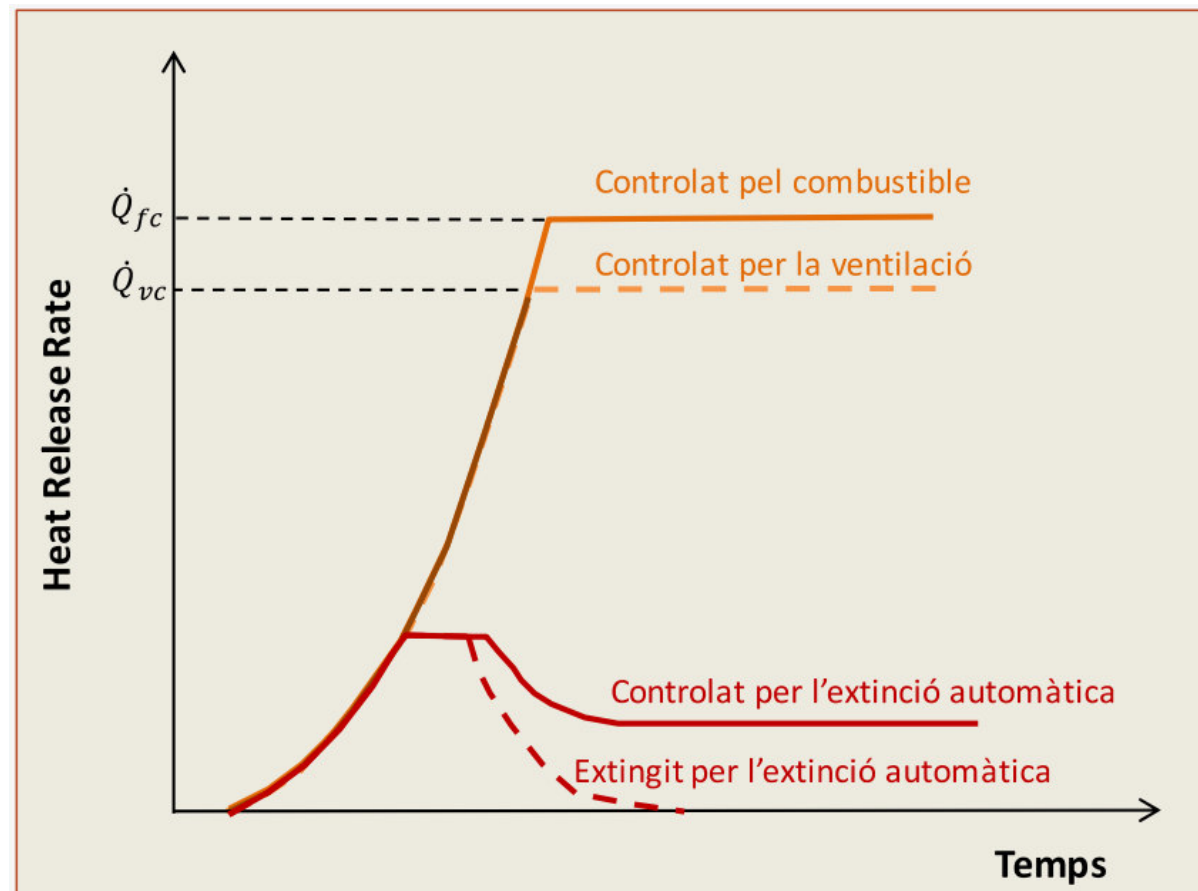
Efecte del compartiment sobre la calor alliberada (placa de PMMA de 0,75x0,75 m)
(Font: Drysdale, D. An Introduction to Fire Dynamics, 3rd. Ed, John Wiley, NY, 2011).

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

CARACTERÍSTIQUES DE L'INCENDI

Estabilització de la corba del foc

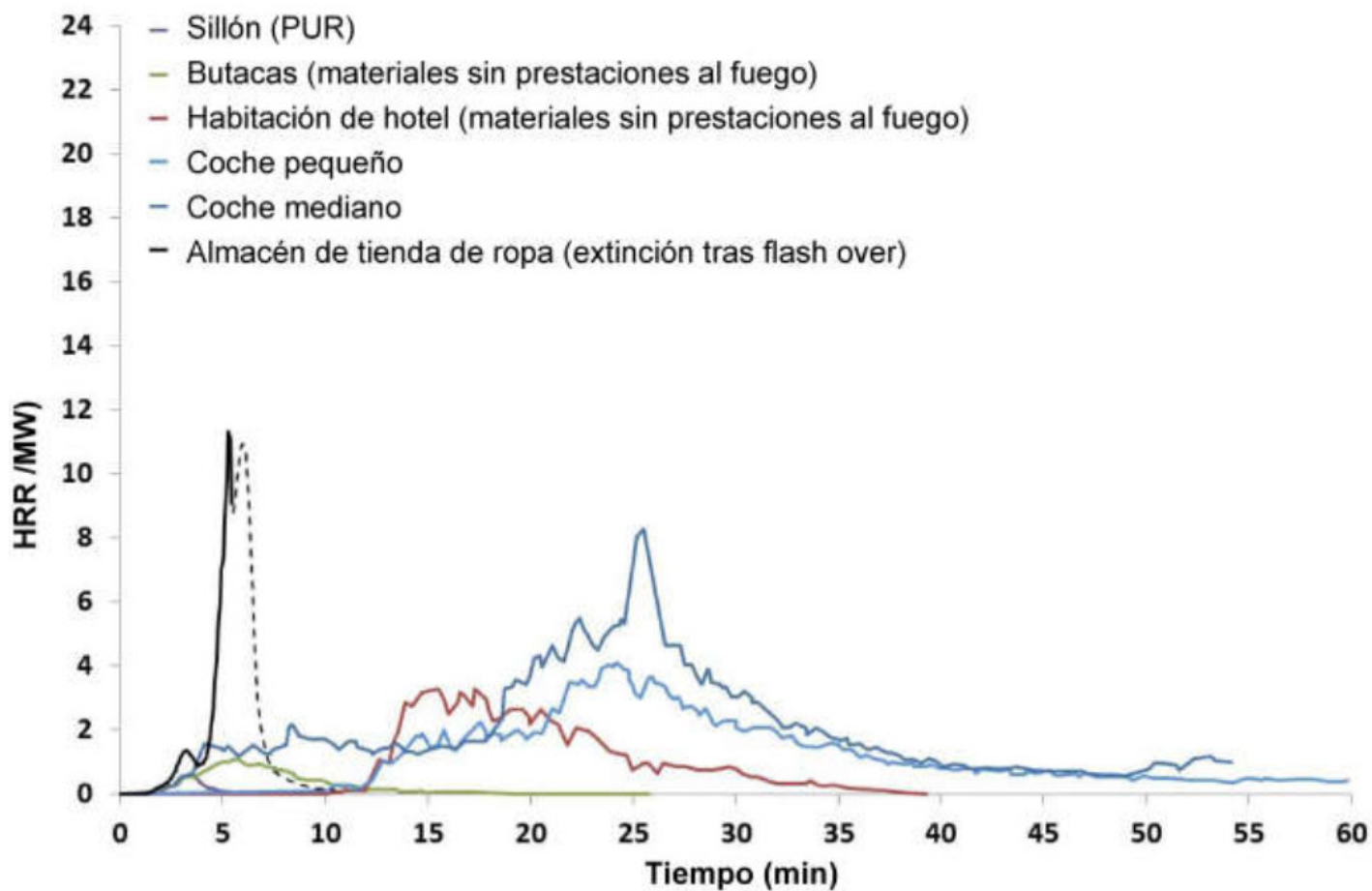
La fase de **decreixement** pot produir-se per l'extinció o l'esgotament del combustible



METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

CARACTERÍSTIQUES DE L'INCENDI

Assajos de foc reals



METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

DEFINICIÓ D'ESCENARIS D'INCENDI

Definits a partir de **l'anàlisi de riscos** de l'edifici i **dades dels incendis reals** i dels **assaigs**:

- **Identificació** dels materials i productes que podrien alimentar un incendi.
- **Dades estadístiques**.
- **Anàlisi** del comportament dels materials i productes de construcció

Haurien de ser congruents amb cadascun dels objectius de seguretat a verificar.

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

EXEMPLES D'UN ESCENARI D'INCENDI

Característiques de l'incendi:

Incendi d'un líquid inflamable situat a l'entrada principal de l'edifici. La ignició és provocada. Creixement ràpid amb ignició dels combustibles de l'entorn.

Característiques de l'edifici:

- a. Propietats arquitectòniques. Llarg atri central, acabats interiors no combustibles o de combustibilitat limitada.
- b. Càrrega de foc. Ocupació típica d'una oficina.
- c. Components estructurals. Bigues i columnes de formigó.
- d. Sistemes de protecció contra incendi. Com a projecte d'edifici no compta encara amb cap sistema d'extinció.
- e. Serveis de l'edifici. Sistema forçat d'aire condicionat i calefacció. No disposa de finestres practicables.
- f. Característiques operacionals. Edifici ocupat les 24h del dia.
- g. Resposta dels bombers. Parc de bombers voluntaris a 5 km.
- h. Factors ambientals. Edifici a Barcelona.

Característiques dels ocupants:

- a. L'edifici es troba a la capacitat màxima d'ocupació.
- b. Els ocupants estan desperts i en alerta

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

EXEMPLES D'ESCENARIS D'INCENDI

Escenaris proposats a la NFPA 101 i 5000

1. Escenari d'incendi típic per a ocupacions específiques
2. Incendi de desenvolupament ultra ràpid a la via principal d'evacuació
3. Incendi en una habitació no ocupada al costat d'un espai d'alta ocupació
4. Foc en espai ocult al costat d'una habitació d'alta ocupació
5. Incendi ocult de desenvolupament lent al costat d'un espai d'alta ocupació
6. L'incendi més sever associat amb la càrrega de foc màxima
7. Incendi a l'exterior de l'edifici
8. Incendi ordinari en habitació on no funcionen els sistemes de protecció activa i passiva

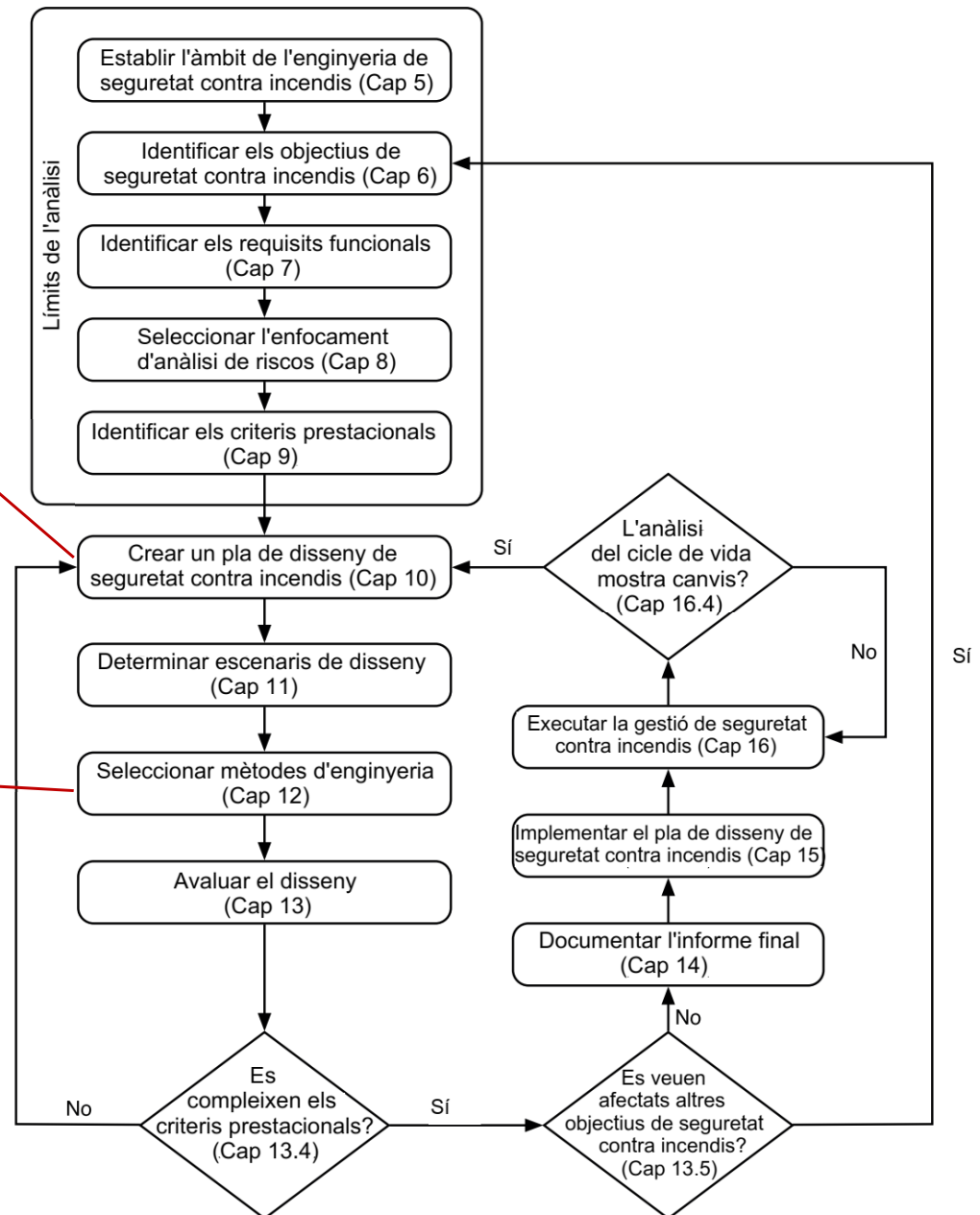
METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

ESTRATÈGIA / PLA DE DISSENY MÈTODES

Els dissenys de prova són **estratègies de protecció contra incendis** pensats per assolir les fites i objectius del projecte. Per tal de ser acceptables caldrà que compleixin cadascun dels criteris de prestacions definits quan es sotmetin a tots els escenaris d'incendi.

Mètodes de enginyeria per avaluar:

- Inici i desenvolupament de l'incendi.
- Control de la propagació i gestió dels fums.
- Detecció de l'incendi i alarma.
- Extinció de l'incendi.
- Comportament i evacuació dels ocupants.
- Protecció passiva davant el foc.



METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

MÈTODES D'ENGINYERIA – Eines de càlcul

- **Desenvolupament de l'incendi:** Condicions ambientals produïdes per l'incendi (temperatures, nivells de radiació tèrmica, concentració de gasos).
- **Evacuació de persones.**
- **Anàlisi termomecànic de l'estructura.**

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

MÈTODES D'ENGINYERIA – Eines de càlcul


FDS-SMV

Fire Dynamics Simulator (FDS) and Smokeview (SMV)

Fire Dynamics Simulator (FDS) is a large-eddy simulation (LES) code for low-speed flows, with an emphasis on smoke and heat transport from fires.

Smokeview (SMV) is a visualization program used to display the output of FDS and **CFAST** simulations.

- Download
- Documentation
- Discussion Forum
- Issue Tracker
- Wiki Pages



*Smokeview image:
University of Maryland Line Burner*

- Ús expert del programari
- V&V del software
- Entitat independent Especialitzada
- Importants requeriments computacionals per simular grans superfícies (FDS).

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

MÈTODES D'ENGINYERIA – Eines de càlcul

- Les **eines més sofisticades no sempre són la millor solució** per a una aplicació concreta que els mètodes simples.
- Si un **mètode senzill** mostra clarament que un criteri de prestacions s'assoleix o no s'assoleix, aleshores aquest mètode **és suficient**.
- Els mètodes més sofisticats requereixen més temps i esforç per executar-los que els més senzills.
- Sovint utilitzar **diversos models i càlculs en un mateix escenari** i comparar els resultats és beneficiós per a l'avaluació i afegeix confiança a l'anàlisi.

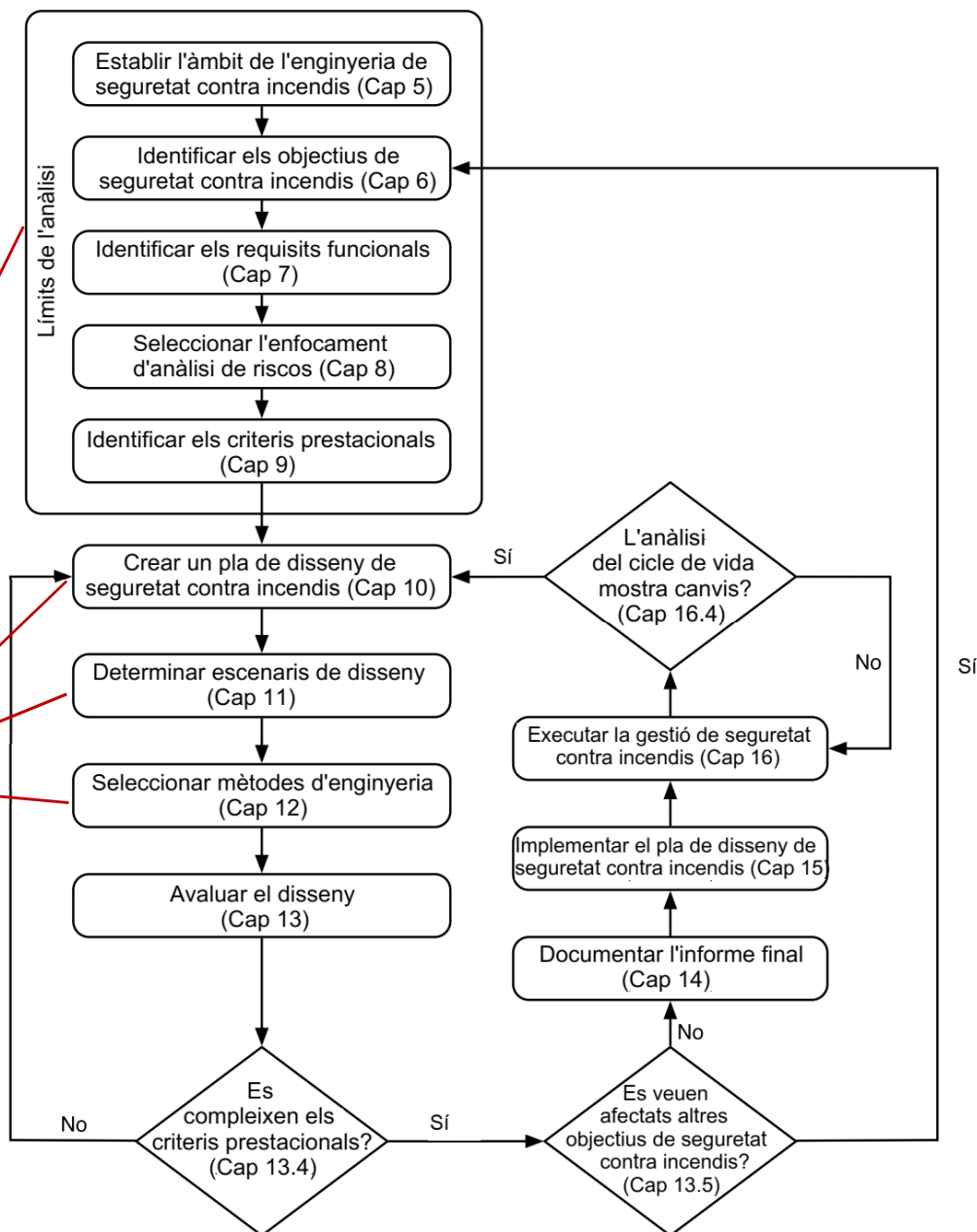
METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

RESUM DE DISSENY

Abans de continuar amb la part quantitativa del procés, **cal que totes les parts es posin d'acord**.

El resum del disseny és un document que hauria de contenir l'abast del projecte, les fites i objectius a assolir, els criteris de prestacions que es volen, el conjunt d'escenaris d'incendi a considerar i les estratègies de disseny que es consideraran a l'hora de definir el disseny de prova.

La forma amb què es dugui a terme l'acord entre les parts implicades és flexible. Pot ser un simple **acord verbal**, posar-se en forma d'**acta d'una reunió** o bé redactat en **un document més formal** per a la seva revisió i aprovació si es creu necessari.



METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

AVALUAR EL DISSENY DE PROVA

Quantificació dels escenaris d'incendi:

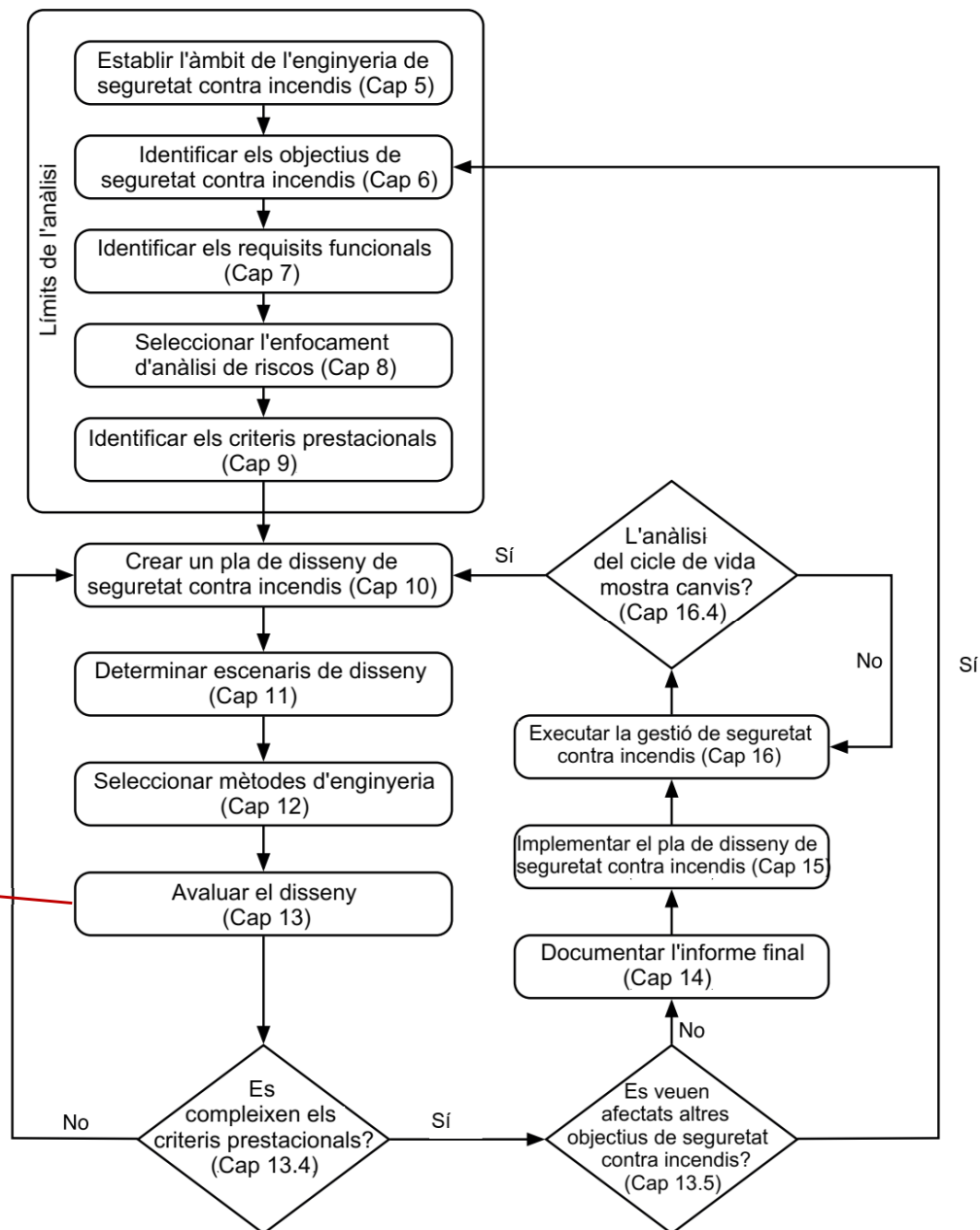
- Característiques de l'edifici
- Característiques dels ocupants
- Característiques de l'incendi

Avaluació del disseny de prova:

Pretén determinar **si el disseny compleix tots els criteris de prestacions en cada un dels escenaris d'incendi definits**. Per fer l'avaluació caldrà utilitzar models d'incendis que hauran de proporcionar la informació necessària per decidir si s'assoleix el nivell o criteri de prestacions definit.

Nivells d'avaluació:

- Subsistema
- Sistema
- Edifici sencer



METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

INFORME FINAL

La documentació té tres finalitats principals:

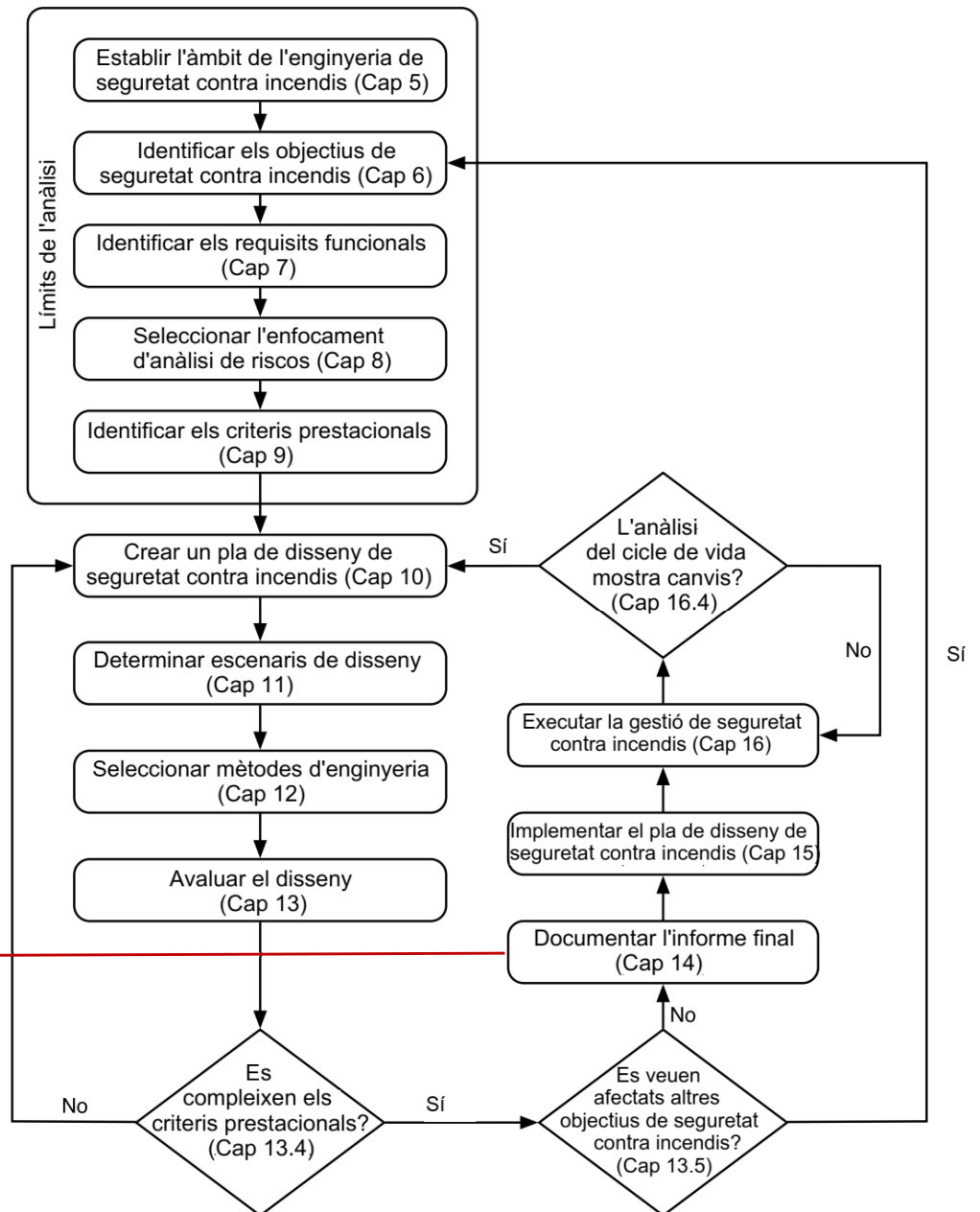
(1) **Presentar el disseny** i l'anàlisi que s'ha fet per arribar-hi, de manera que pugui ser revisat i comprès per les parts implicades, especialment els ens reguladors que hauran d'aprovar el projecte.

(2) **Comunicar el disseny** a les empreses encarregades d'implementar-lo.

(3) **Servir de referència** per si en un futur es modifica o cal fer una anàlisi forense si es produeix un incendi.

Inclou:

- Resum del disseny de la protecció contra incendis
- Informe detallat del disseny basat en prestacions
- Plànols i especificacions, manuals d'operació i manteniment.



METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

CONCLUSIONS / DOCUMENTACIÓ

Informació completa de totes les fases del procés de justificació: hipòtesis, càlculs, resultats, anàlisis i conclusions.

El projecte haurà de recollir les **limitacions de la validesa** de l'estudi i les **recomanacions que se'n derivin**, incloent-hi, per exemple:

- Limitacions al desenvolupament de l'activitat'.
- Limitacions d'aforament.
- Automatització de forats per aportació d'aire.
- Sistemes de videovigilància i control.
- Manteniments específics, serveis 24h / 365 dies.
- Increment de la freqüència de les revisions.
- Simulacres anuals.
- Formació específica del personal per casos de sinistre d'incendi.
- ...

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

PROJECTE PRESTACIONAL

Què ha d'incloure el projecte?

- Definició del projecte.
 - Indicar els apartats reglamentaris que no es compleixen.
 - Indicar les mesures de protecció alternatives proposades.
- Identificació d'objectius.
- Definició de requisits funcionals (exigències) per complir objectius.
- Desenvolupament de criteris de prestació (criteris d'eficàcia).
- Disseny d'escenaris d'incendi.
- Desenvolupament i avaluació dels escenaris de prova.
- Conclusió i selecció del disseny final.

CERTIFICATS PBD

- Certificar que la instal·lació dissenyada aporta una seguretat igual o superior a la que s'aconseguiria amb el compliment del reglament.

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

REVISIÓ PER TERCERA PART

- Atès que no es pot regular la solució prestacional, s'estableix un procediment de control d'aquests projectes basat en la revisió per parells.
- La revisió per parells és l'avaluació de la consistència conceptual i tècnica d'un disseny per individus qualificats, per jutjar la validesa d'un disseny o per avaluar la possibilitat d'un disseny d'assolir els objectius pretesos.
- Pràctica comuna a l'àmbit de l'enginyeria.
- Motivat per diferents raons i en diferents fases del projecte
- Perquè sigui efectiva → procés en paral·lel amb el disseny
- Transparència, honestedat i claredat.

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

REVISIÓ PER TERCERA PART

La revisió per tercera part hauria de poder avaluar el projecte prestacional en conjunt i no només les conclusions d'una simulació.

Una “entitat experta” en disseny prestacional hauria de comptar amb un equip d'enginyers experimentats a les diferents disciplines de la seguretat contra incendis:

- Física i química de l'incendi
- Anàlisi del risc d'incendi
- Reacció al foc dels materials i resistència al foc de sistemes constructius
- Protecció activa
- Eines de simulació de l'incendi i càlcul estructural avançat
- Comportament humà en situació d'emergència
- Condicions d'intervenció
- ...

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

REVISIÓ PER TERCERA PART

La reglamentació espanyola no inclou requisits clars de revisió dels projectes prestacionals per una tercera part independent.

Tampoc estableix les condicions que ha de complir aquesta entitat per assegurar-se que disposa del coneixement necessari per fer la revisió adequadament.

La versió 2 de la Guia Tècnica d'Aplicació de l'RSCIEI (feb 2019) ho considera convenient i és habitual des de llavors en projectes d'establiments industrials.

L'enginyeria de seguretat contra incendis és una disciplina complexa i relativament nova a Espanya. L'ús inadequat de les eines prestacionals implicarà la implantació d'estratègies de protecció no adaptades als riscos de l'incendi de l'edifici.

La participació d'una tercera part “amb el coneixement adequat” ajudarà al bon desenvolupament dels projectes prestacionals. Però com establir qui ho pot fer?

METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL

REVISIÓ DE LA IMPLANTACIÓ DEL PROJECTE PRESTACIONAL

En fer la inspecció d'un establiment prestacional serà important comprovar que es mantenen les condicions de validesa, limitacions i recomanacions dels estudis realitzats, a particular:

- **Descripció de l'establiment i de la seva activitat:** + Tipus i disposició de combustibles + Ocupació màxima + Distàncies màximes d'evacuació i mitjans d'evacuació disponibles + Temps d'evacuació (detecció, alarma, reacció, moviment, desplaçament i sortida)
- **Sistemes de protecció contra incendis:** + Sistemes de protecció passiva + Condicions d'activació + Interacció entre sistemes: detecció, alarma, extinció automàtica, sistemes de control de fum, tancament d'elements compartimentadors + Condicions de disseny, instal·lació i manteniment
- **Condicions de formació i gestió de l'emergència**

DISSENY PRESTACIONAL. ASSUMPTES A TENIR EN COMPTE

- **NO hem de confondre l'objectiu amb la l'eina.**

Tendeix a identificar-se un disseny basat en prestacions amb simulació computacional d'incendi. La simulació només és una eina o calculadora avançada per verificar quines condicions tenen lloc durant el desenvolupament d'un incendi.

- **NO ÉS un xec en blanc**

Ha de garantir-se una seguretat equivalent.

- **Un projecte PBD acompanyat d'un model informàtic NO garanteix un bon disseny.**

Si el programador no disposa dels coneixements d'enginyeria de PCI necessaris, o no coneix com introduir-los correctament al programari, el resultat pot ser atractiu en aparença, però tècnicament desastrós.

DISSENY PRESTACIONAL. ASSUMPTES A TENIR EN COMPTE

- És una disciplina **COMPLEXA**

Requereix un coneixement profund de conceptes d'enginyeria de PCI, com ara la **química del foc**, coneixement dels **materials involucrats**, **mecànica de fluids** associada al moviment de fums i gasos, funcionament de **sistemes d'alarma i extinció**, comportament de les persones en cas d'**evacuació**, etc., així com experiència per determinar, per exemple, quins tipus d'incendi o **escenaris són probables** i quins no.

Pot requerir un **equip multidisciplinari** per portar-lo a bon terme.

També requereix un coneixement **especialitzat** per part dels verificadors **de l'administració** i **altres agents** que poguessin intervenir en la revisió.

GRÀCIES PER LA SEVA ATENCIÓ

28/11/2024

F. Xavier Querol Esparch
Director Tècnic



Gerència de Serveis d'Habitatge, Urbanisme i Activitats
Oficina d'Activitats Regulades i Programes en Protecció Civil

Tel. 934049312

Correu electrònic. o.activitats@diba.cat

<https://www.diba.cat/web/hua>

Disseny Prestacional

Modelació de l'Incendi

28/11/2024

F. Xavier Querol Esparch
Director Tècnic

pefipresa
MINIMAX GmbH GROUP



Diputació
Barcelona

MODELACIÓ

DEFINICIÓ DE MODEL

- ❑ **Model:** Representació conceptual a escala, mitjançant eines físiques i/o matemàtiques d'un procés o sistema (fenomen) real complicat, per tal de intentar descriure'l, analitzar-ne la naturalesa, **desenvolupar o comprovar hipòtesis o supòsits** i permetre **una millor comprensió del fenomen real** al qual representa.
- ❑ **No hi ha una eina perfecta**, els models són **una representació parcial de la realitat i una simplificació de fenòmens molt complexos**.
- ❑ L'atribut més important dels **Models d'Incendis** ha de ser la seva **capacitat per predir, de manera rigorosa i realista, el comportament de l'incendi dins uns límits preestablerts**.

MODELACIÓ

DEFINICIÓ DE SIMULACIÓ

- ❑ **Simulació:** Experimentació amb un model, d'una hipòtesi o un conjunt d'hipòtesis de treball.
- ❑ A les **simulacions computacionals** predominen les **dinàmiques** sobre les estàtiques ja que usualment es requereix experimentar **situacions canviants en el temps**.
- ❑ Els sistemes complexos reals es veuen influenciats per **fenòmens aleatoris** (esdeveniments, variables i funcions). Per això el seu comportament és essencialment **estocàstic**.
- ❑ Les **simulacions deterministes** són més senzilles i requereixen molt menor potència i/o temps computacional.
- ❑ **Atenció:**
 - Els resultats de les simulacions són tan bons com ho siguin les dades de entrada, les assumpcions de base i el respecte a les limitacions del model.

MODELACIÓ

UTILITAT DE LES SIMULACIONS D'INCENDI

☐ Com a eina d'anàlisi:

- Per **predir les conseqüències** d'un incendi en un escenari concret existent.
- Per **avaluar** les causes, l'evolució, les actuacions o les conseqüències d'un **incendi ocorregut** en un escenari real.

☐ Com a eina de disseny:

- Per **estudiar l'efectivitat** de cert grup elegit **de mesures** encaminades a evitar un incendi o **minimitzar-ne** les conseqüències en un escenari projectat.

MODELACIÓ

APLICACIONS DELS MODELS D'INCENDI

Objectiu Camp d'aplicació	Resistència al foc de les estructures	Seguretat personal: Evacuació, Intervenció	Propagació i Extinció del foc
Avaluació de seguretat contra incendis en edificis	<ul style="list-style-type: none">- Incendis localitzats- Focs de compartiments- Focs que es desplaçen- Models de zones- Models de camp	<ul style="list-style-type: none">- Models de zones- Models de camp	Avaluacions específiques (pot incloure diferents models)
Investigació d'incendis			
Recerca d'incendis (combustió, propagació, etc.)	Normalment models de camp		

MODELACIÓ

VALIDACIÓ DEL MODEL I LES SIMULACIONS

- Tot model de simulació computacional (d'incendis, d'evacuació, de resistència estructural) ha d'estar validat i verificat per al tipus d'escenari previst.
- ✓ **Validació:** El procés de determinar el grau en què un mètode de càlcul és una representació precisa del món real des de la perspectiva dels usos previstos del mètode de càlcul.
- ❖ La validació és una **comprovació de la física**.
- ❖ Si les **prediccions del model coincideixen molt amb els resultats dels experiments, utilitzant qualsevol mètrica adequada, la majoria suposa que el model descriu adequadament, mitjançant les seves equacions matemàtiques, el que està passant. També s'assumeix que la solució d'aquestes equacions ha de ser correcta.**

MODELACIÓ

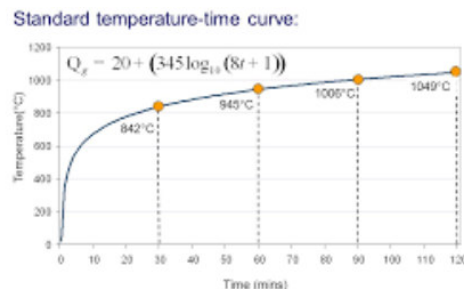
VALIDACIÓ DEL MODEL I LES SIMULACIONS

- Tot model de simulació computacional (d'incendis, d'evacuació, de resistència estructural) ha d'estar validat i verificat per al tipus d'escenari previst.
- ✓ **Verificació:** procés per determinar que la implementació d'un mètode de càlcul representa amb precisió la descripció conceptual del desenvolupador del mètode de càlcul i la solució del mètode de càlcul.
- ❖ La verificació és una **comprovació de les matemàtiques. Una detecció i limitació dels errors:** codi de programació, comparació amb solucions analítiques, sensibilitat de les variables (convergència / divergència, precisió, interrelació, canvis, extrems).
- ❖ Poques vegades el model i les mesures coincideixen tan bé **en totes les aplicacions que qualsevol, sens dubte, acceptaria els resultats.** Com que inevitablement hi ha diferències entre model i experiment, hem de saber si aquestes diferències es deuen a limitacions o errors en la solució numèrica, o submodels físics, o tots dos.

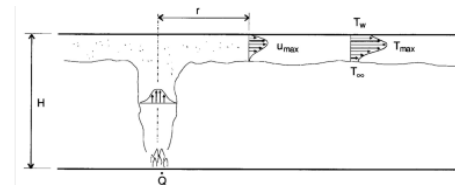
MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS D'INCENDI

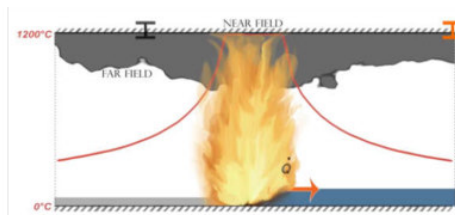
✓ Focs nominals



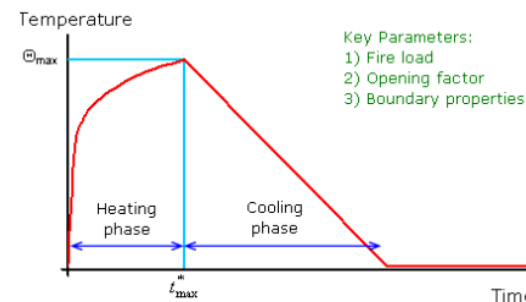
✓ Focs localitzats



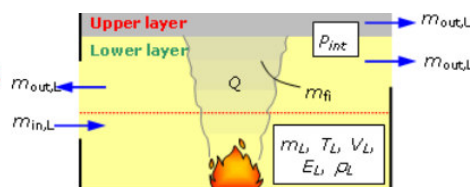
✓ Focs que es desplaçen



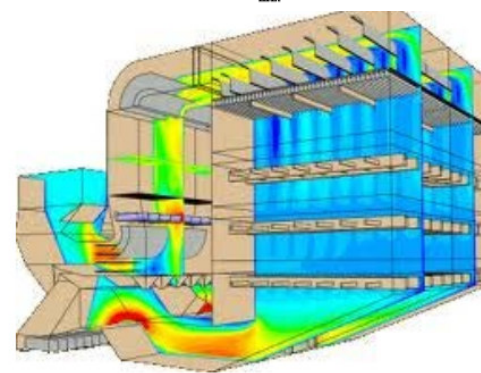
✓ Focs en compartiments



✓ Models de zones



✓ Models de camp (CFD)



Increasing complexity

MODELACIÓ DE L'INCENDI

- **MODELS SIMPLIFICATS (CÀLCULS A MÀ).**
 - Models molt simplificats físicament i matemàticament.
 - Càlculs ràpids i sense necessitat d'un ordinador.
 - Útils per a primeres aproximacions i comprovacions orientatives del resultat dels models més complexos.

- ✓ Longitud de flama
- ✓ Arrossegament
- ✓ Temperatura plomall
- ✓ Propagació de flama
- ✓ Alçada de la capa de fums
- ✓ Activació Ruixadors

MODELACIÓ DE L'INCENDI

CÀLCULS SIMPLIFICATS – POTÈNCIA CALORÍFICA

$$\dot{Q}(t) = A_f(t) \cdot \dot{m}''(t) \cdot \Delta H_{effective}$$

$$\chi = \frac{\Delta H_{effective}}{\Delta H_{chemical}}$$

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} \left(1 - e^{-k\beta D}\right)$$

Material (values in brackets indicate pool diameters tested) \dot{m}'' (kg/m²s) ΔH_c (MJ/kg)

Aliphatic Carbon–Hydrogen Atoms

Polyethylene 0.026 43.6

Polypropylene 0.024 43.4

Material Density (kg/m³) \dot{m}''_{∞} (kg/m²s) ΔH_c (MJ/kg) $k\beta$ (m⁻¹)

Petroleum products

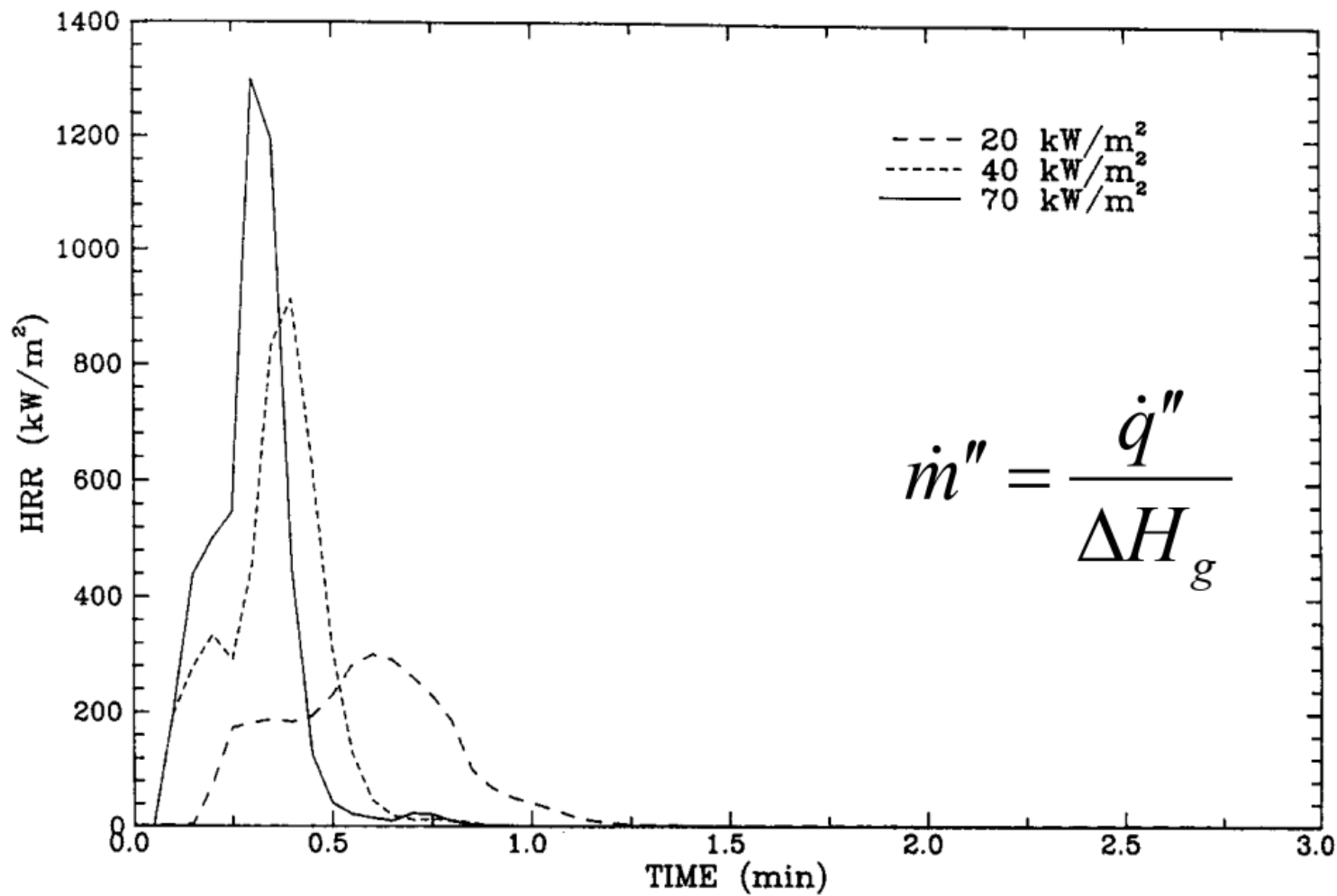
Benzine 740 0.048 44.7 3.6

Gasoline 740 0.055 43.7 2.1

Kerosine 820 0.039 43.2 3.5

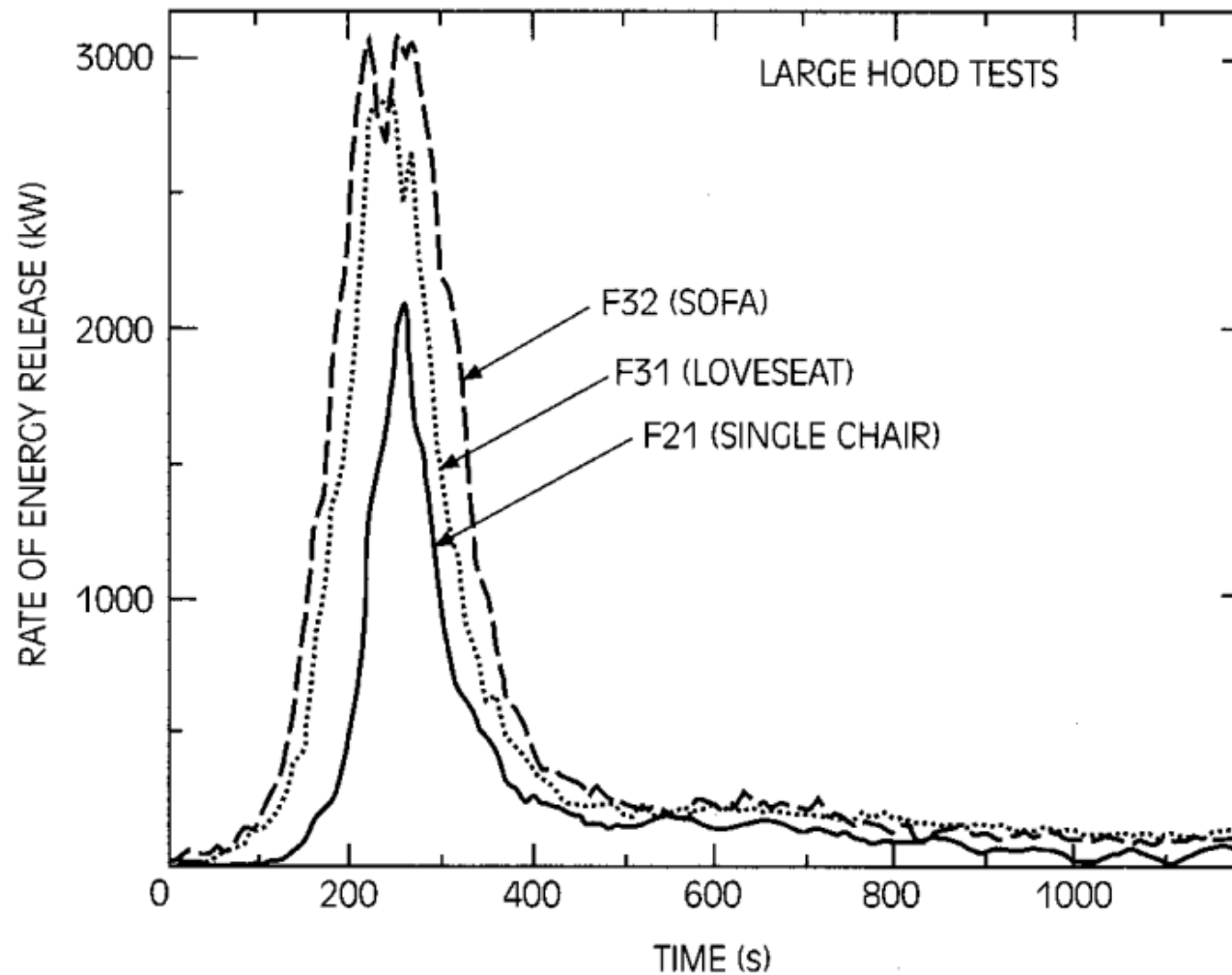
MODELACIÓ DE L'INCENDI

CÀLCULS SIMPLIFICATS – EFECTE DE LA RADIACIÓ EN LA POTÈNCIA



MODELACIÓ DE L'INCENDI

CÀLCULS SIMPLIFICATS – CORBES TÍPIQUES



MODELACIÓ DE L'INCENDI

EXEMPLES DE POTÈNCIES CALORIFIQUES MÀXIMES

- Bombeta: 60-100 W
- Paperera: 50-100 kW
- Cadira de fusta amb seient d'escuma: 200–500 kW
- Cadira entapissada: 500 – 1500 kW
- Sofà entapissat: 1000 – 3000 kW
- Toll d'1 m² de gasolina: 2,5 MW
- Pila de palets de fusta de 3 m d'alçada: 7 MW
- 2 m² mercaderia plàstica 4,9 m d'alçada: 30-40 MW

MODELACIÓ DE L'INCENDI

CÀLCULS SIMPLIFICATS – FOCS DE DISSENY – FASE CREIXEMENT

- Simplificació a un problema complicat
- Coincideix amb alguns resultats de la prova
- Representa una velocitat constant de propagació de la flama
- Augment de l'àrea d'un cercle amb radi

$$\dot{Q} = \alpha (t - t_0)^2$$

\dot{Q}

Velocidad de cesión de calor (kW)

α

Constante de crecimiento del incendio

t

Tiempo (s)

t_0

Tiempo efectivo de ignición (s)

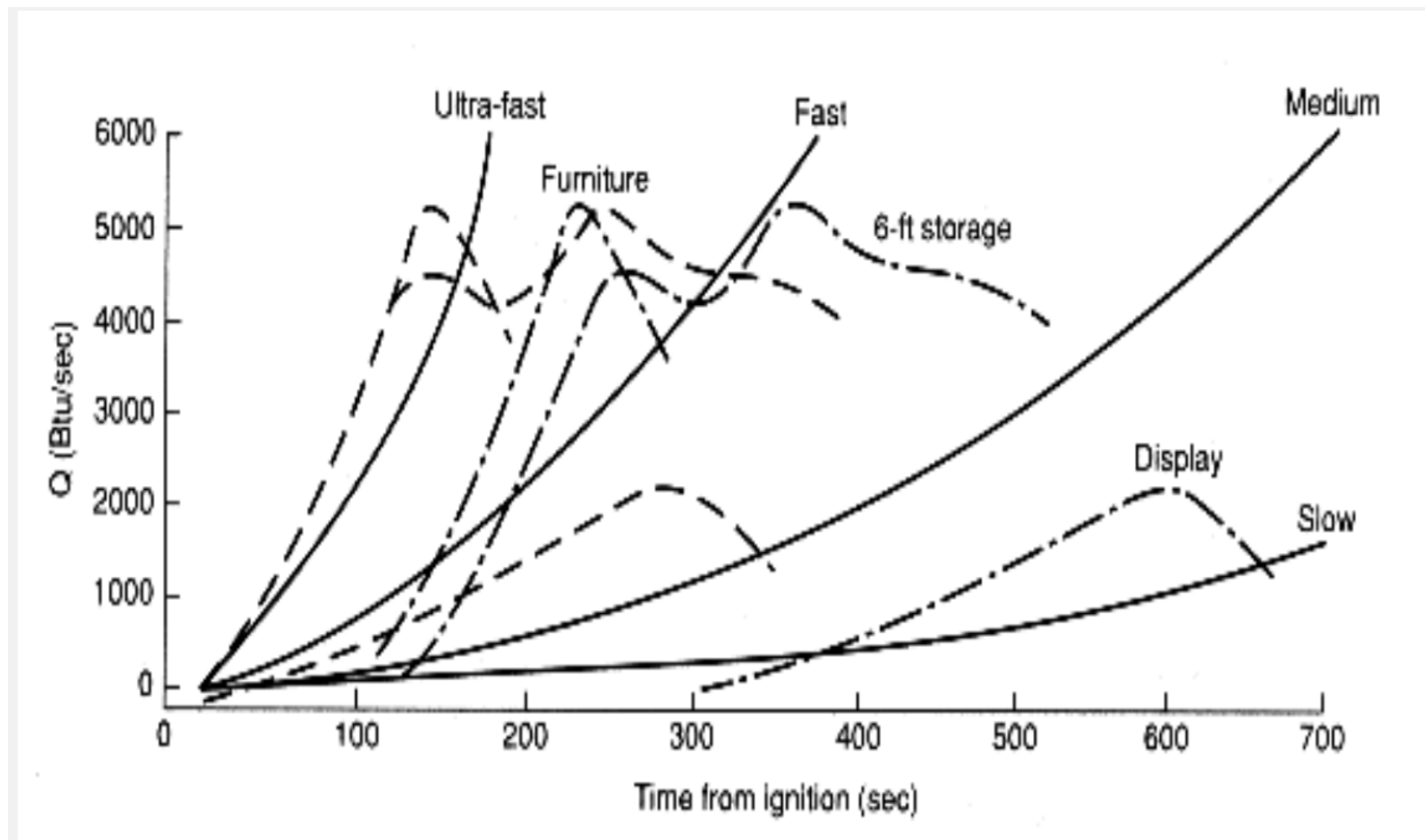
No considerando el tiempo de crecimiento incipiente del incendio:

$$\dot{Q} = \left(\frac{t}{t_g} \right)^2$$

$$\dot{Q} = \alpha \cdot t^2$$

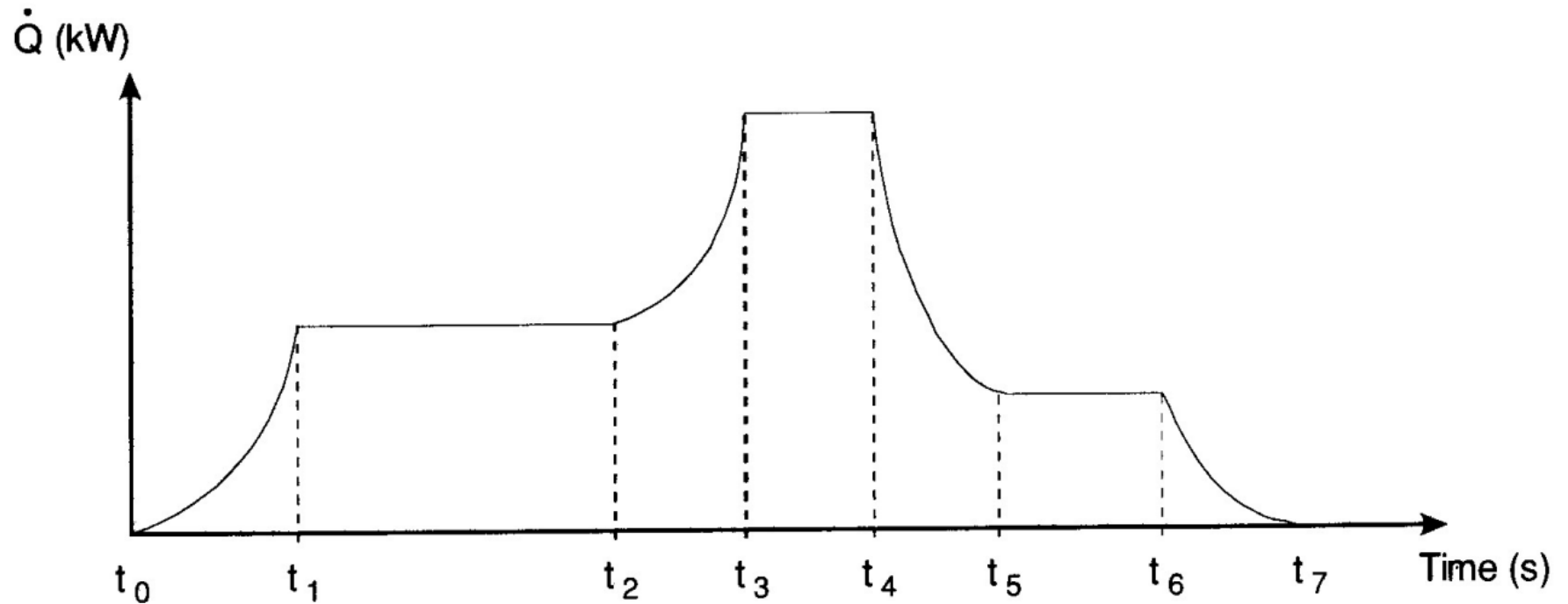
MODELACIÓ DE L'INCENDI

CÀLCULS SIMPLIFICATS – FOCS DE DISSENY



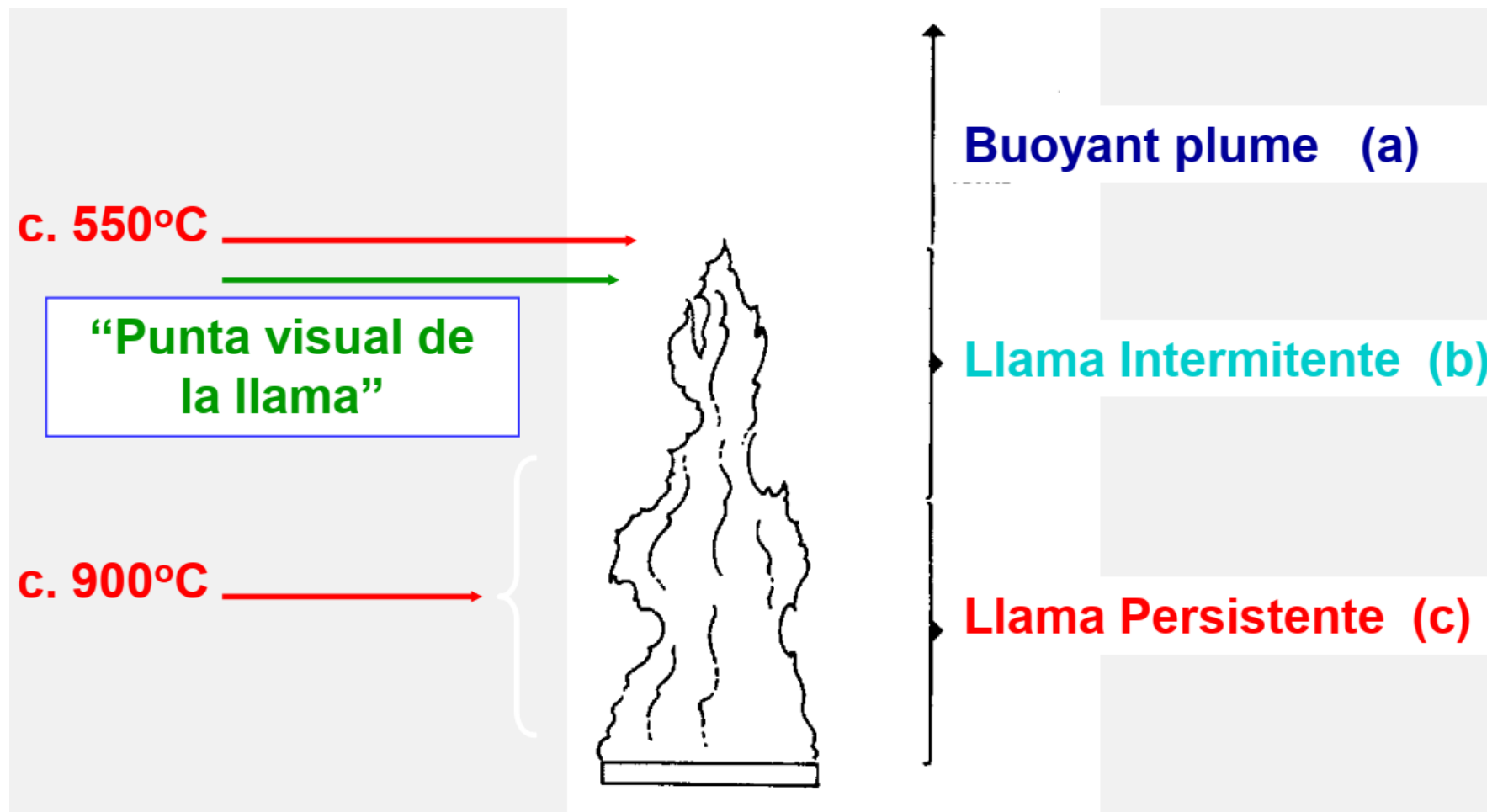
MODELACIÓ DE L'INCENDI

CÀLCULS SIMPLIFICATS – FOCS DE DISSENY – FASES



MODELACIÓ DE L'INCENDI

CÀLCULS SIMPLIFICATS – FOCS DE DISSENY



MODELACIÓ DE L'INCENDI

CÀLCULS SIMPLIFICATS – ALTURA DE LA FLAMA (Heskestad)

$$Fr = \frac{u^2}{gD} = \frac{\dot{Q}^2}{\rho_v^2 A^2 \Delta H_c^2 gD}$$

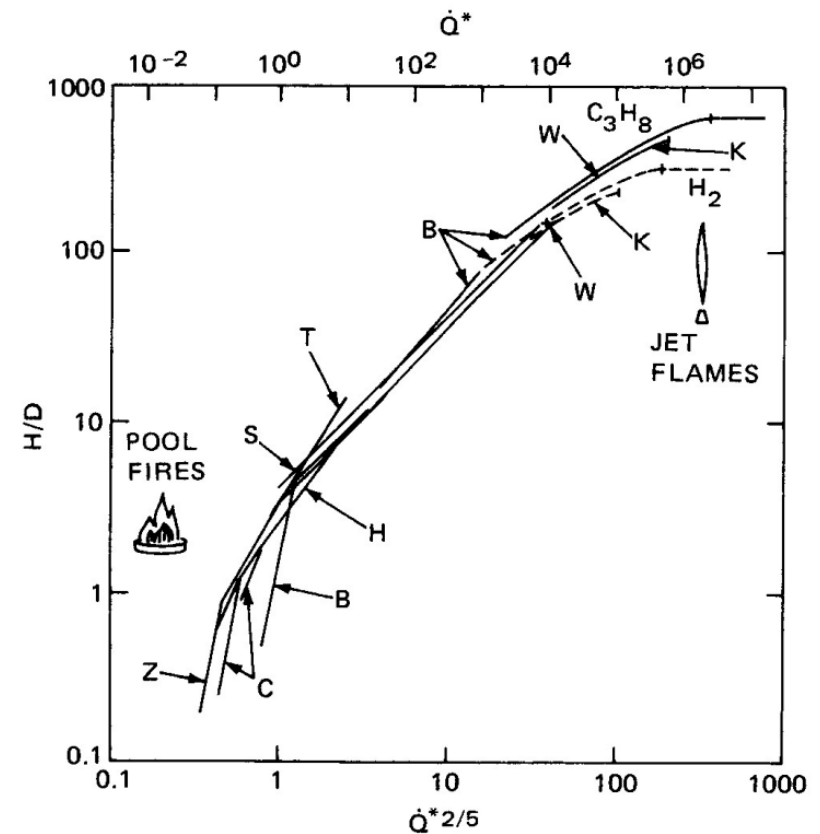
$$\frac{L}{D} \propto \sqrt{Fr} = \frac{\dot{Q}}{\rho_v A \Delta H_c \sqrt{gD}} \propto \frac{\dot{Q}}{D^{5/2}}$$

Since $A \propto D^2$

$$L = 0.23 \dot{Q}^{2/5} - 1.02 D$$

\dot{Q} (total HRR) \rightarrow kW, L \rightarrow m, D \rightarrow m

$$0.5 < Q^* < 1000$$



MODELACIÓ DE L'INCENDI

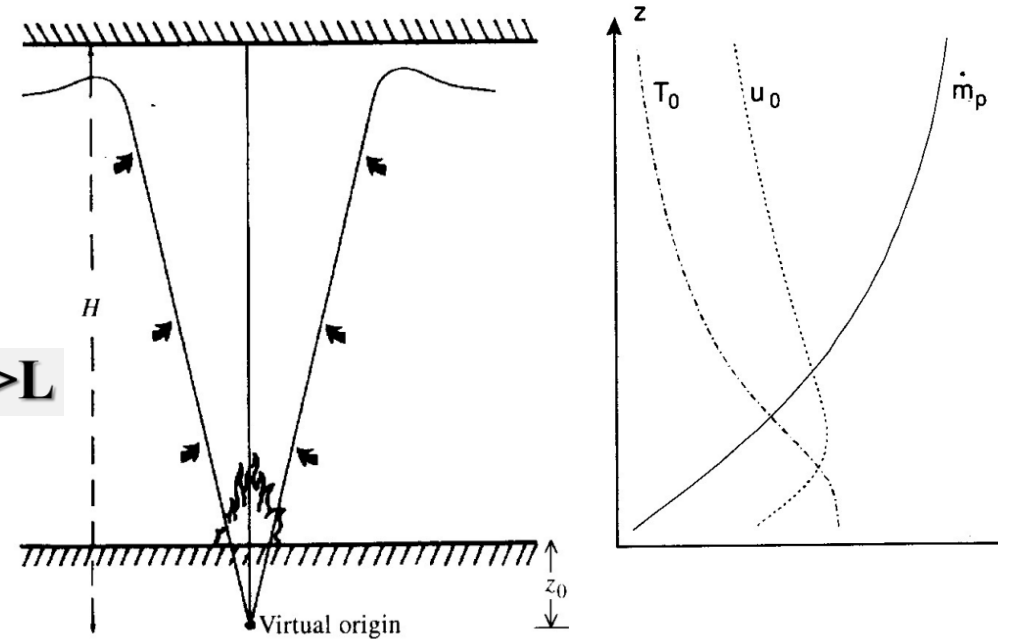
CÀLCULS SIMPLIFICATS – PLUMALL DE FUMS – (Zukoski, Heskestad)

$$Z_0 = -1.02D + 0.083\dot{Q}_c^{2/5}$$

$$b = 0.12(T_0 / T_\infty)^{1/2}(z - z_0)$$

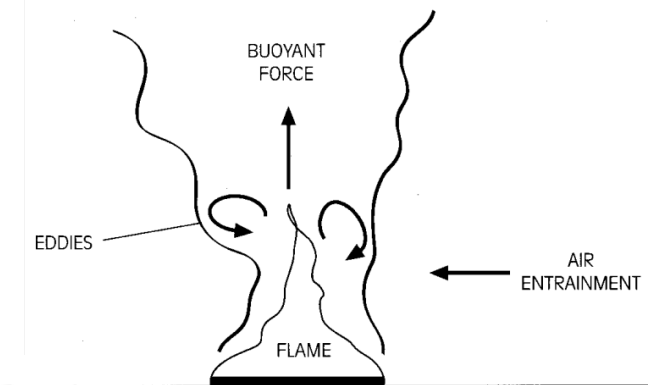
$$\Delta T_0 = 9.1 \left(\frac{T_\infty}{g c_p^2 \rho_\infty^2} \right)^{1/3} \dot{Q}_c^{2/3} (z - z_0)^{-5/3} \quad \checkmark z > L$$

$$u_0 = 3.4 \left[\frac{g}{c_p T_\infty \rho_\infty} \right]^{1/3} \dot{Q}_c^{1/3} (z - z_0)^{-1/3}$$



$$\dot{m}_p = 0.071 \dot{Q}_c^{1/3} \cdot (z - z_0)^{5/3} + 1.85 \cdot 10^{-3} \cdot \dot{Q}_c \quad \checkmark z > L$$

$$\dot{m}_p = 0.0056 \dot{Q}_c \frac{z}{L} \quad \checkmark z < L$$

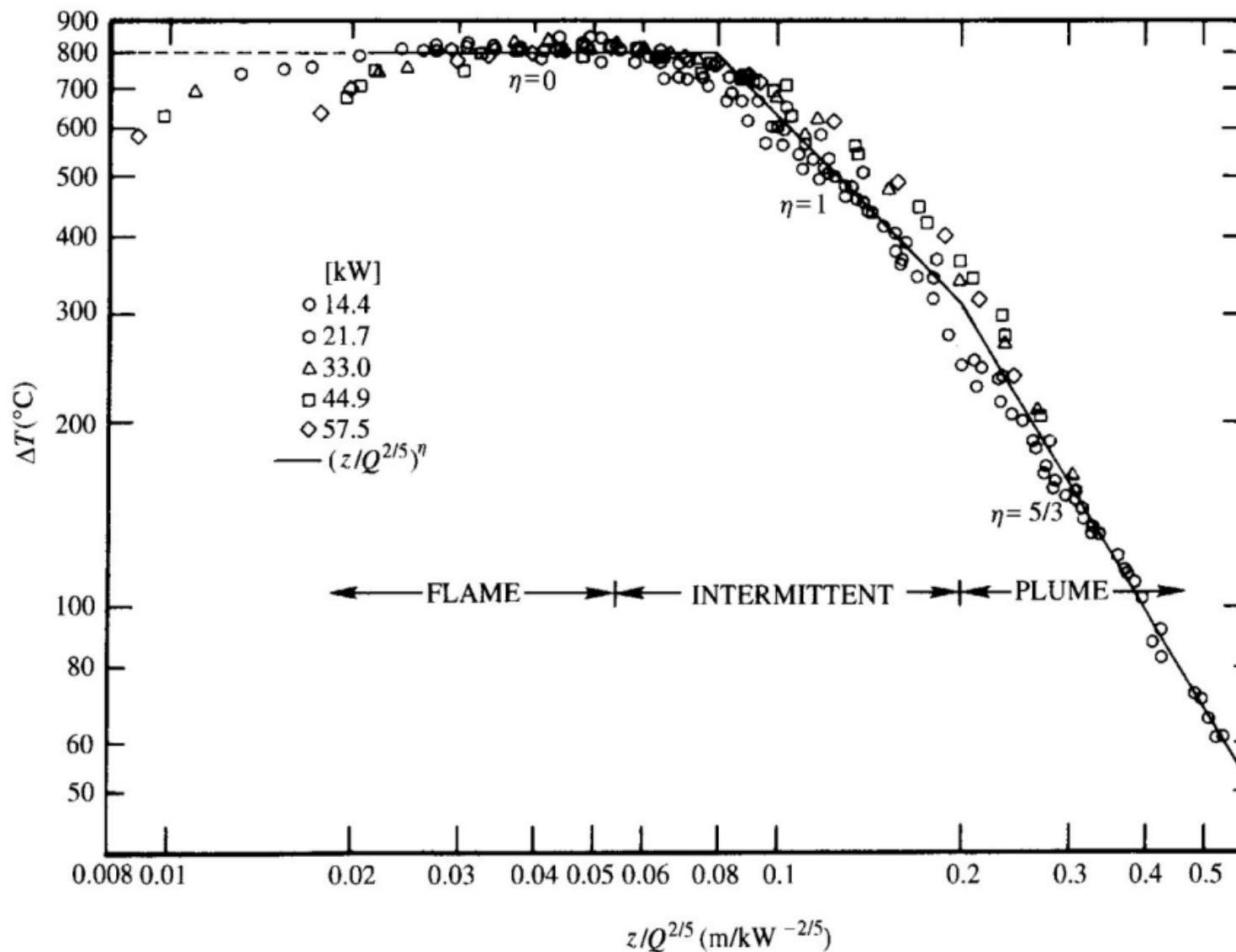


$$Q_c = f \text{ convective} * Q$$

$$\dot{Q} \rightarrow kW \quad z \rightarrow m \quad \dot{m}_p \rightarrow kg/s$$

MODELACIÓ DE L'INCENDI

CÀLCULS SIMPLIFICATS – PLUMALL DE FUMS

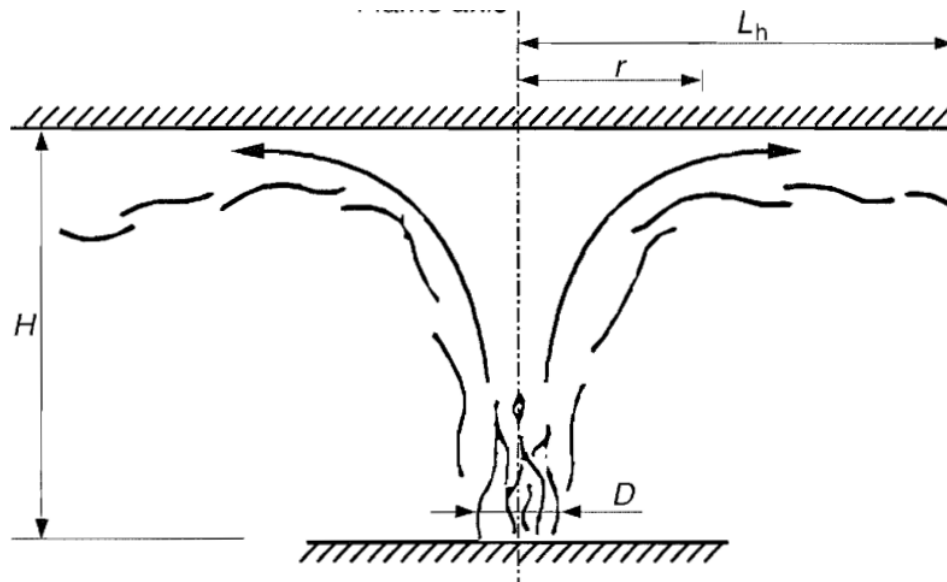


MODELACIÓ DE L'INCENDI

CÀLCULS SIMPLIFICATS – FLAMES AL SOSTRE – EN-1991-1-2

Longitud horitzontal de la flama.

Coefficient de transferència de calor



$$\begin{aligned} \dot{h} &= 100\,000 & y &\leq 0,30 \\ \dot{h} &= 136\,300 \text{ to } 121\,000 y & 0,30 < y < 1,0 \\ \dot{h} &= 15\,000 y^{3,7} & y &\geq 1,0 \end{aligned}$$

$$y = \frac{r + H + z'}{L_h + H + z'} \quad \dot{h} \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$L_h = \left(2,9 H (Q_H^*)^{0,33} \right) - H$$

$$Q_H^* = Q / (1,11 \cdot 10^6 \cdot H^{2,5})$$

Q is the rate of heat release [W]

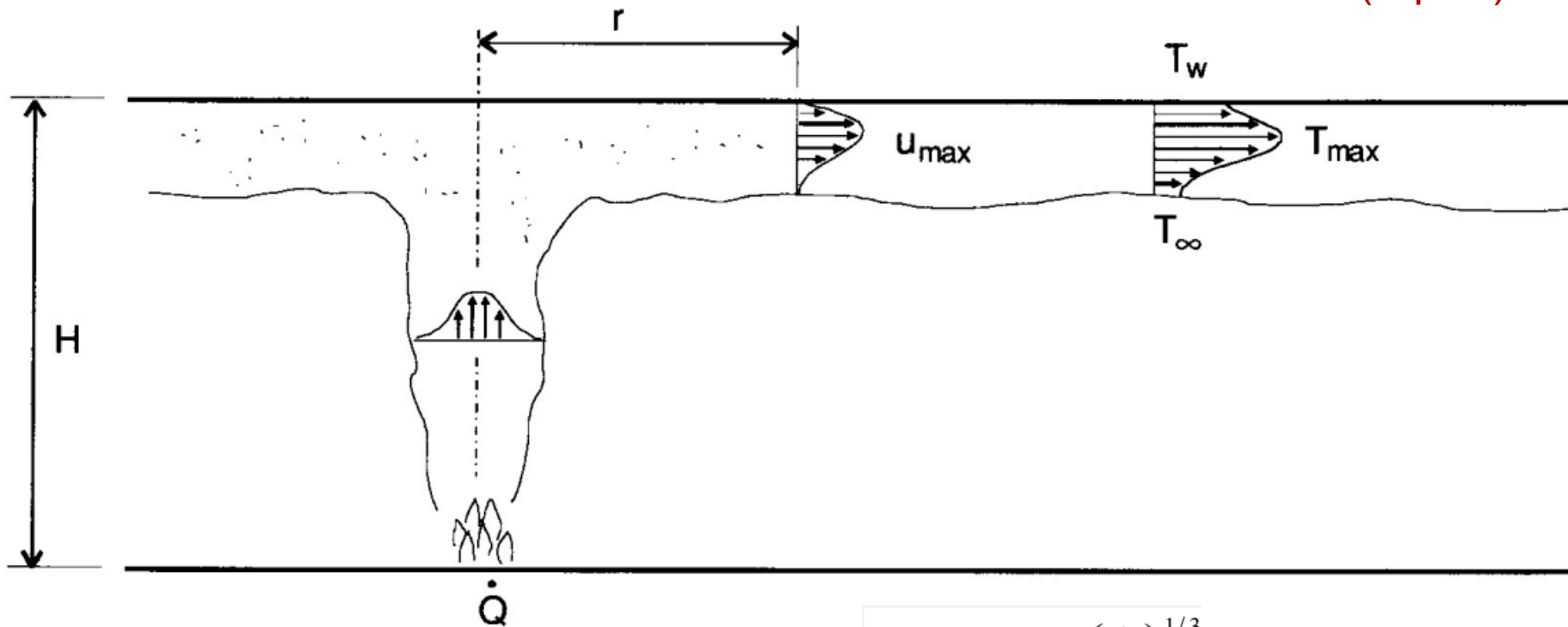
$$z' = 2,4 D (Q_D^{*2/5} - Q_D^{*2/3}) \text{ when } Q_D^* < 1,0$$

$$z' = 2,4 D (1,0 - Q_D^{*2/5}) \text{ when } Q_D^* \geq 1,0$$

$$Q_D^* = Q / (1,11 \cdot 10^6 \cdot D^{2,5})$$

MODELACIÓ DE L'INCENDI

CÀLCULS SIMPLIFICATS – INTERACCIÓ AMB EL SOSTRE – (Alpert)



$$T_{\max} - T_{\infty} = \frac{16.9 \cdot \dot{Q}^{2/3}}{H^{5/3}} \quad r/H < 0,18$$

$$u_{\max} = 0.96 \cdot \left(\frac{\dot{Q}}{H} \right)^{1/3} \quad r/H < 0,15$$

$$T_{\max} - T_{\infty} = \frac{5.38 \cdot (\dot{Q}/r)^{2/3}}{H} \quad r/H > 0,18$$

$$u_{\max} = \frac{0.195 \cdot \dot{Q}^{1/3} \cdot H^{1/2}}{r^{5/6}} \quad r/H > 0,15$$

MODELACIÓ DE L'INCENDI

CÀLCULS SIMPLIFICATS – ACTIVACIÓ DETECTORS / RUIXADORS

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{T_g - T_d}{\tau} = \frac{u^{1/2}(T_g - T_d)}{RTI}$$

$$\frac{dT_l}{dt} = \frac{\sqrt{u}}{RTI}(T_g - T_l) - \frac{C}{RTI}(T_l - T_m)$$

T_d: Temperatura del detector.

T_l: Temperatura del fusible o bulb.

T_g: Temperatura del gas al voltant del ruixador °C o °K

T_m: Temperatura del cos i braços del ruixador °C o °K.

u: Velocitat del gas (m/s)

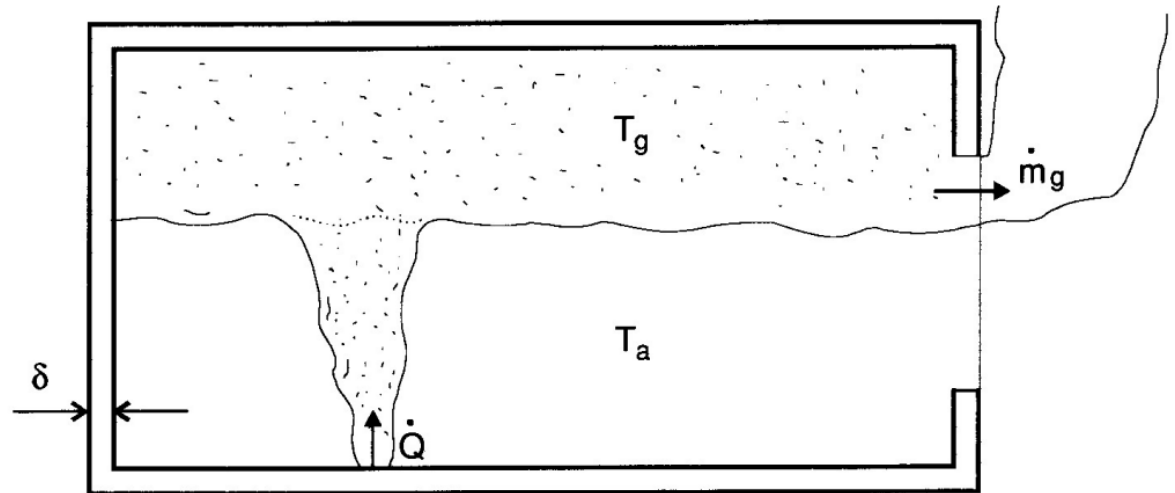
RTI: Índex de resposta tèrmica (m.s)^{0,5}.

MODELACIÓ DE L'INCENDI

CÀLCULS SIMPLIFICATS – COMPARTIMENT – PREFLASHOVER

(McCaffrey, Quintiere, Harkleroad [MQH])

- Combustió controlada pel combustible
- Foc varia en el temps
- 0 a 20 minuts
- Condicions uniformes
- Recintes m²
- Model de dues zones



$$\frac{\Delta T}{T_a} = 1.63 \left(\frac{\dot{Q}}{\sqrt{g \rho_a c_p T_a A_o} \sqrt{H_o}} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{h_k A_T}{\sqrt{g \rho_a c_p A_o} \sqrt{H_o}} \right)^{-\frac{1}{3}}$$

$$\Delta T = 6.85 \left(\frac{\dot{Q}^2}{A_o \sqrt{H_o} h_k A_T} \right)^{1/3} \quad \dot{Q} \rightarrow [kW], h_k \rightarrow [kW / m^2 K], A \rightarrow [m^2], H \rightarrow [m]$$

MODELACIÓ DE L'INCENDI

CÀLCULS SIMPLIFICATS – COMPARTIMENT – FLASHOVER

Temperatura = 500°C

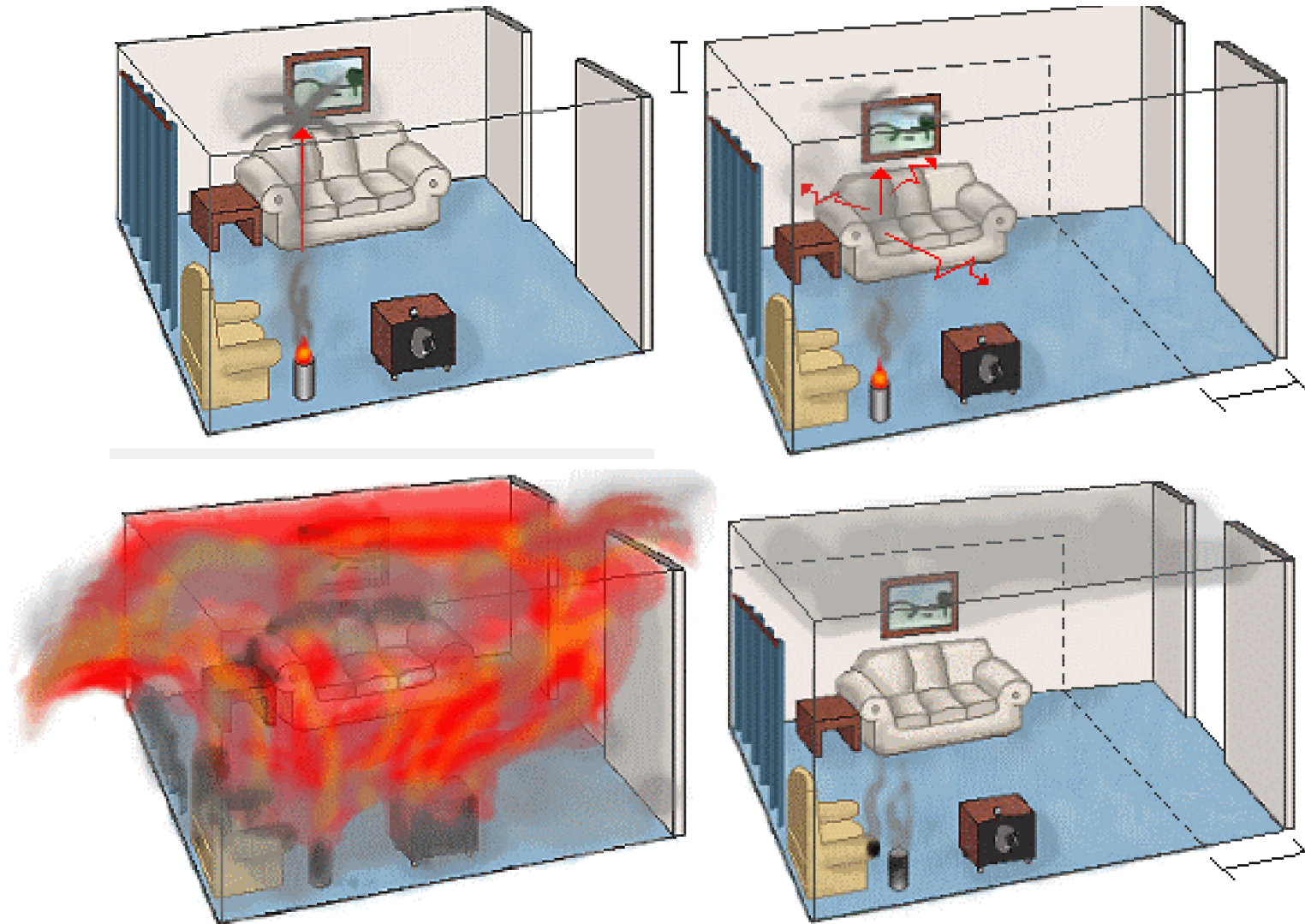
$$\dot{Q}_{FO} = 610 \left(h_K A_T A_o \sqrt{H_o} \right)^{1/2}$$

POST-FLASHOVER

- Combustió controlada per la ventilació.
- Condicions estabilitzades
- 0,5 – 3 hores
- Model de una zona

MODELACIÓ DE L'INCENDI

EFACTES DE CONTORN EN EL MODEL



MODELACIÓ DE L'INCENDI

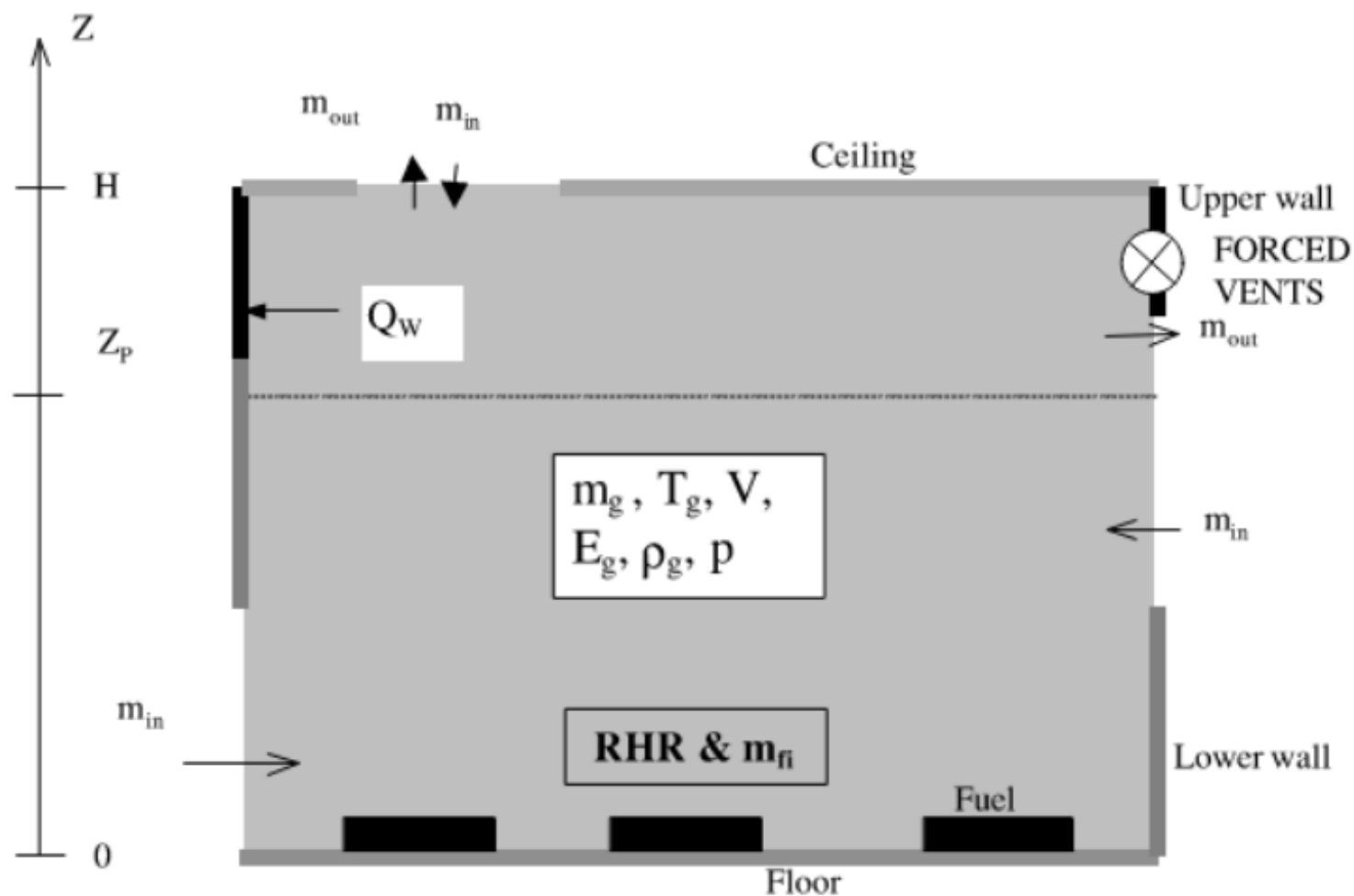
➤ MODELS DE ZONES

- S'anomenen de zones perquè divideixen l'espai en zones (una o dos per compartiment) per a resoldre les equacions.
- Són els simuladors computacionals més senzills.
- Són una bona representació dins el seu domini d'aplicació.
- Simples i ràpids de fer anar.
- Molt utilitzats en disseny estructural / gestió de fums
- Interessants per fer estudis paramètrics i de sensibilitat.

MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS 1D (UNA ZONA)

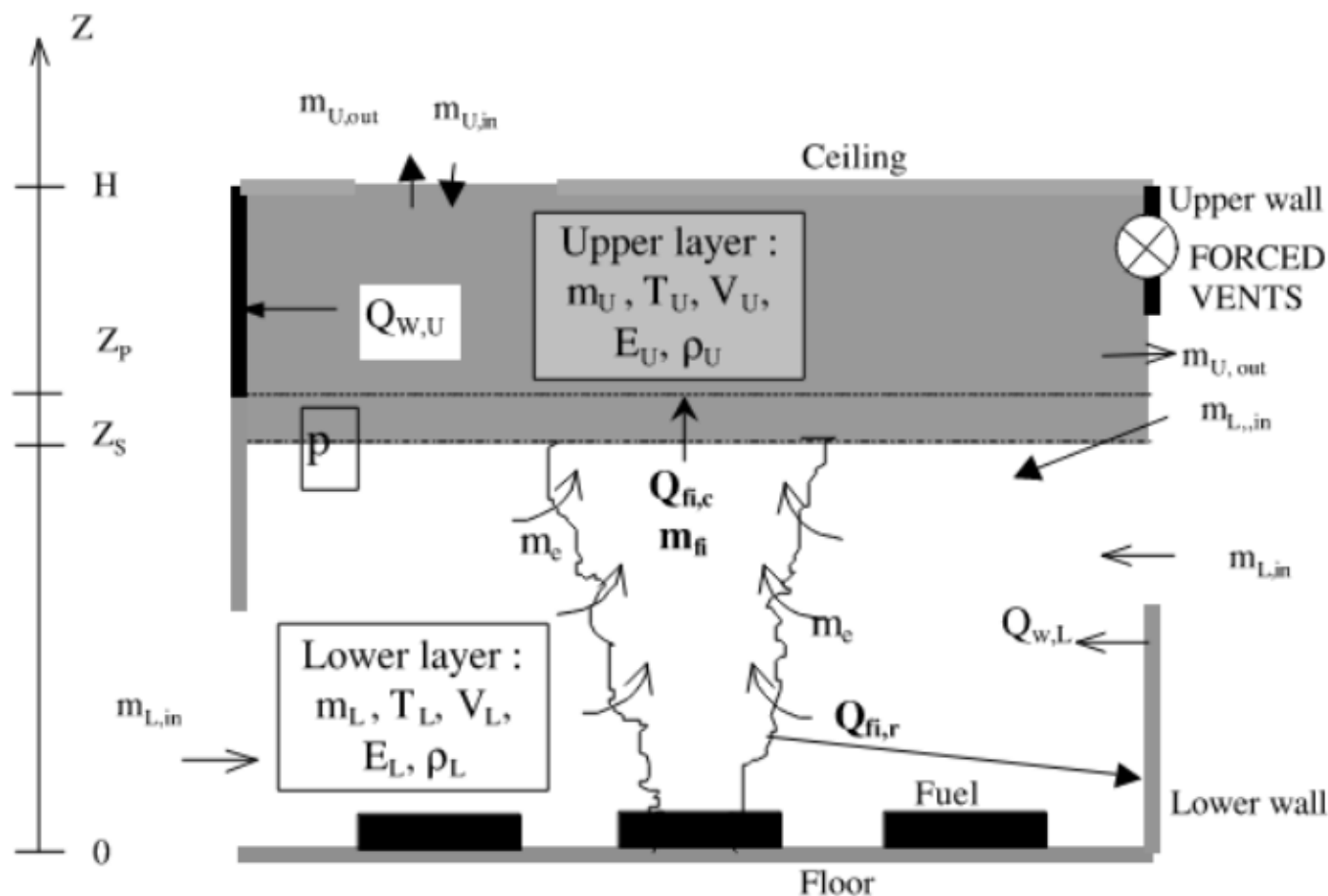
Models que consideren uniformes les propietats en el recinte (per exemple en un recinte durant el “flashover” o en túnels o passadissos, ...)



MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS 2D (DUES ZONES)

El model de dues zones representa el desenvolupament de l'incendi diferenciant una capa freda inferior i una altra de calenta on hi ha els fums i gasos de la combustió.



MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS 1D O 2D – CRITERIS DE TRANSICIÓ – OZONE

- 1) **$T_u > T_{fl}$** . Elevada temperatura dels gasos de la capa superior, composta per productes de combustió i aire arrossegat, condueix a un flashover. Tot el combustible del compartiment s'encén pel flux radiatiu de la capa superior. La temperatura de flashover (T_{fl}) s'estableix a 500 °C.
- 2) **$Z_s < Z_q$ i $T_z > T_{ign}$** . Si els gasos en contacte amb el combustible tenen una temperatura superior a la temperatura d'ignició del combustible (300 °C), la propagació del foc a tot el combustible del compartiment es produirà per ignició convectiva.
- 3) **$Z_s < 0,2 H$** . L'alçada de la interfície baixa i condueix a un gruix de capa inferior molt petit, que no és representatiu del fenomen de dues zones.
- 4) **$A_{fi} > 0,25 A_f$** . L'àrea d'incendi és massa alta en comparació amb la superfície del sòl del compartiment per considerar un incendi localitzat.

Els criteris 1 o 2 condueixen necessàriament a una modificació de la velocitat d'alliberament de calor.

MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE ZONES

<https://www.firemodelsurvey.com/>

Dona links per trobar els programes i informació



International Survey
of
Computer Models for Fire and Smoke

Actively Supported

ARGOS (2014)
<u>CFAST (2015)</u> (2014) (2007) (2002)
B-Risk (2014) (2013)

Archived

MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE ZONES – CFAST – NIST

Model consolidat de creixement del foc i transport de fum

Proporciona estimacions quantitatives de les conseqüències més probables d'un incendi a recintes tancats.

Gran aplicació entre investigadors d'incendis, enginyers, arquitectes, etc. per analitzar l'impacte que els incendis i el fum pot produir en un lloc específic d'un edifici.

El model ha estat sotmès a **nombrosos assaigs de validació.**

Capaç de predir les condicions d'entorn en un **recinte multi-compartiment** sotmès a un incendi.

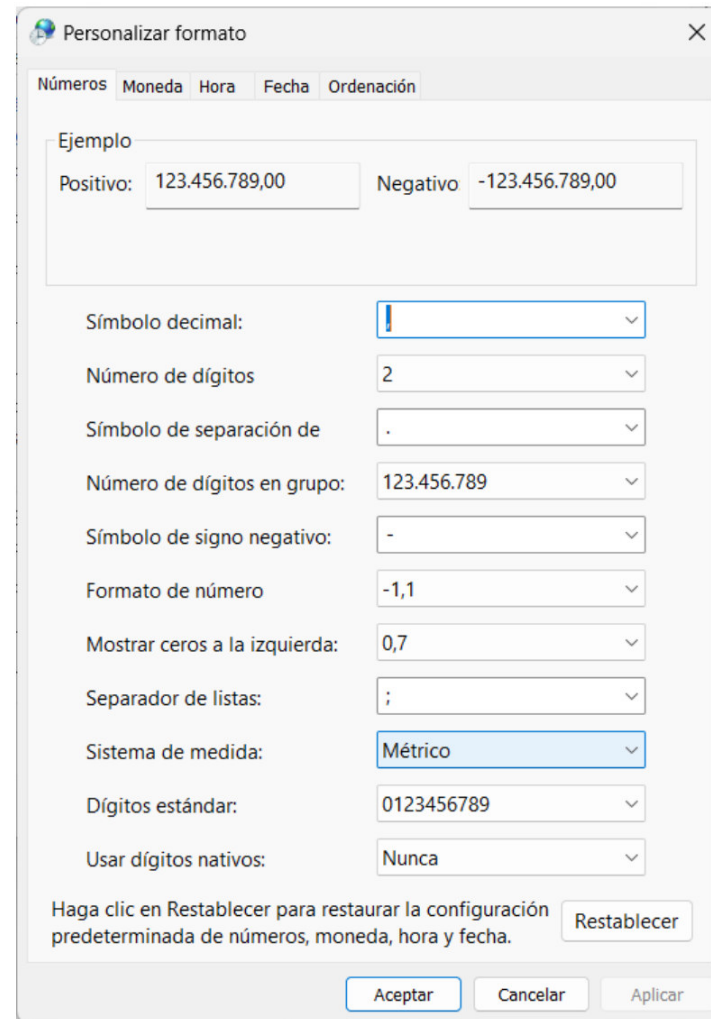
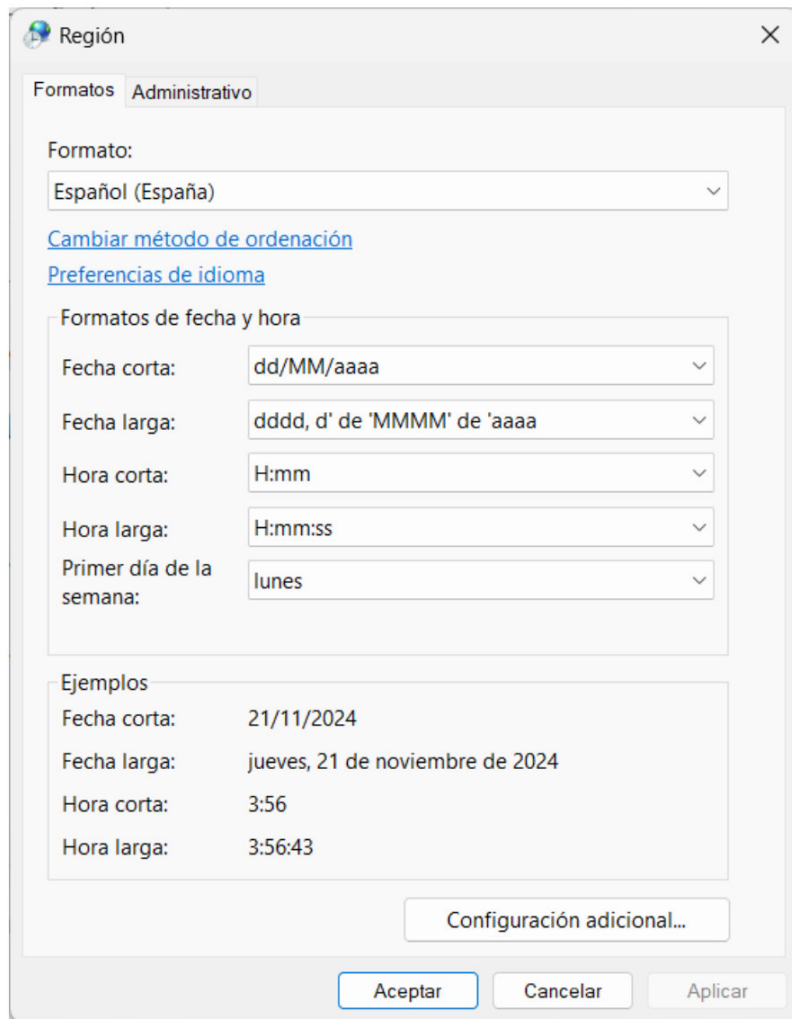
Calcula el **temps en què els fums i els gasos de l'incendi, i les temperatures es distribueixen en un edifici** en un incendi determinat.

La temperatura i concentracions de fums i gasos a cada capa s'assumeix que són exactament iguals a cada punt.

MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE ZONES – CFAST – NIST

Atenció: *Fer servir el punt pels decimals i la coma pels milers (Windows)*



MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE ZONES – CFAST – NIST

Nota important. En el CFAST les àrees que s'han de introduir són les geomètriques i no les aerodinàmiques, o corregint per la diferència si el coeficient real és menor. Citant del manual:

4.1.1 Calculating Flow Through Wall Vents

Let $z = b$ and $z = t$ denote the height of the bottom and top of the segment, and ΔP_b and ΔP_t denote the pressure differences at these heights. Because a given segment is either completely above or completely below the neutral plane, the two pressure differences will have the same sign. The mass flow through the segment can then be computed by integrating Bernoulli's equation from b to t :

$$\dot{m} = \int_b^t C \sqrt{2\rho \Delta P(z)} w dz \quad (4.1)$$

Here, C is the orifice coefficient taken to be 0.7 [34],

4.2 Ceiling and Floor Vents

Cooper [36] developed a semi-empirical correlation for ceiling vents in which the volumetric flow rates upwards and downwards are functions of both pressure and density differences:

$$\dot{V}_{\text{up}} = 0.68 A_v \sqrt{2 |\max(\Delta P, 0)| / \rho_{\text{bot}}} + \dot{V}_{\text{ex}} \quad (4.8)$$

$$\dot{V}_{\text{down}} = 0.68 A_v \sqrt{2 |\min(\Delta P, 0)| / \rho_{\text{top}}} + \dot{V}_{\text{ex}} \quad (4.9)$$

MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE ZONES – CFAST – EXEMPLE SCTIEF

NAVE	LONGITUD (m)	ANCHURA (m)	SUPERFICIE (m ²)	ALTURA MINIMA (m)	ALTURA MÀXIMA (m)
NAVE 4	65,05	23,44-43,30	1.996,12	7,34	10,50

Altura emmagatzematge = 5 m

Obertures molls de càrrega = 22,68 m²

Ruixadors ESFR K320, Temperatura Activació 74°C

Obertura automàtica dels exutoris als 800 segons (13,4 minuts)

Tot i sent < 2.000 m² se incompleixen els 60 m màxims de dipòsit de fums exigits a la norma UNE 23585 i es vol dissenyar com un sòl dipòsit de fums amb exutoris a coberta i entrada de fums pels molls de càrrega.

MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE ZONES – CFAST – EXEMPLE SCTIEF

Segons la UNE 23585:2017

Tabla 1.3

Áreas de producción y/o apilamiento con altura limitada				
	Altura crítica de apilamiento	Área de incendio (A_f) m^2	Perímetro del incendio (P) m	Flujo de calor liberado (q_f) kW / m^2
Categoría 2 según anexo L	5	20,25	18	Conjuntos de combustibles hasta 2 m de altura. q_f (bajo) = 250 q_f (alto) = 625
				Conjuntos de combustible con altura entre 2 y 5 m (h_f) $q_{f \text{ (bajo)}} = 250 \cdot (h_f - 1)$ $q_{f \text{ (alto)}} = 625 \cdot (h_f - 1)$

MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE ZONES – CFAST – EXEMPLE SCTIEF

Segons la UNE 23585:2017

NAVE 4 - ROCIADORES EN TECHO - APORTACIÓN AIRE INFERIOR UNE 23585			
TIPO DE EXTRACCIÓN		NATURAL	
Temperatura ambiente	T_{amb} (°C)	20	
Densidad ambiente	ρ_{amb} (kg/m ³)	1.20	
Altura del techo	H (m)	10	
Longitud depósito humos	L (m)	65.05	
Ancho depósito humos	W_1 (m)	30.7	
Superficie en planta	S (m ²)	1,997	
Temperatura activación rociadores	T_{roc} (°C)	74	
Área de operación rociadores de techo	A_{roc} (m ²)	86	
Altura almacenamiento	h (m)	5	5
Tasa de calor liberado	Q (kW/m ²)	1000	2500
Superficie del fuego	A_f (m ²)	20.25	20.25
Superficie del fuego (máxima corregida)	A_f (m ²)	20.25	20.25
Perímetro del fuego	P (Wf) (m)	18.00	18.00
Calor total liberado	Q_t (kW)	20,250	50,625
Calor convectivo	Q_c (kW)	16,200	40,500
Coeficiente de entrada de aire al penacho	C_e	0.188	0.188
Altura libre de humos	Y (m)	5.50	5.50

MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE ZONES – CFAST – EXEMPLE SCTIEF

Segons la UNE 23585:2017

Masa de humos generada	M_f (kg/s)	43.65	43.65
Calor específico del aire	c_p (kJ/kg °K)	1.026	1.026
Incremento de temperatura de la capa de humos sin rociadores	Θ (°K)	362	904
Incremento de temperatura de la capa de humos con rociadores	Θ (°K)	54	54
Profundidad mínima de la capa de humos	d_{min} (m)	0.90	0.90
Grosor de la capa de humos	d_1 (m)	4.50	4.50
Superficie aerodinámica de entrada de aire	$A_i * C_i$ (m ²)	13.61	13.61
Superficie aerodinámica de venteo natural	$A_v * C_v$ (m ²)	15.34	15.34
Densidad del humo	ρ_{hum} (kg/m ³)	12.01	1.03
Caudal total de extracción	V_f (m ³ /s)	3.63	42.40
Flujo máximo por aireador para evitar el efecto vórtice (lejos de pared)	M_{cri} (kg/s)	80.13	80.13
Número mínimo de aireadores lejos de pared	N_{min}	0.5	0.5
Flujo máximo por aireador para evitar el efecto vórtice (cerca de pared)	M_{cri} (kg/s)	63.37	63.37
Número mínimo de aireadores cerca de pared	N_{min}	0.7	0.7
Largo aireador		3.0	3.0
Ancho aireador (ajustado para reducir obstrucciones)	D_v (m)	2.0	2.0
Diámetro equivalente aireador	D_i (m)	2.4	2.4
Coeficiente aerodinámico del aireador	C_v	0.70	0.70
Superficie aerodinámica del aireador natural elegido	$A_{v1} * C_{v1}$ (m ²)	4.20	4.20
Número de aireadores naturales necesarios	N_{req}	3.7	3.7
Número de aireadores naturales elegido	N_n	4.0	4.0

MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE ZONES – CFAST – EXEMPLE SCTIEF

CEdit 7.7.4 (Nave 2d)

File View Help

Simulation Thermal Properties Compartments Wall Vents Ceilina/Floor Vents Mechanical Ventilation Fires Targets Detection / Suppression Surface Connections Output

Title: CData Example 1 Flashover in a compartment

Simulation Times

Simulation Time: 3600 s

Text Output Interval: 60 s

Spreadsheet Output Interval: 1 s

Smokeview Output Interval: 15 s

Maximum Time Step: Default

Simulation Conditions

Interior

Temperature: 20 °C Humidity: 50 %

Exterior

Temperature: 20 °C Pressure: 101325 Pa

Adiabatic Compartment Surfaces

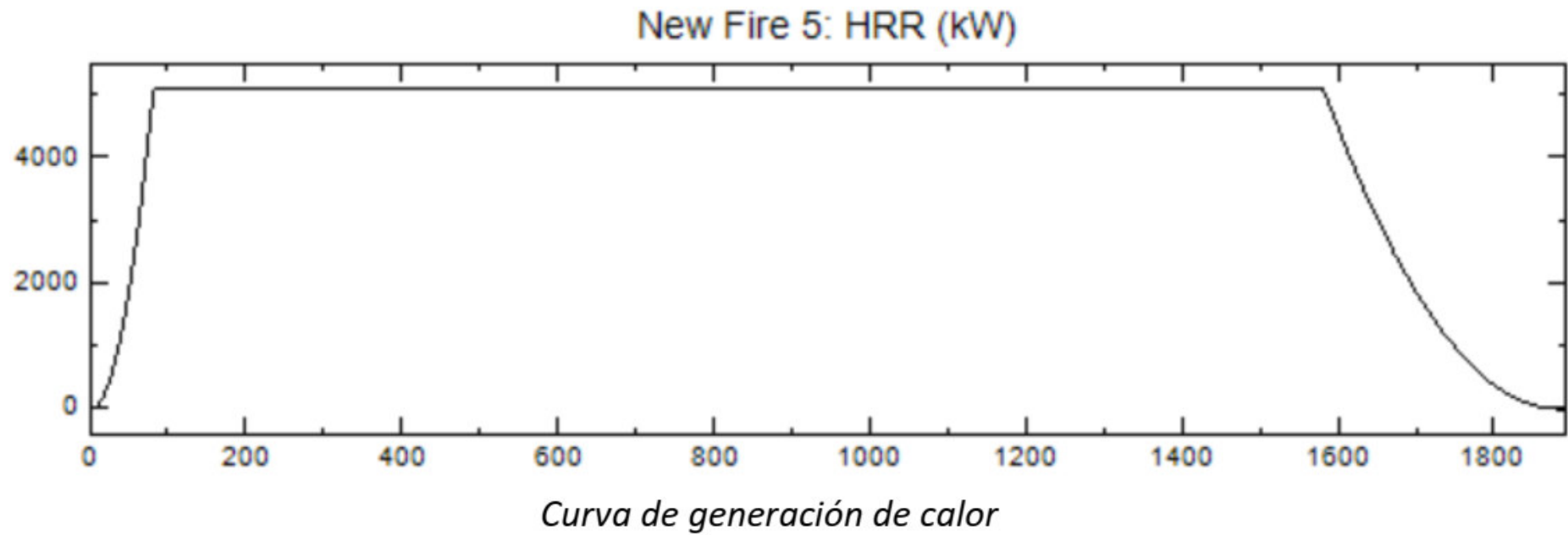
Lower Oxygen Limit: 0.15

Open Save Geometry Run View

No Errors

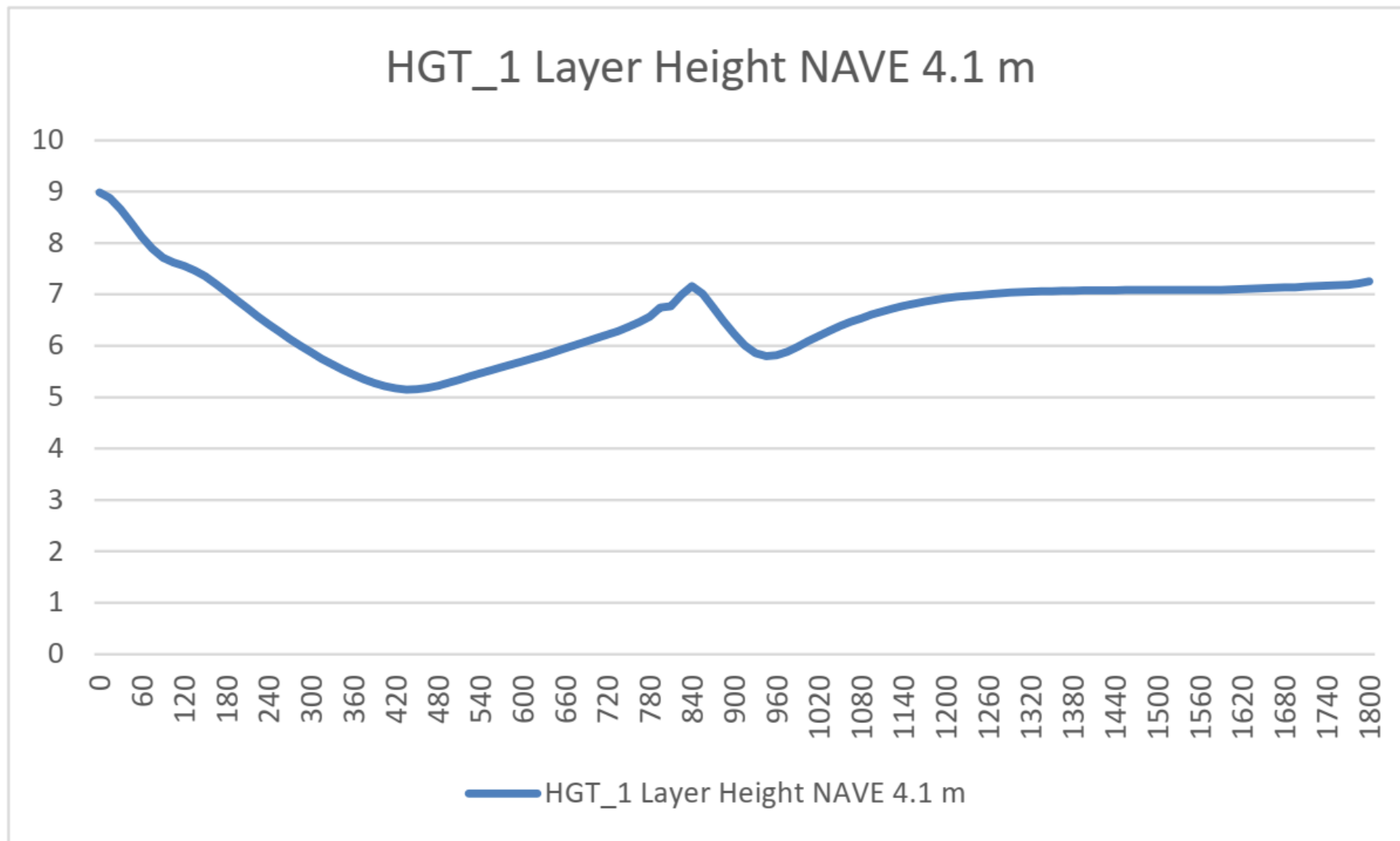
MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE ZONES – CFAST – EXEMPLE SCTIEF



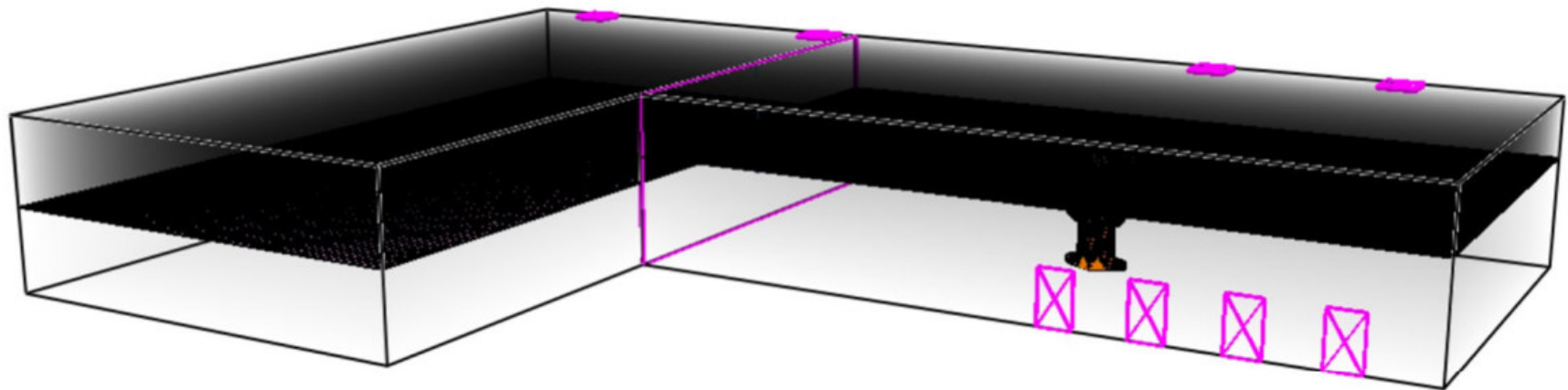
MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE ZONES – CFAST – EXEMPLE SCTIEF



MODELACIÓ DE L'INCENDI

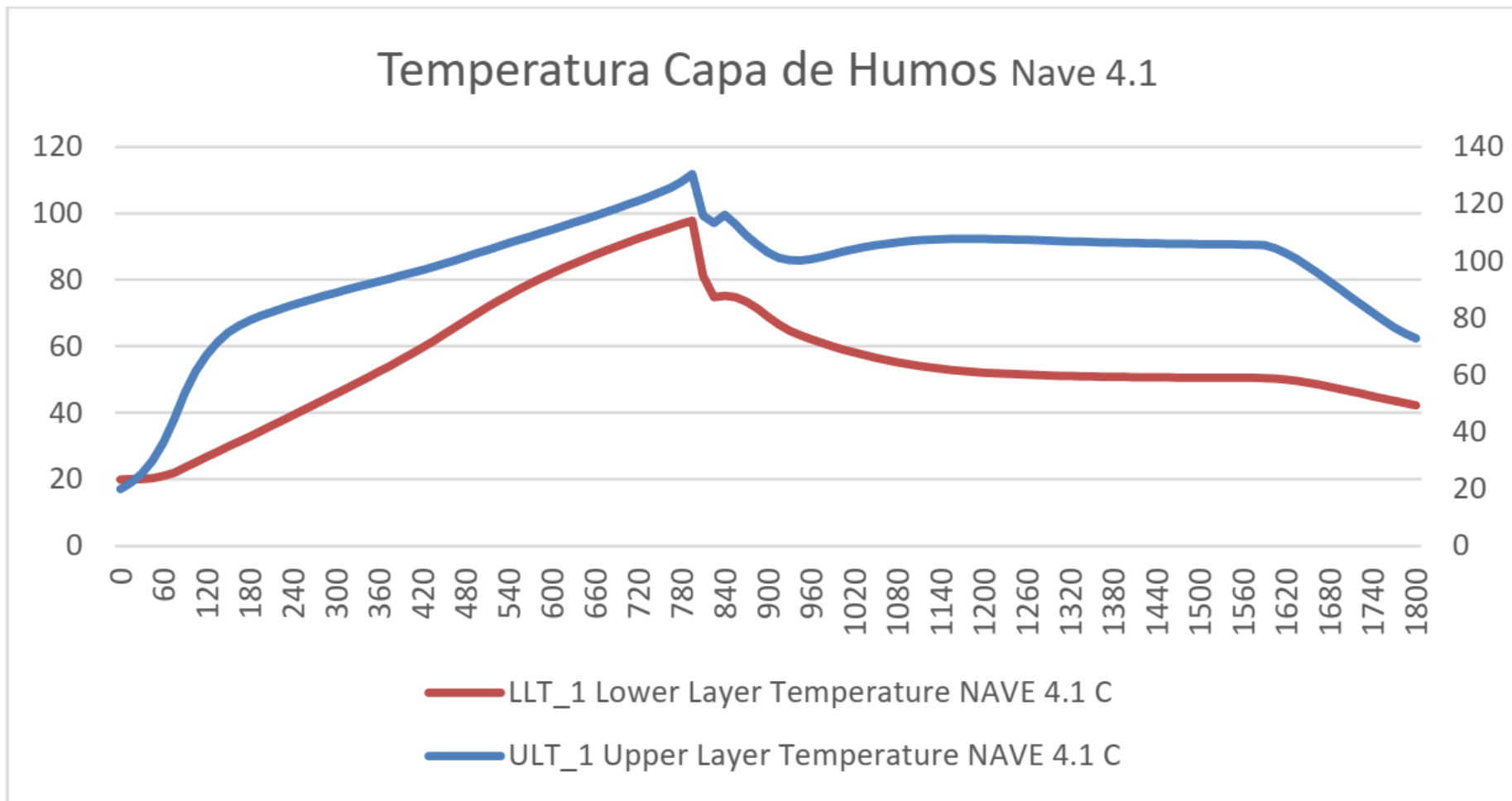
MODELS DE ZONES – CFAST – EXEMPLE SCTIEF



Frame: 20
Time: 300.0

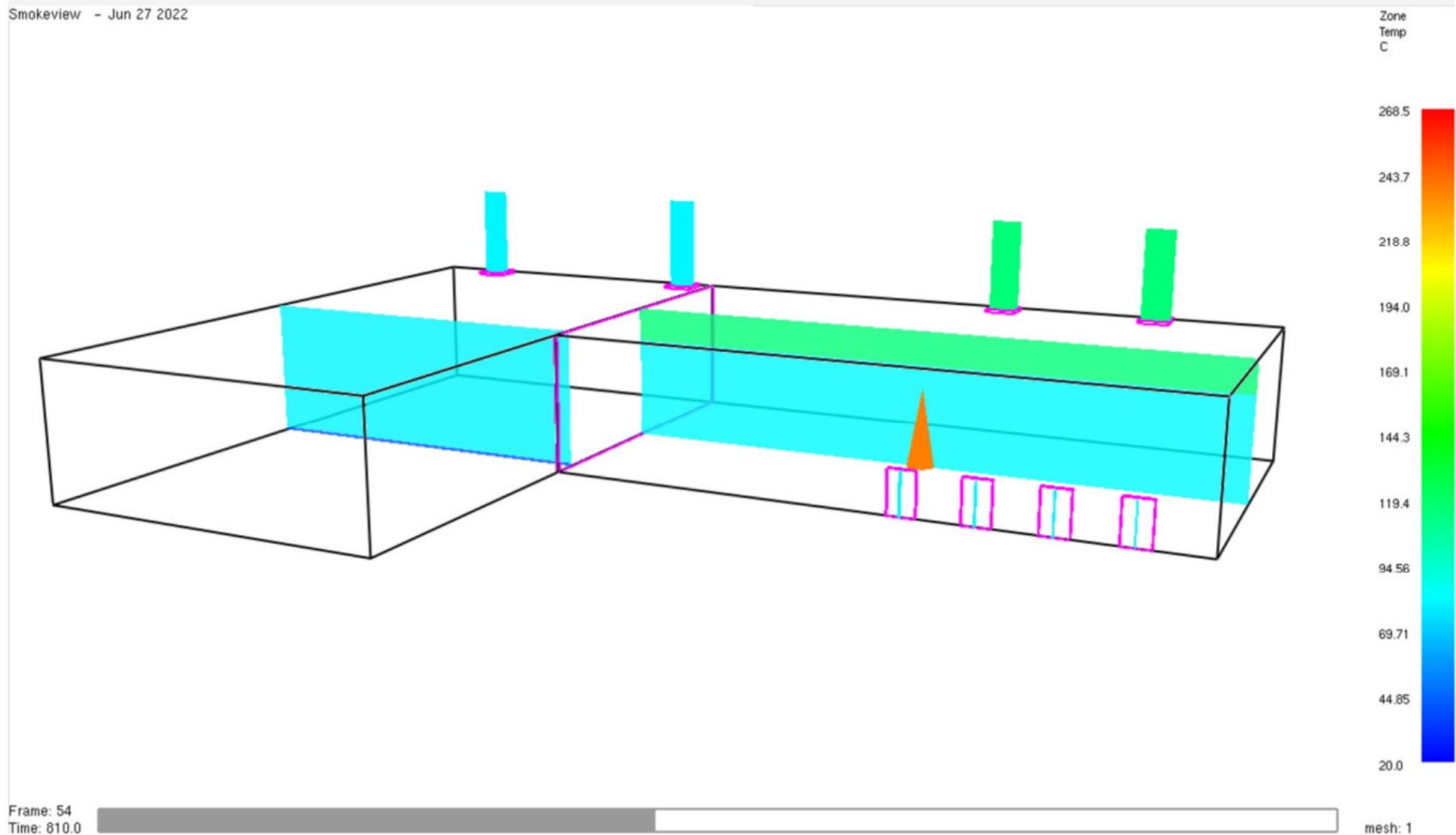
MODELACIÓ DE L'INCENDI

MMODELS DE ZONES – CFAST – EXEMPLE SCTIEF



MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE ZONES – CFAST – EXEMPLE SCTIEF



MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE ZONES – CFAST – EXEMPLE SCTIEF

És correcte l'estudi? Realment hi ha seguretat "equivalent"?

1. Si el criteri és la temperatura de la capa de fums, efectivament el valor escollit de 5 MW dona com a resultat una temperatura equivalent a la dels ruixadors. Però recordem que això és una limitació del model perquè no inclou l'efecte de refrigeració de l'aigua.

Caso	Potencia Màxima (MW)	Área Fuego (m ²)	Temp. humos (°C)	Altura Humos (m)
Nave 2d	5.0	9.0	72	6.0

2. Si el criteri és que hi hagi un nombre equivalent d'exutoris, el càlcul prescriptiu dona 4 exutoris i, per tant, és similar tenint en compte que la superfície també és de 2000 m² i que l'incompliment és menor (65 m > 60 m).

MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE ZONES – CFAST – EXEMPLE SCTIEF

És correcte l'estudi? Realment hi ha seguretat "equivalent"?

3. Si el criteri d'equivalència ha de ser la potència i/o l'àrea de l'incendi, la producció de fums fa que no es compleixi amb el requisit de mantenir lliure de fums 0,5 m d'alçada lliure sobre la mercaderia. Contrari al que molts pensen, tot i ser la capa de fums més calenta i sortir més de pressa és més gruixuda perquè en ser de més potència genera més sutge. De fet, depèn més de la potència que del perímetre.

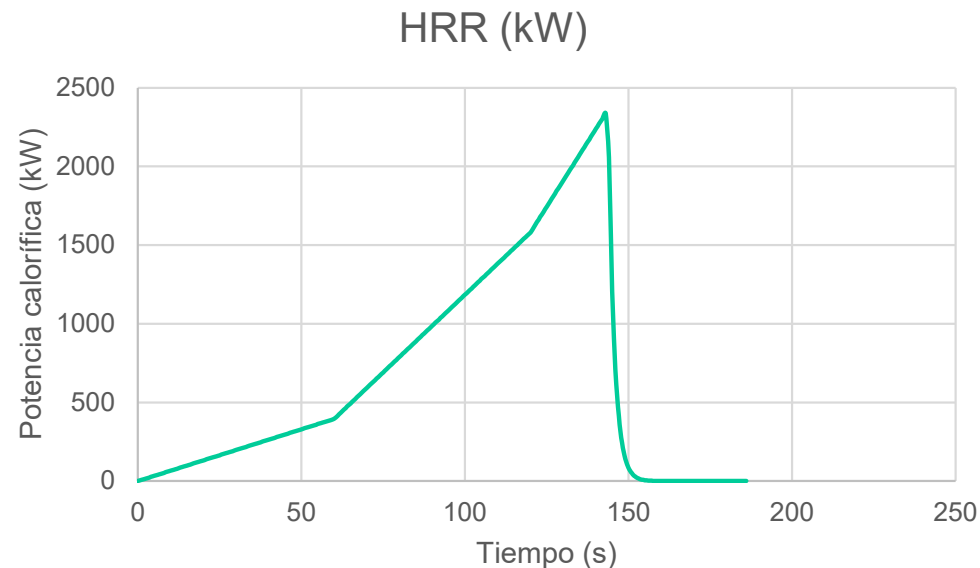
Caso	Potencia Màxima (MW)	Área Fuego (m2)	Temp. humos (°C)	Altura Humos (m)
Nave 2d	5.0	9.0	72	6.0
Nave 2c	12.5	20.0	123	4.9
Nave 2b	25.0	40.4	200	3.6
Nave 2a	40.0	63.2	282	2.9

MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE ZONES – CFAST – EXEMPLE SCTIEF

És correcte l'estudi? Realment hi ha seguretat "equivalent"?

4. Si en el programa afegim els ruixadors amb els seus paràmetres de temperatura, RTI, distància del foc i densitat d'aplicació, automàticament corregeix la corba del foc. Però fa servir el coeficient d'extinció d'Evans que **NO aplica** per potències > 500 kW i densitats superiors a $7,5$ mm/min ($0,000125$ m/s) quan aquí teòricament el foc podria arribar a 50 MW i la densitat és 10 vegades superior ($0,00133$ m/s). Si apliquem això es podria reduir el número d'exutoris a un.



MODELACIÓ DE L'INCENDI

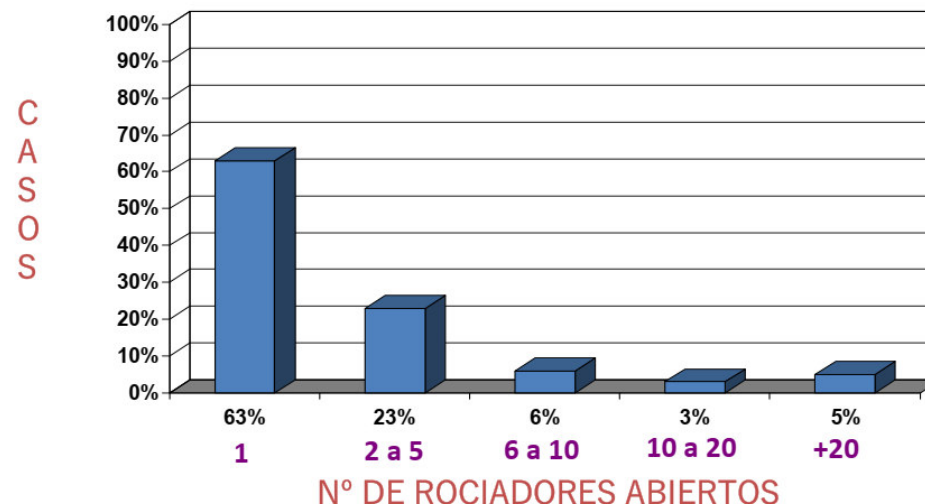
MODELS DE ZONES – CFAST – EXEMPLE SCTIEF

És correcte l'estudi? Realment hi ha seguretat “equivalent”?

Qui té, doncs, la raó? S'apagarà realment l'incendi en 2 minuts i mig?

És possible tenint en compte que el 57% dels incendis que tenen ruixadors instal·lats s'apaguen amb 1 ruixador ($63\% * 90\%$ que realment obren). Però el sistema s'hauria de dissenyar per al 100% dels casos, no? A més, els sistemes de ruixadors amb ESFR es dissenyen perquè funcionin **12 ruixadors durant 1 hora**. Això demostra que els incendis poden en alguns casos requerir molt més. En proves fetes en alçades similars perquè funcionin 12 ruixadors la potència pot arribar a ser de 14 MW.

L'opció 4, per tant, es descarta.



MODELACIÓ DE L'INCENDI

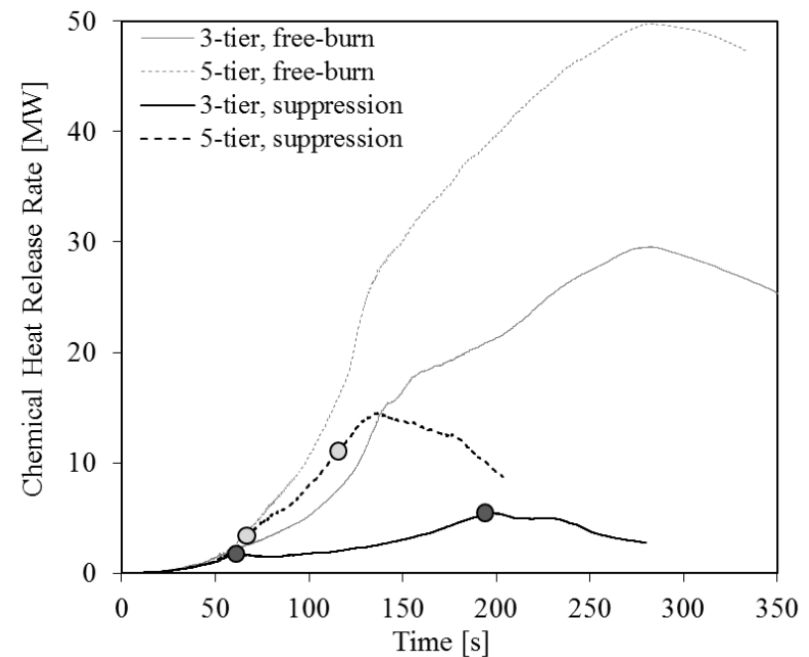
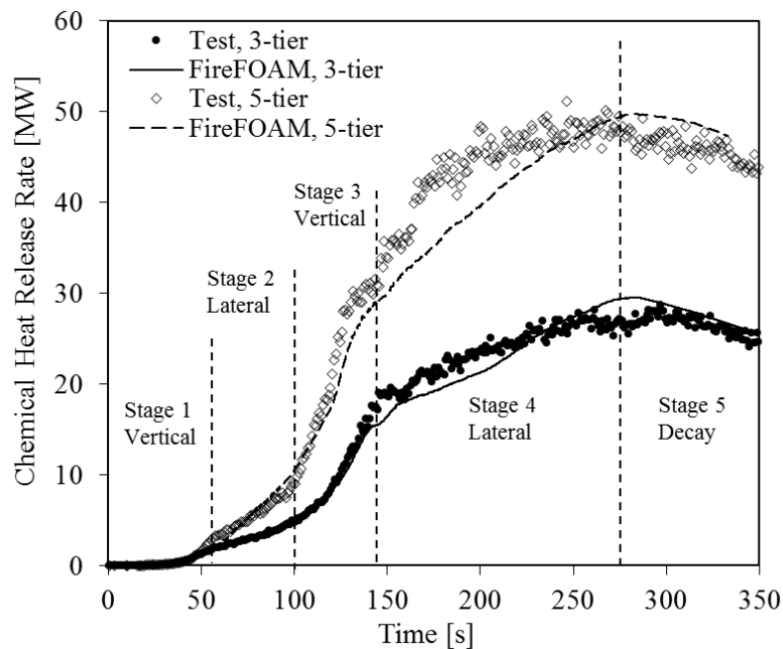
MODELS DE ZONES – CFAST – EXEMPLE SCTIEF

És correcte l'estudi? Realment hi ha seguretat “equivalent”?

Qui té doncs la raó? Pot arribar a ser la potencia de 20 o 50 MW?

Com ja s'ha explicat, en proves reals amb ruixadors **NO**. Com a molt 14 MW. A més la corba normalment té un pic però quan els ruixadors funcionen redueix la seva potència encara que no pugui acabar apagant degut a zones amagades a on no arriba l'aigua.

Per tant la opció 3 queda també descartada.



MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE ZONES – CFAST – EXEMPLE SCTIEF

És correcte l'estudi? Realment hi ha seguretat “equivalent”?

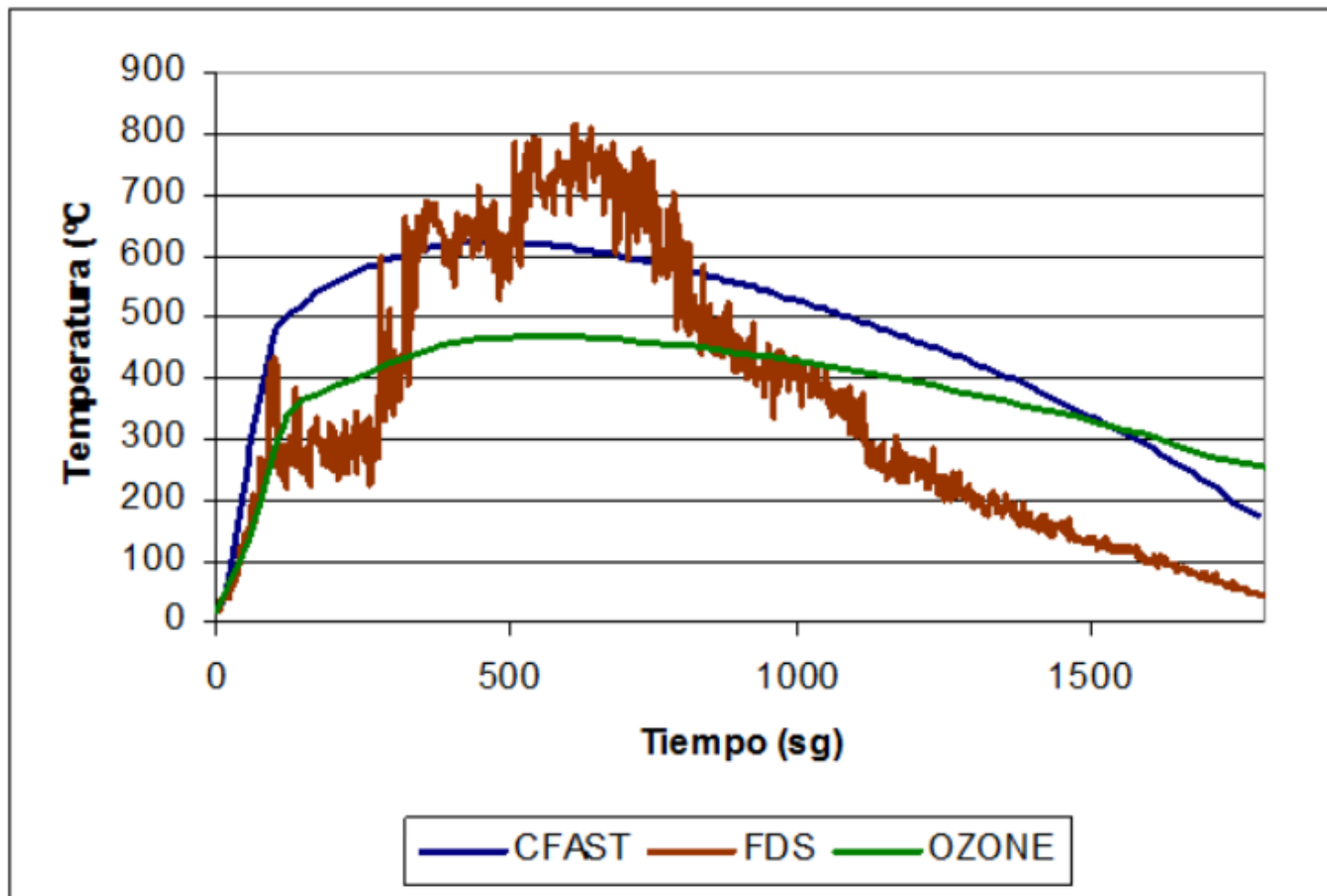
Finalment doncs, per un cantó es descarten les opcions 3 i 4, i per l'altre les opcions 1 i 2 restants s'apuntalen una amb l'altre per donar-li validesa a l'estudi.

Donat que el número d'exutoris és el mateix, el resultat es pot considerar acceptable.

MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE ZONES – CFAST – OZONE

Comparativa de prediccions entre models de zona i de camp

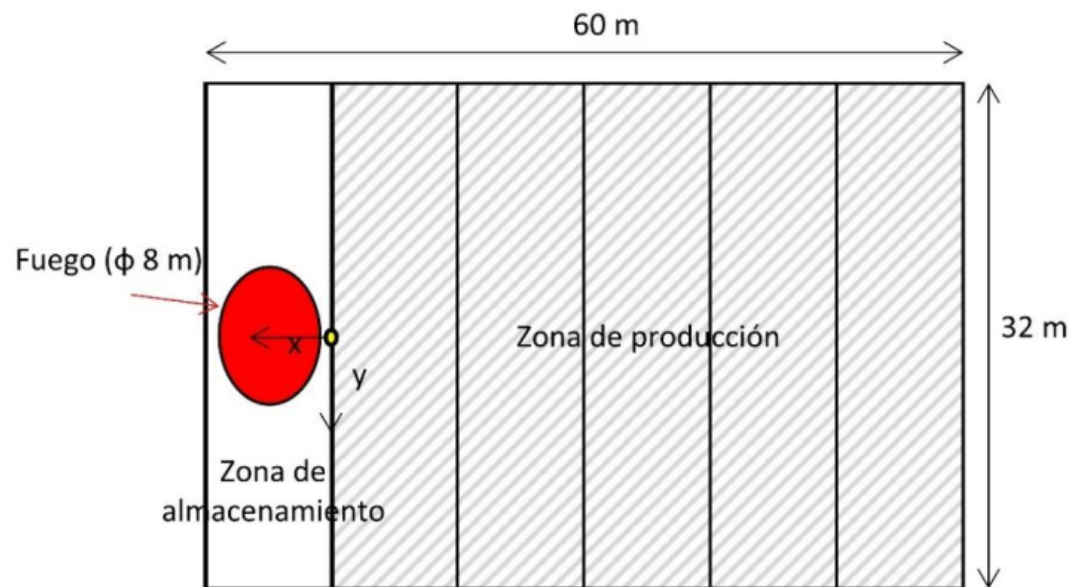
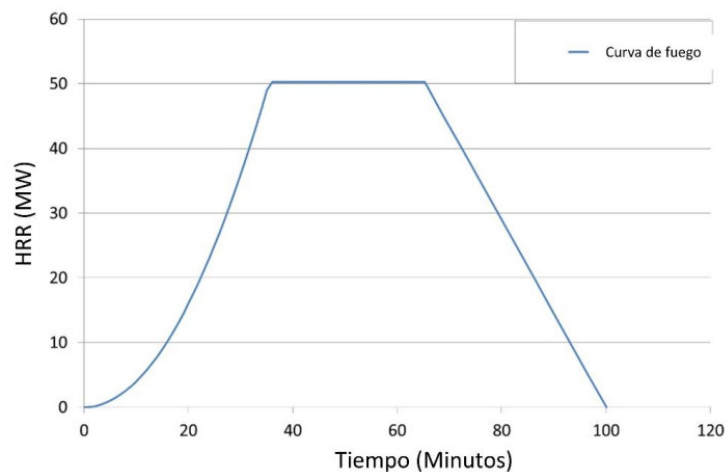
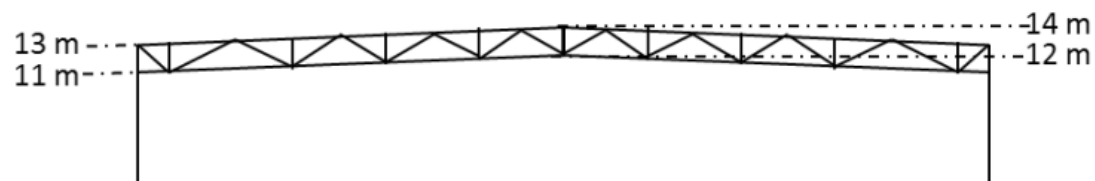


MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE ZONES – OZONE – NAU INDUSTRIAL

“Diseño de columnas bajo fuego localizado” - SCI - ONLINE INFORMATION TOOL

<https://research.bauforumstahl.de/es/fire-safety-3/disenio-de-columnas-bajo-fuego-localizado/>

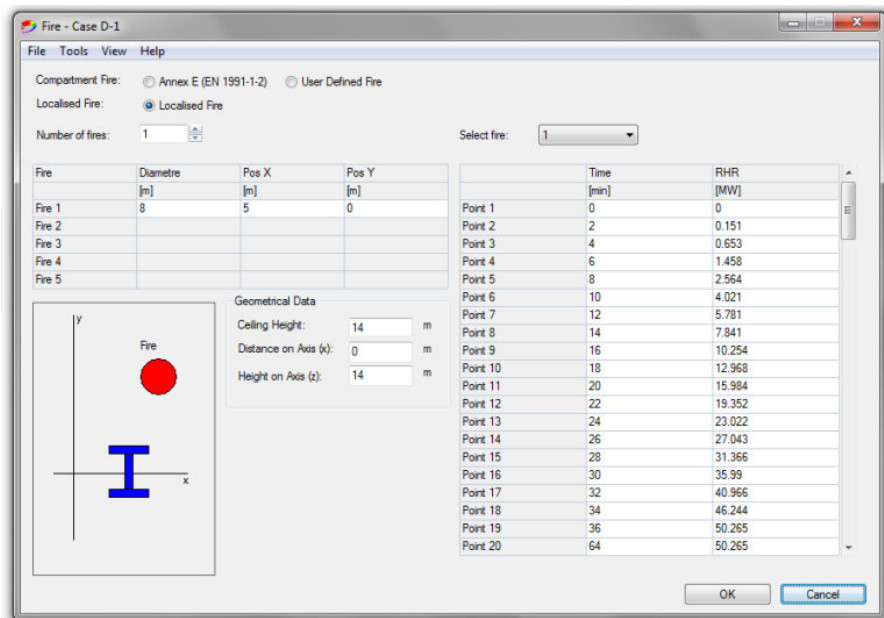


MODELACIÓ DE L'INCENDI

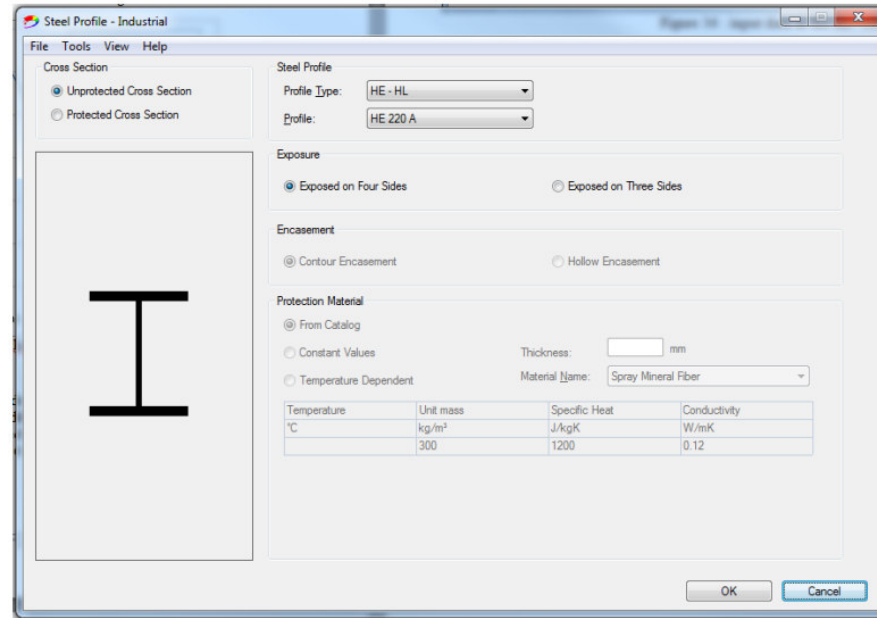
MODELS DE ZONES – OZONE – NAU INDUSTRIAL

OZONE

Foc



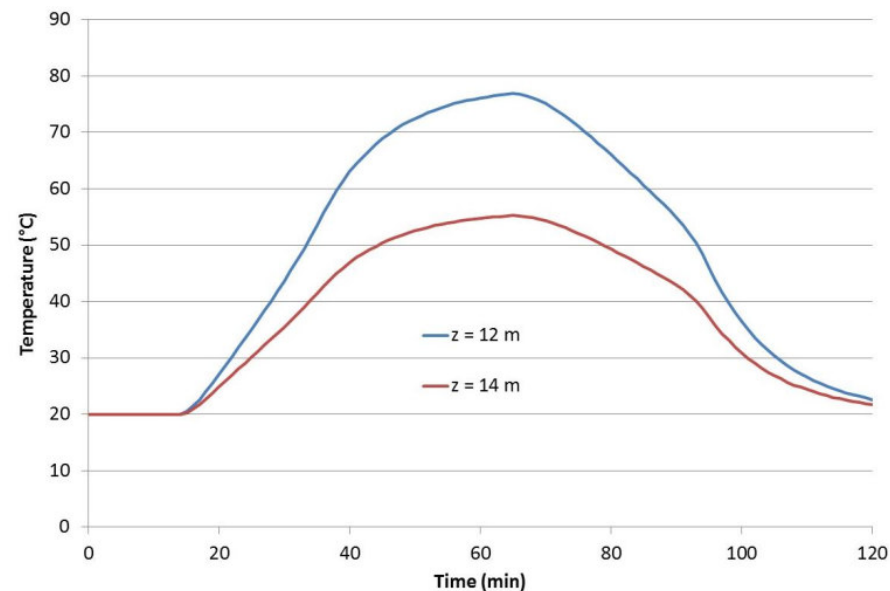
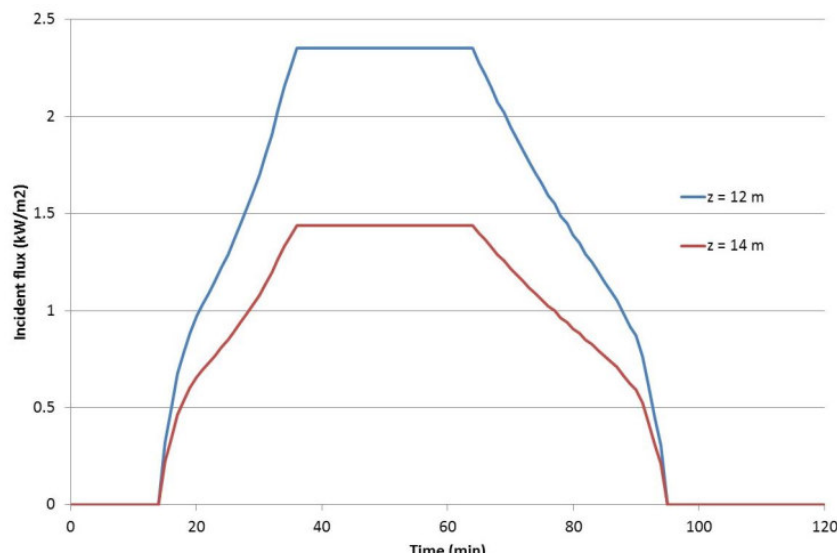
Perfil d'acer



MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE ZONES – OZONE – NAU INDUSTRIAL

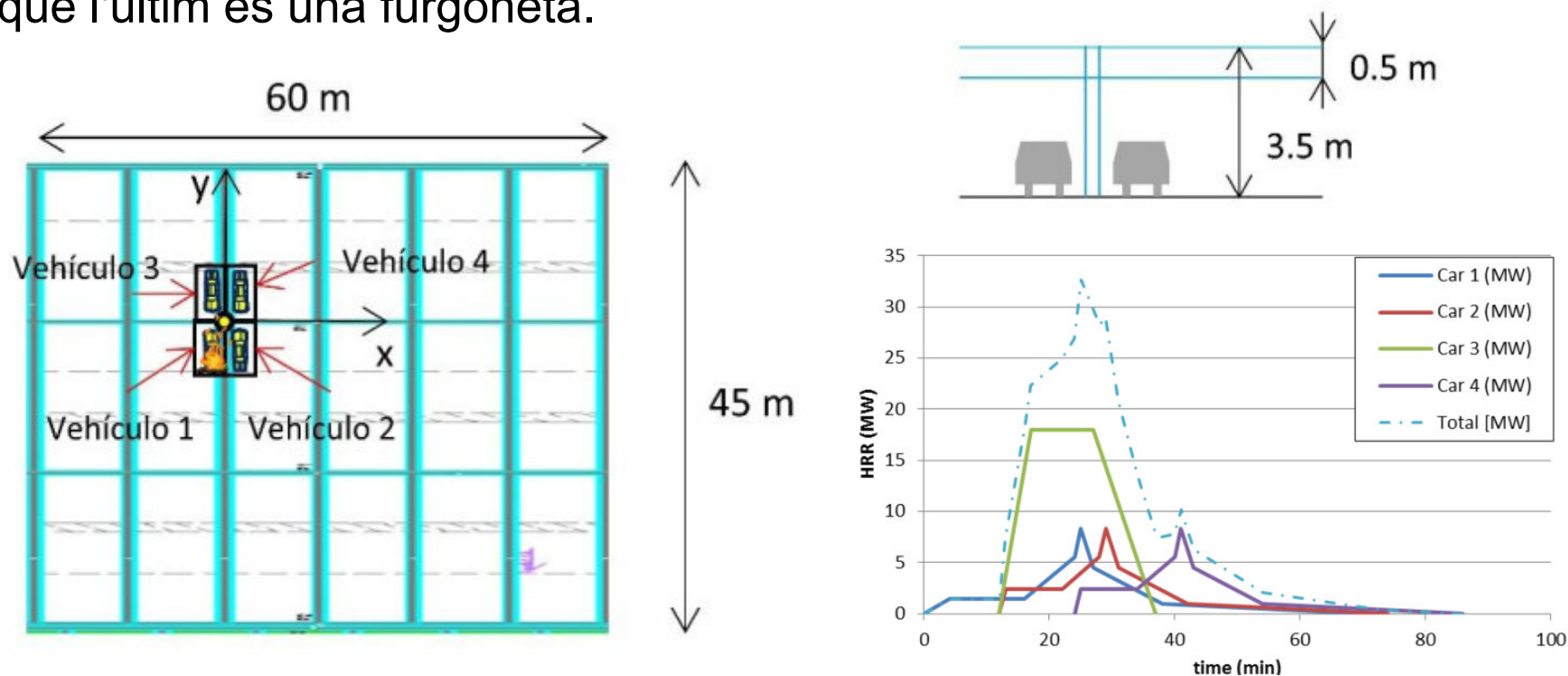
Amb un foc de 8 m de diàmetre i una taxa màxima d'alliberament de calor de 50 MW, l'alçada de la flama és de 9.7 m. Com que l'edifici és més alt que el plomall, les flames no impactaran contra el sostre. L'efecte del foc resultarà per tant reduït en termes d'accions tèrmiques, i les temperatures quedaran en la posició calculada de la gelosia entre 50°C i 80°C



MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE ZONES – OZONE – PÀRQUING OBERT

Les bigues principals tenen un cantell de 0.50 m. Les columnes del pàrquing estan constituïdes per perfils HEA 300. Les places de pàrquing tenen les dimensions estàndard de 2.5 m × 5 m; amb una superfície de 12.5 m², sent aquesta superfície equivalent a un foc localitzat de 4 m de diàmetre. L'escenari d'incendi contempla la ignició de quatre vehicles disposats al voltant d'una mateixa columna. Tres són vehicles grans, mentre que l'últim és una furgoneta.

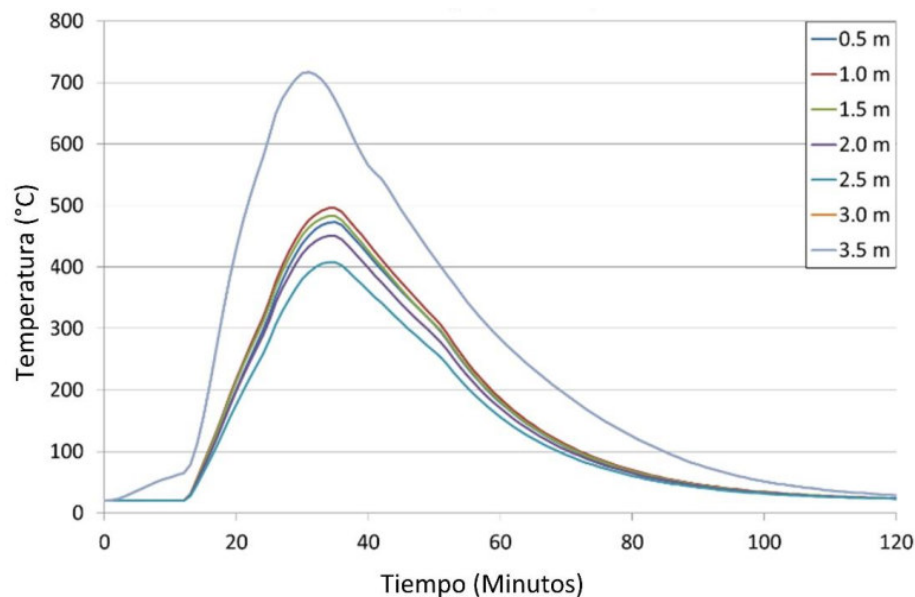
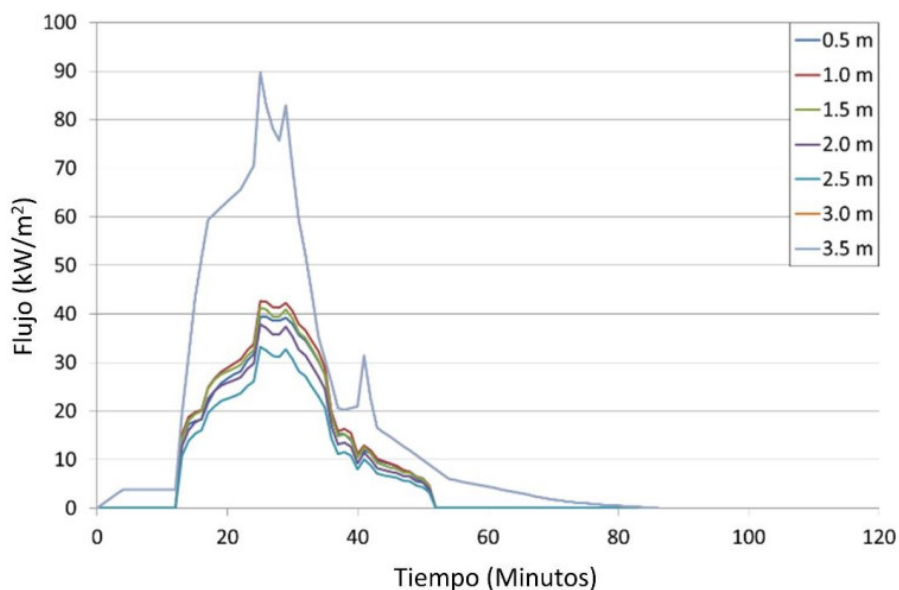


MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE ZONES – OZONE – PÀRQUING OBERT

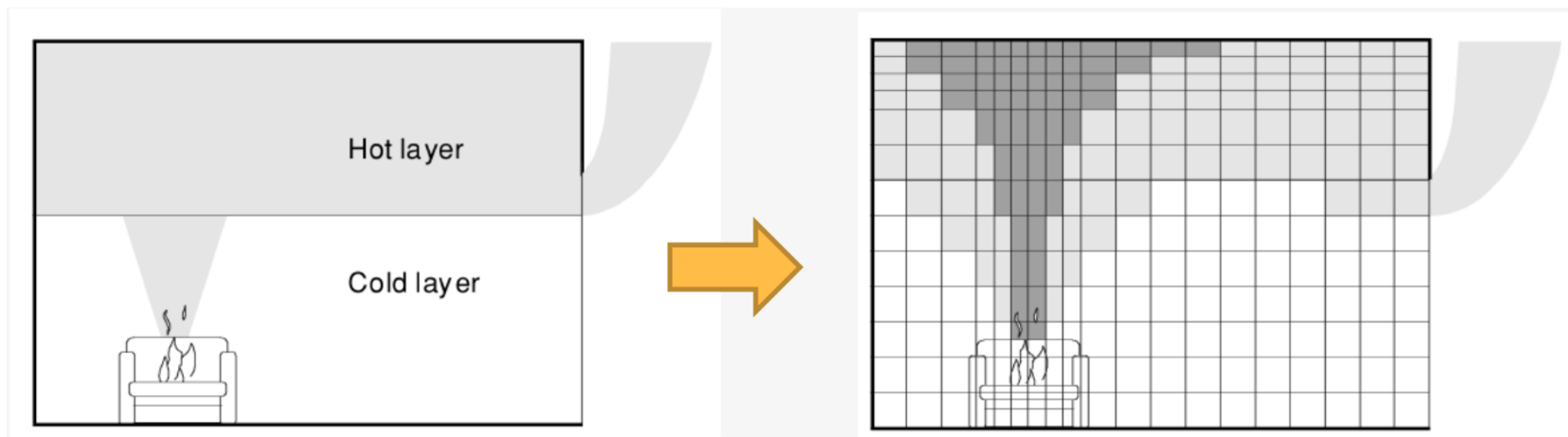
El programa proporciona gràficament la temperatura del tram de columna desitjat, a més de bolcar al fitxer de resultats les dades de temperatura i flux rebut.

Fora de la capa de fums calents, la temperatura màxima és de 500°C a 1 m d'alçada, mentre que a la capa de fums calents (entre 3.0 mi 3.5 m) s'assoleixen 718°C.



MODELACIÓ DE L'INCENDI

COMPARACIÓ MODELS DE ZONA I MODELS DE CAMP



Un o dos volums de control
Correlacions per la massa del plomall
Correlacions per la transferència de calor
Correlacions per els fluxos per obertures

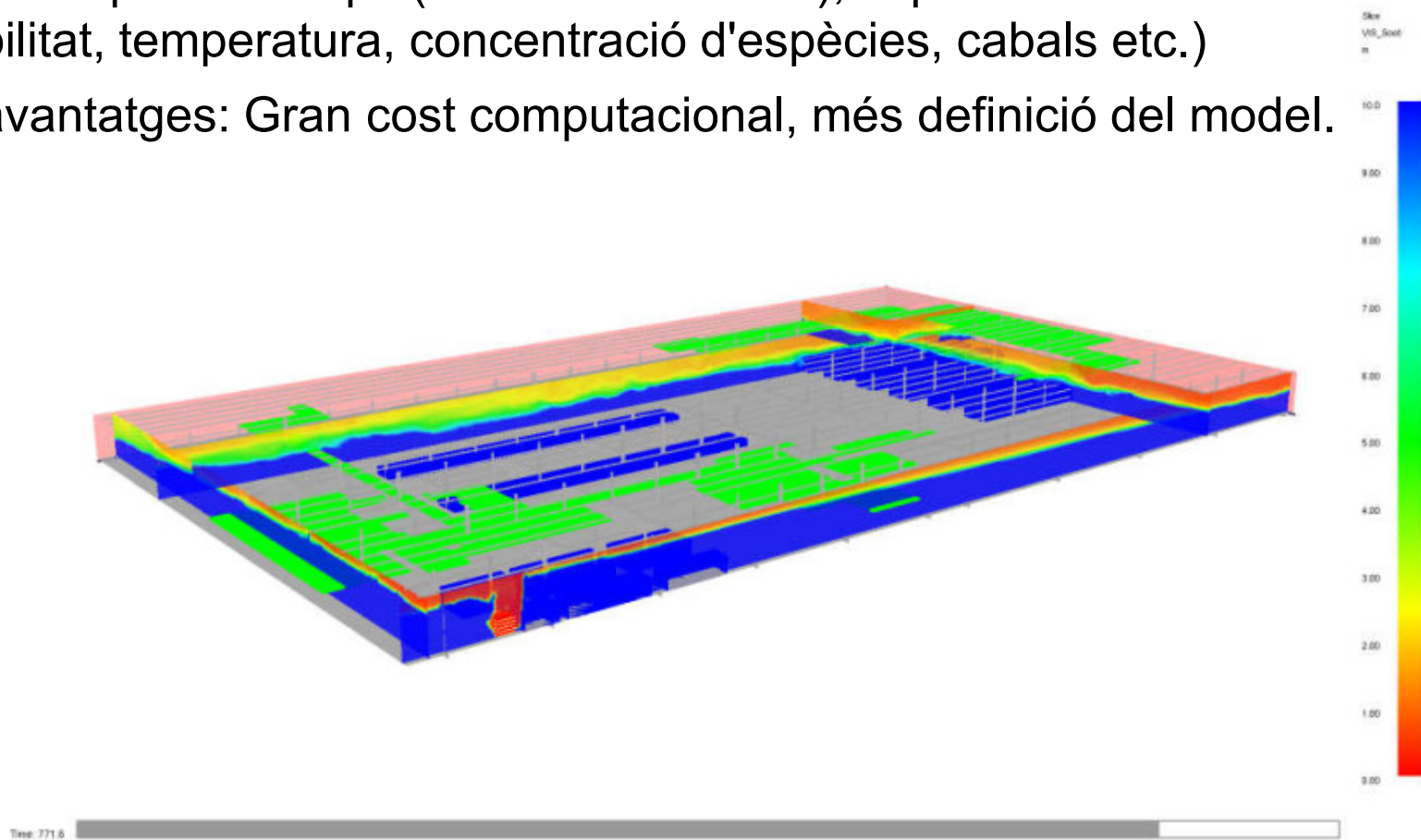
Molts volums de controls (malla)
Equacions de Navier-Stokes

MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE CAMP (CFD)

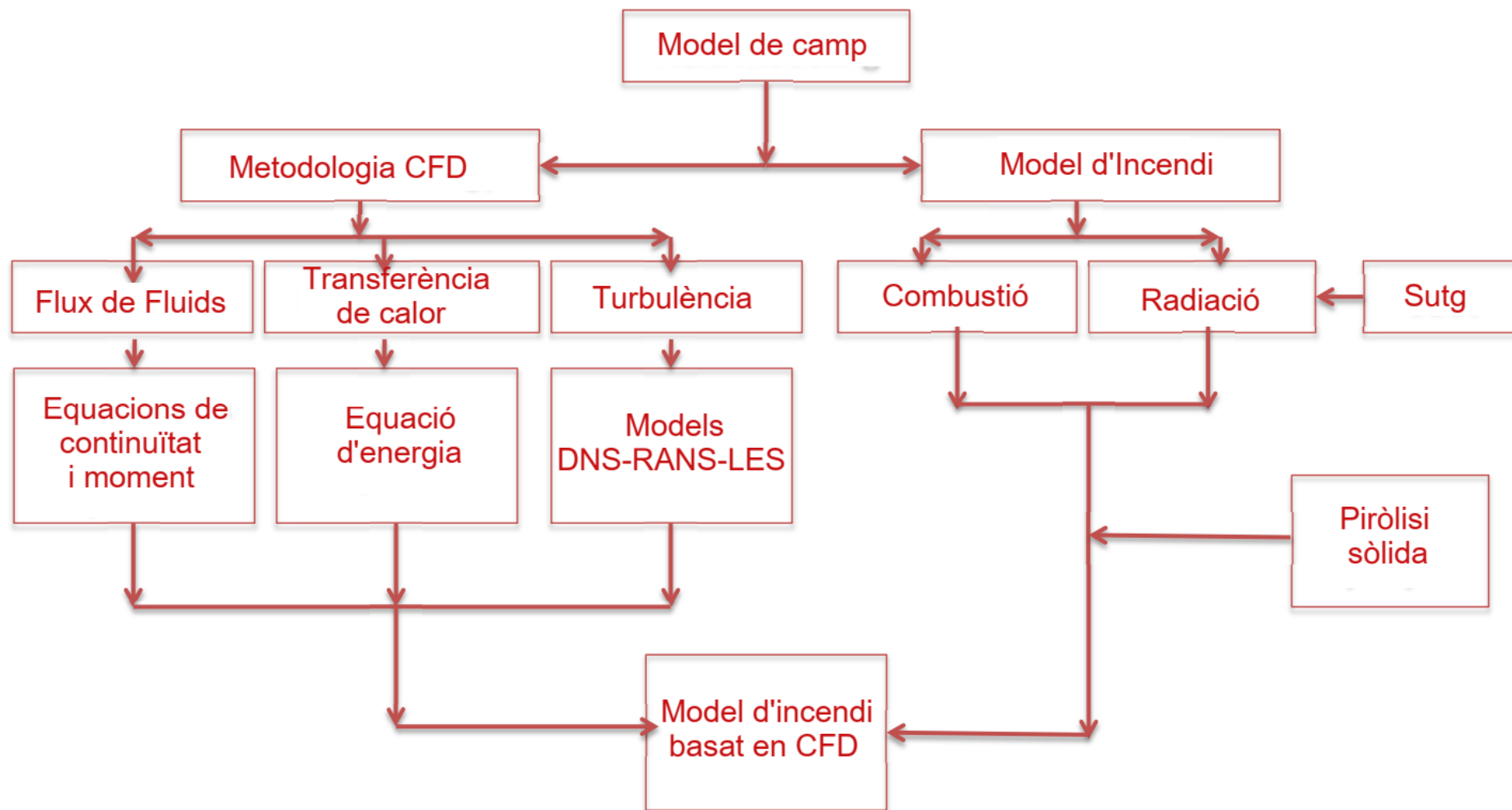
Avantatges: Permeten geometries complexes, distribució irregular combustibles, avaluen les magnituds de la dinàmica tèrmica i de fluids del foc en l'espai i el temps (mida de les cel·les), i aporten més variables (visibilitat, temperatura, concentració d'espècies, cabals etc.)

Desavantatges: Gran cost computacional, més definició del model.



MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE CAMP (CFD)



MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE CAMP

<https://www.firemodelsurvey.com/>

Dona links per trobar els programes i informació



Actively Supported

FDS (2013) (2007) (2002)	FIRE3D (2013)
FireFOAM	FLUENT
KAMELEON FireEx (2014) (2013) (2002)	KOBRA-3D (2007) (2002)
PHOENICS/FLAIR (2013) (2002)	SMARTFIRE (2007) (2002)
SOLVENT (2014) (2002)	STAR-CD (2002)

Archived

12

MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE CAMP – FDS – NIST

RESULTATS DEL MODEL

FASE GAS

Temperatura

Velocitat

Concentració d'espècies (CO, CO₂, N₂, vapor d'aigua)

Concentració del fum i estimació de visibilitat

Pressions

Velocitat de Cessió de Calor per unitat de volum

Fracció de mescla (aire/combustible)

SUPERFÍCIES SÒLIDES

Temperatura interior i superficial

Flux de calor: radiació i convecció

Velocitat de combustió

Massa de gotes d'aigua per unitat d'àrea

PARÀMETRES GLOBALS

HRR total

Temps activació ruixadors i detectors

Fluxos de massa i energia a través d'obertures i sòlids

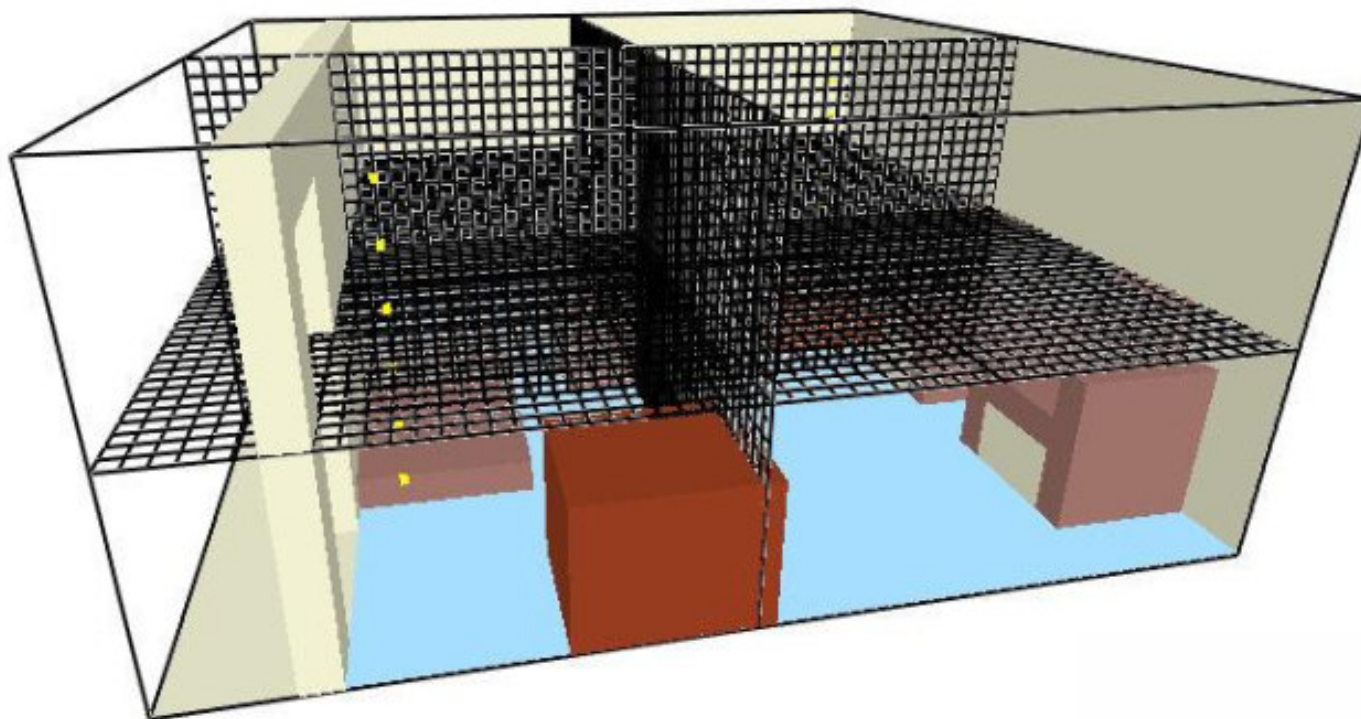
MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE CAMP – FDS – NIST

GEOMETRIA

Subdivideix l'espai en una malla rectilínia on cada cella és un volum de control.

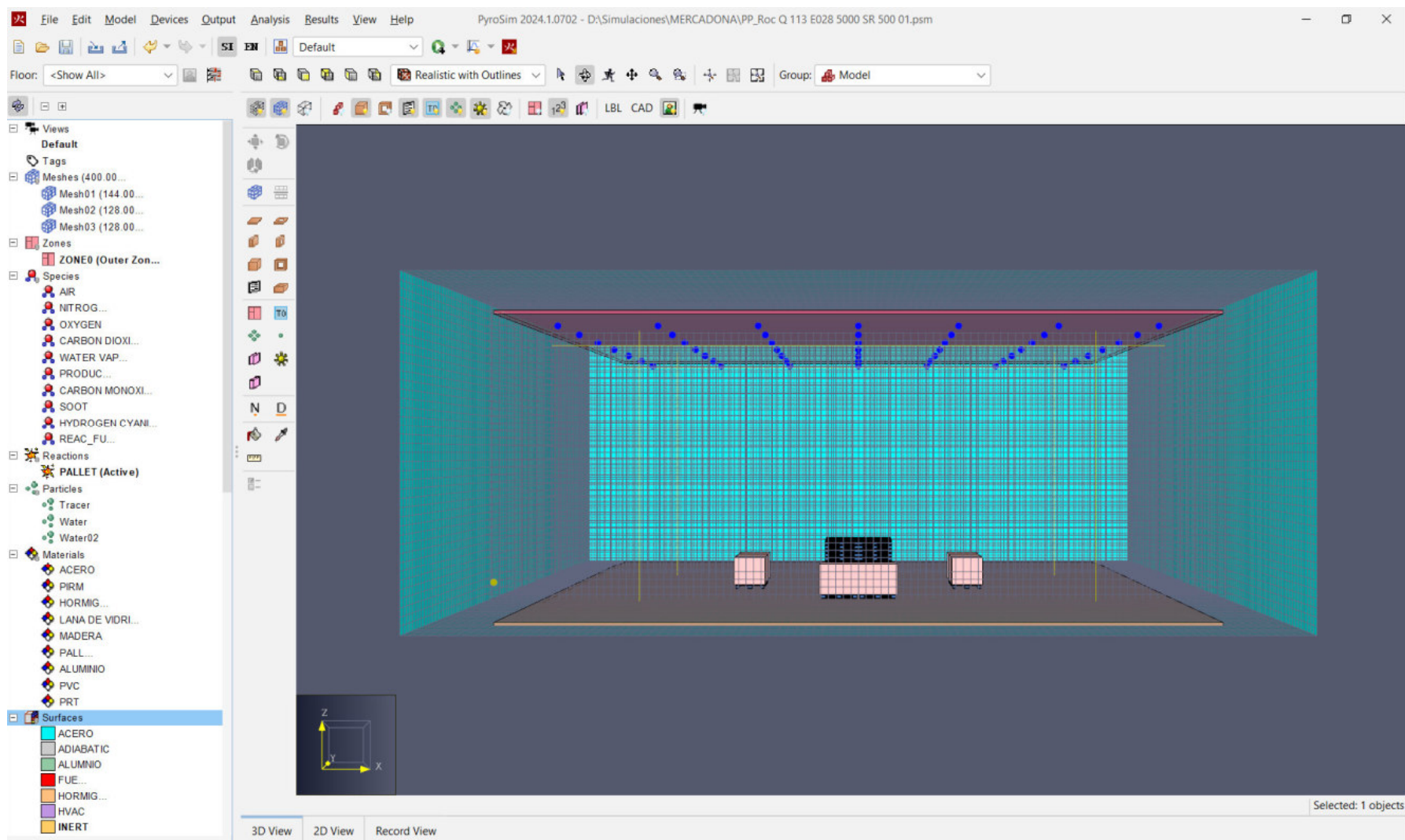
L'usuari prescriu obstruccions rectangulars que estan forçades a adaptar-se a la malla.



MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE CAMP – FDS – EXEMPLE PALETS PLÀSTICS

PYROSIM - Programa d'ajuda per la interacció amb el FDS.



MODELACIÓ DE L'INCENDI

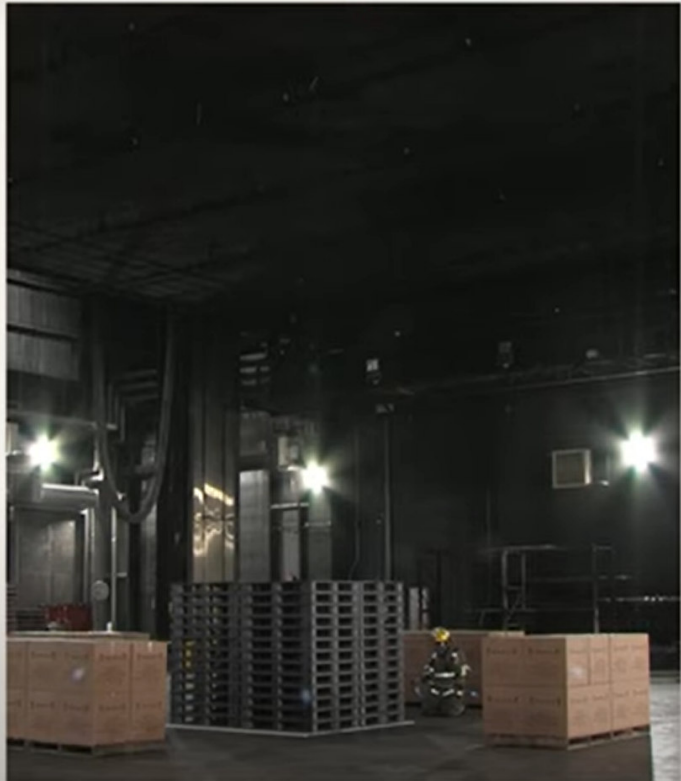
MODELS DE CAMP – FDS – EXEMPLE PALETS PLÀSTICS

<https://www.youtube.com/watch?v=1uXhOUQRWGk>

Compliment de la norma UNE EN 12845 per Cat III

Storage of Unexpanded Plastic

INCIDENTAL STORAGE OF UNCARTONED UNEXPANDED PLASTIC FIRE TEST



Test Parameters

Data Sheet 3-26: Low Piled Uncartoned Unexpanded Plastic Fire Test

Commodity: Plastic Pallets (UUP)

Configuration as tested

- Storage height: 6 ft (1.8 m)
- Four stacks of pallets 64 ft² (6 m²)
- Ceiling height: 30 ft (9.0 m)
- Adjacent fuel separated by 8 ft (2.4 m) aisles

Protection as tested

- Ceiling design K11.2 (K160) at 7 psi (0.5 Bar)
 - This provides a 0.3 gpm (12 mm/min) density
 - This is the recommended density for a HC-3 occupancy
- 10 ft (3 m) x 10 ft (3 m) spacing
- Quick response sprinklers rated at 165°F (74°C)

0:15 / 2:32 Desliza hacia abajo para ver más detalles

MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE CAMP – FDS – EXEMPLE PALETS PLÀSTICS




MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE CAMP – FDS – EXEMPLE PALETS PLÀSTICS

Tot i estar dissenyat segons norma, el sistema no ha controlat el foc.

Storage of Unexpanded Plastic

INCIDENTAL STORAGE OF UNCARTONED UNEXPANDED PLASTIC FIRE TEST



Results

- A high heat release fire opened all 49 ceiling sprinklers.
- However, the fire did not spread to adjacent fuel separated by 8 ft (2.4 m) aisles.
- Despite the size of the fire, with limited commodity (64 ft²/6 m²) and aisles provided, fire damage is limited to the initial fuel load, and is unlikely to lead to an uncontrolled fire.
- Good management of in-process storage is imperative.
- For larger areas of low piled storage, protection guidance is available in FM Global Data Sheet 3-26.

2:16 / 2:32

Desliza hacia abajo para ver más detalles

MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE CAMP – FDS – EXEMPLE PALETS PLÀSTICS

5 mm/min?

Tabla 1 - Alturas de almacenamiento máximas para protección R03

Categoría de almacenamiento	Altura de almacenamiento máxima ^a m	
	Almacenamiento libre o en bloques (ST1 - véase 6.3.2)	Configuraciones de almacenamiento (ST2 - ST6 ^b - véase 6.3.2)
Categoría I	4,0	3,5
Categoría II	3,0	2,6
Categoría III	2,1	1,7
Categoría IV	1,2	1,2

Tabla 3 - Criterios de diseño para RL, RO y REP

Clase de riesgo	Densidad de diseño mm/min	Área de operación m ²	
		Mojada o acción previa	Seca o alterna
RL	2,25	84	No permitida Se usa R01
R01	5,0	72	90
R02	5,0	144	180
R03	5,0	216	270
R04	5,0	360	No permitida Se usa REP1
REP1	7,5	260	325
REP2	10,0	260	325
REP3	12,5	260	325
REP4	diluvio (véase la NOTA)		
NOTA Necesita consideración especial. Los sistemas de diluvio no están cubiertos por esta norma.			

MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE CAMP – FDS – EXEMPLE PALETS PLÀSTICS

7,5 mm/min?

Tabla 3 – Criterios de diseño para RL, RO y REP

Clase de riesgo	Densidad de diseño mm/min	Área de operación m ²	
		Mojada o acción previa	Seca o alterna
RL	2,25	84	No permitida Se usa RO1
RO1	5,0	72	90
RO2	5,0	144	180
RO3	5,0	216	270
RO4	5,0	360	No permitida Se usa REP1
REP1	7,5	260	325
REP2	10,0	260	325
REP3	12,5	260	325
REP4	diluvio (véase la NOTA)		
NOTA Necesita consideración especial. Los sistemas de diluvio no están cubiertos por esta norma.			

MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE CAMP – FDS – EXEMPLE PALETS PLÀSTICS

$$13 \text{ mm/min?} = 7,5 + 2,5 + 3 * 1 \text{ ja que } 9 - 1,8 - 4 = 3,2 \text{ m}$$

Tabla 4 – Criterios de diseño para REA con protección solo en cubierta o techo

Configuración de almacenamiento	Altura máxima permitida de almacenamiento				Densidad de diseño	Área de operación [sistema mojado o de acción previa (véase la NOTA)]
	m				mm/min	m ²
	Categoría I	Categoría II	Categoría III	Categoría IV		
ST1 Libre o en bloques	5,3	4,1	2,9	1,6	7,5	260
	6,5	5,0	3,5	2,0	10,0	
	7,6	5,9	4,1	2,3	12,5	
		6,7	4,7	2,7	15,0	
		7,5	5,2	3,0	17,5	
			5,7	3,3	20,0	300
			6,3	3,6	22,5	
			6,7	3,8	25,0	
			7,2	4,1	27,5	
				4,4	30,0	

7.2.2.3 Espacio libre excesivo

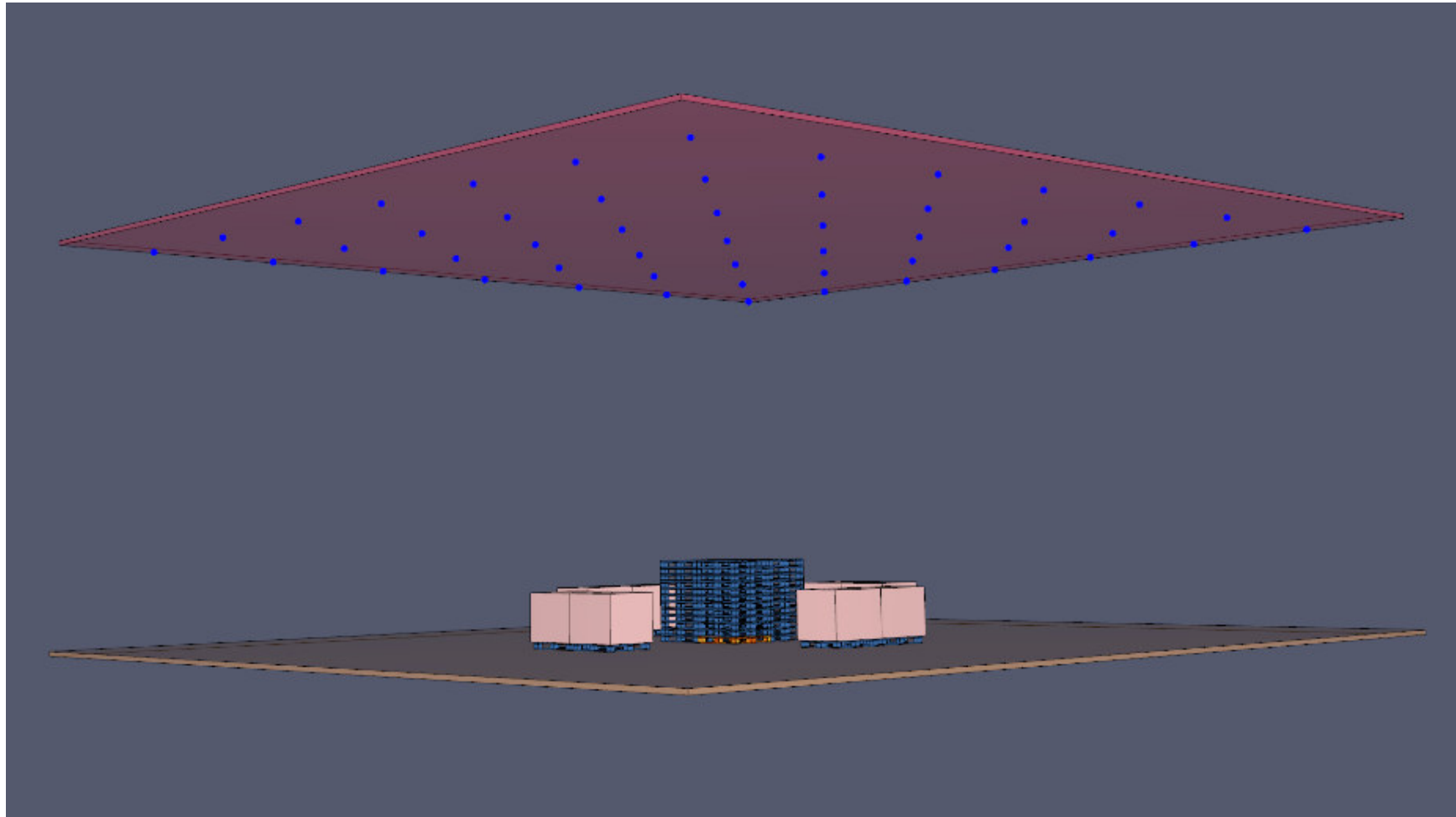
Los valores de la tabla 4 se deben usar para determinar el espacio libre. Donde el espacio libre, distancia entre la altura de almacenamiento y el deflector del rociador de techo, excede de 4 m, se debe aplicar una de las opciones siguientes:

Opción 1: se aumenta la densidad para el primer metro excesivo en 2,5 mm/min. Para cada metro adicional se aumenta la densidad de agua en 1 mm/min. Se debe usar un factor K de mínimo K115.

MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE CAMP – FDS – EXEMPLE PALETS PLÀSTICS

Model que geomètricament es correspon amb l'assaig.



MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE CAMP – FDS – EXEMPLE PALETS PLÀSTICS

Pallets plàstics (no expandit): 500 kW/m²

Foc propagat per temperatura ignició: 350°C

Coeficient d'extinció segons Yu, Lee, Kung: 0,28 m²/(kg.s)

$$Q = Q_0 e^{-k(t-t_0)} \quad \text{siendo} \quad k = c_1 w'' - c_2$$

w'' = densidad efectiva por superficie expuesta en kg/(m²-s)

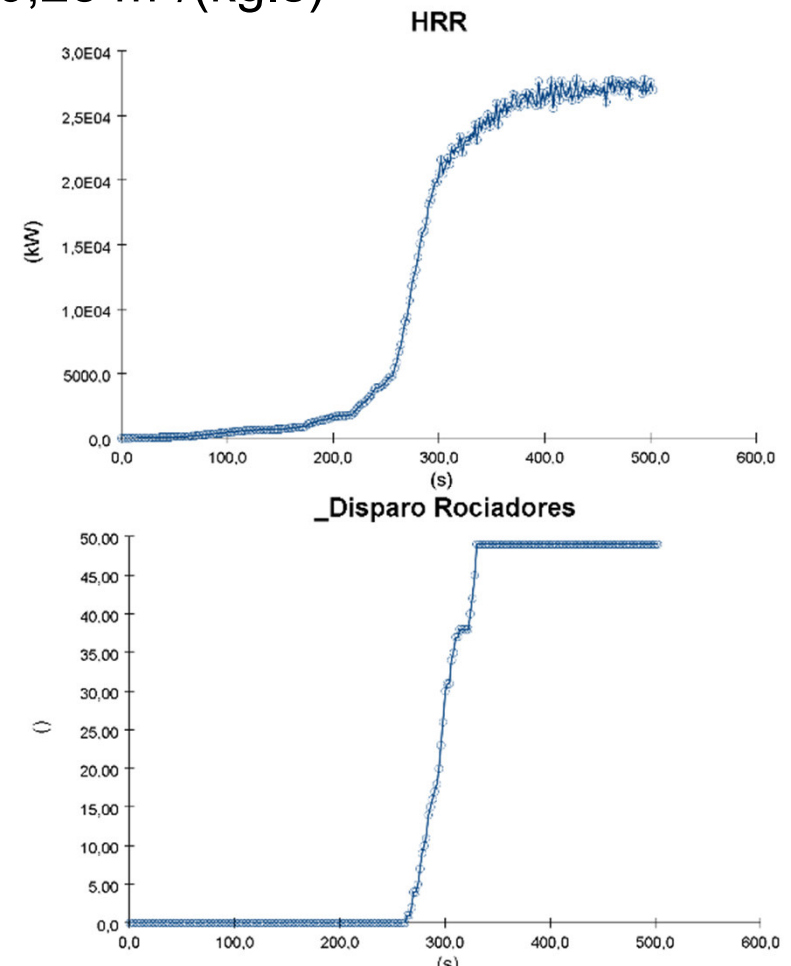
Tipo de mercancía	c_1	c_2	Rango de aplicación de w''	
Clase II	0,536	0,0040	0,006	0,024
Grupo A Plásticos	0,716	0,0131	0,012	0,041

Resultats:

La potencia màxima arriba a 26 MW

*S'activen tots els 49 ruixadors → **No OK***

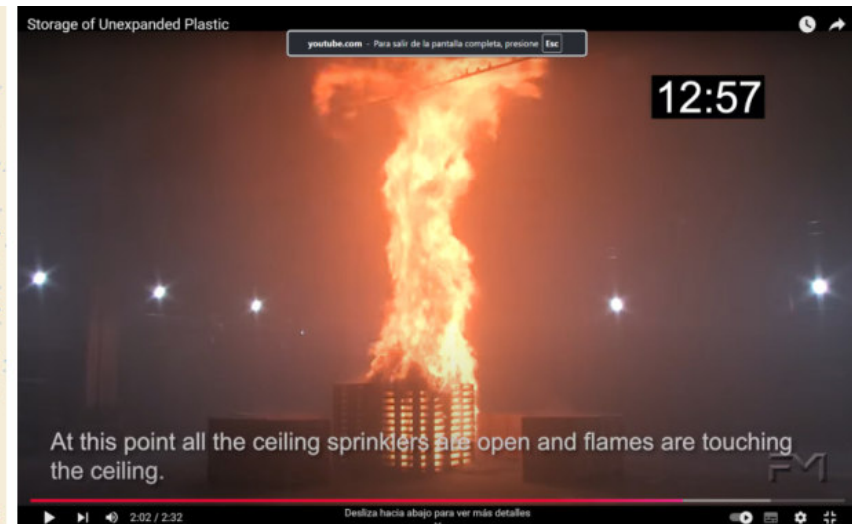
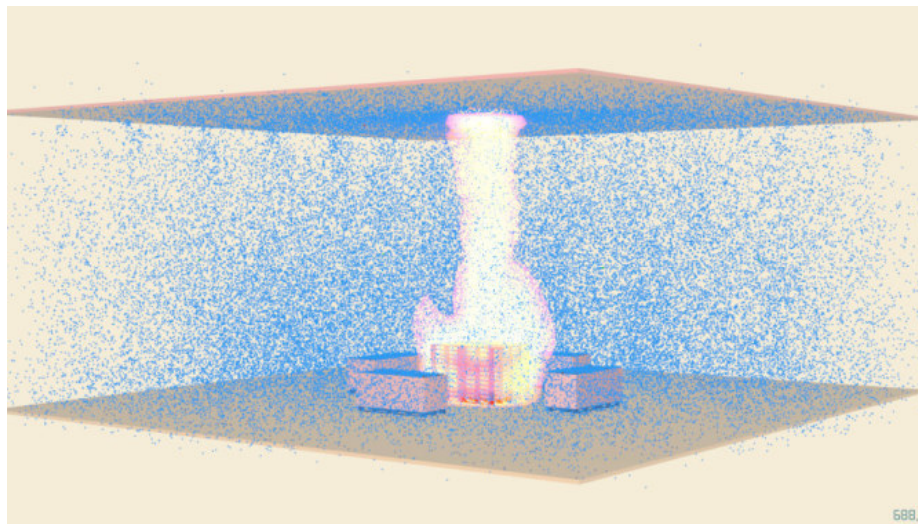
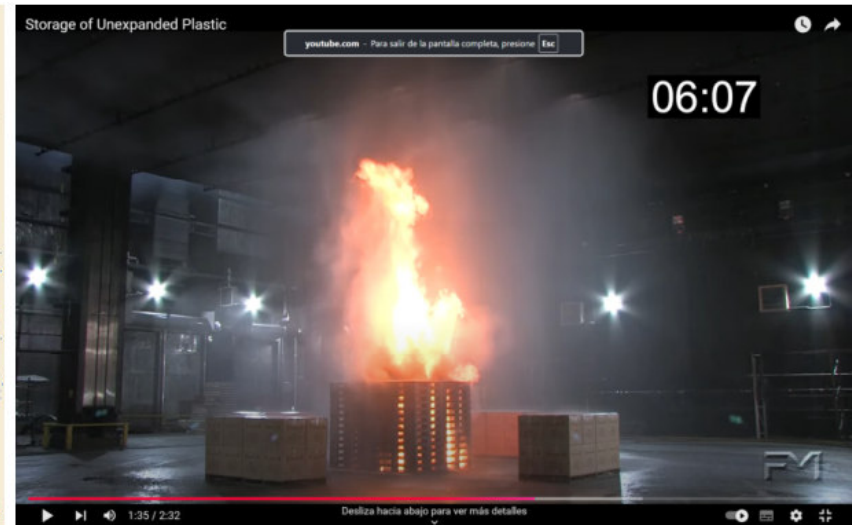
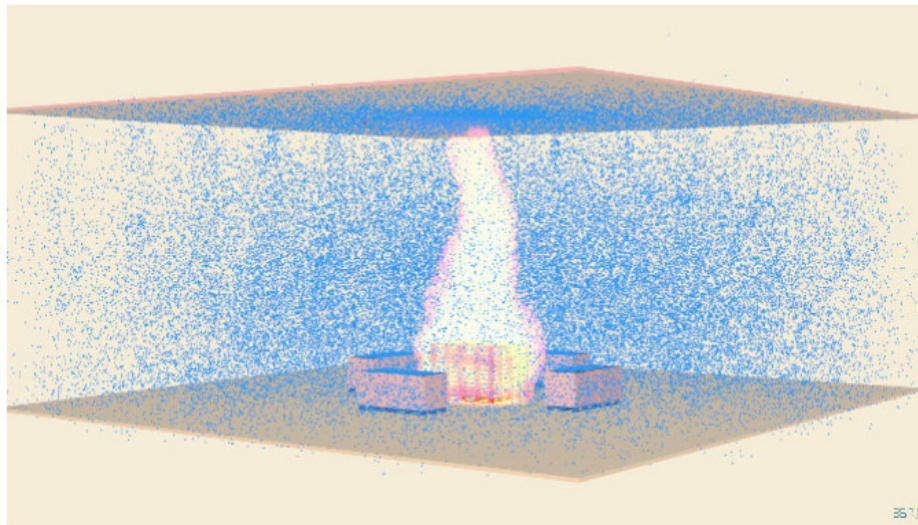
Hi ha correspondència total amb l'assaig.



MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE CAMP – FDS – EXEMPLE PALETS PLÀSTICS

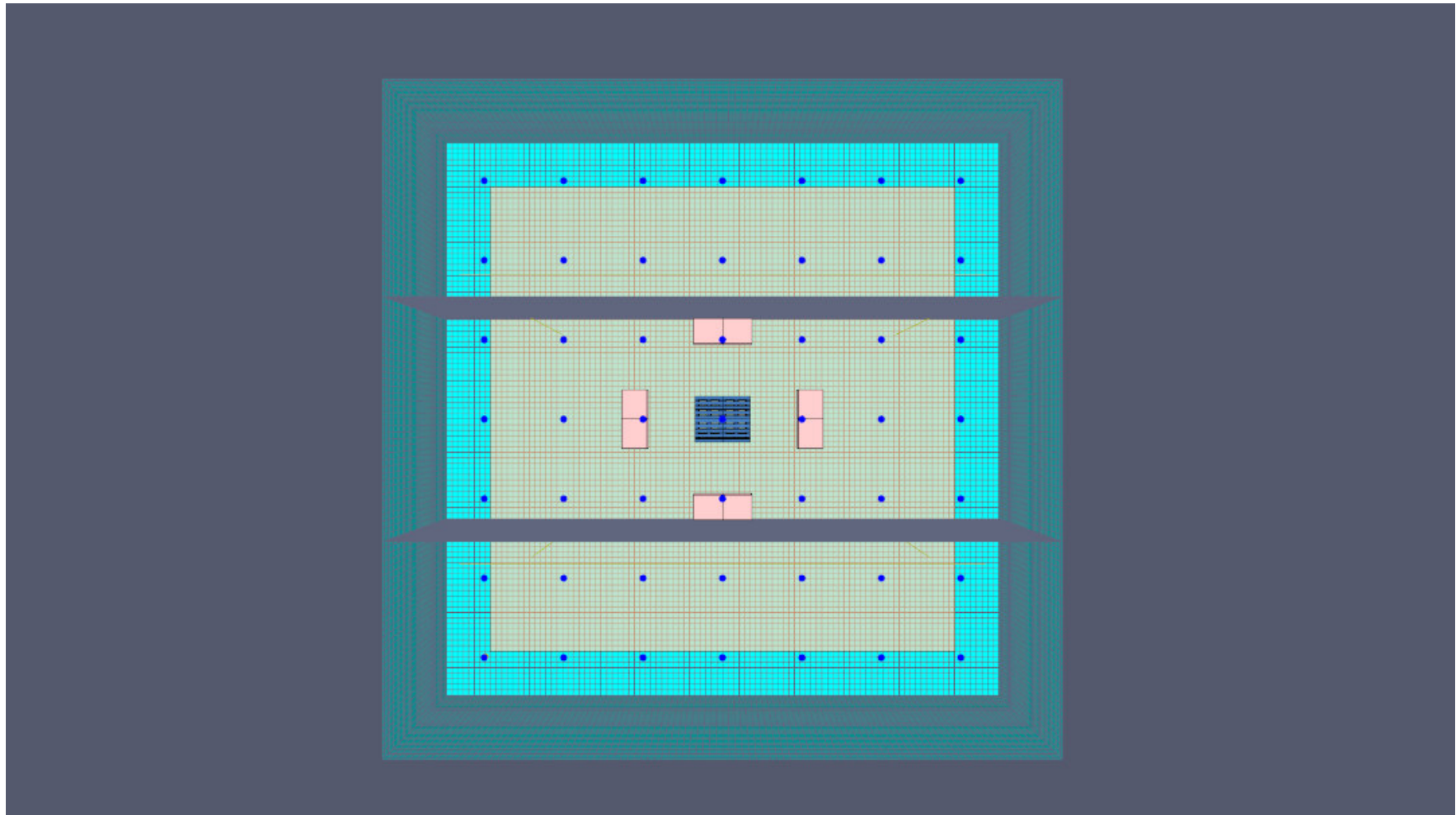
Nota: Els fums no es mostren per claredat i comparació



MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE CAMP – FDS – EXEMPLE PALETS PLÀSTICS

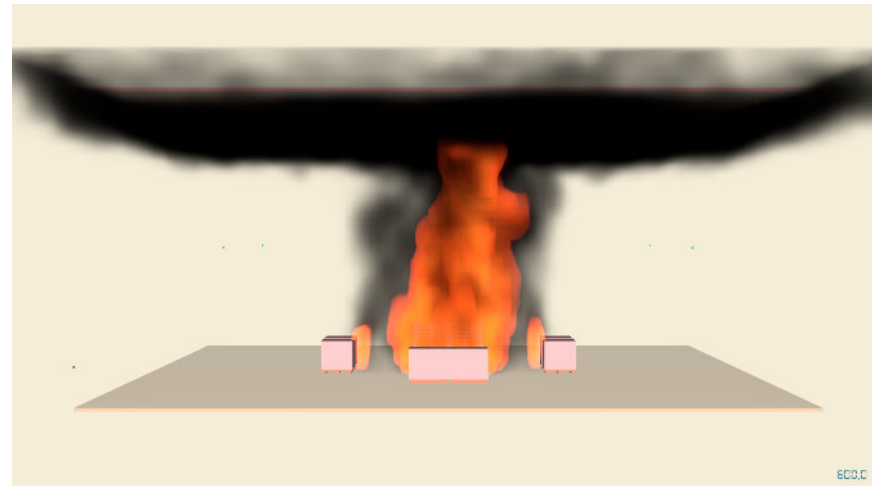
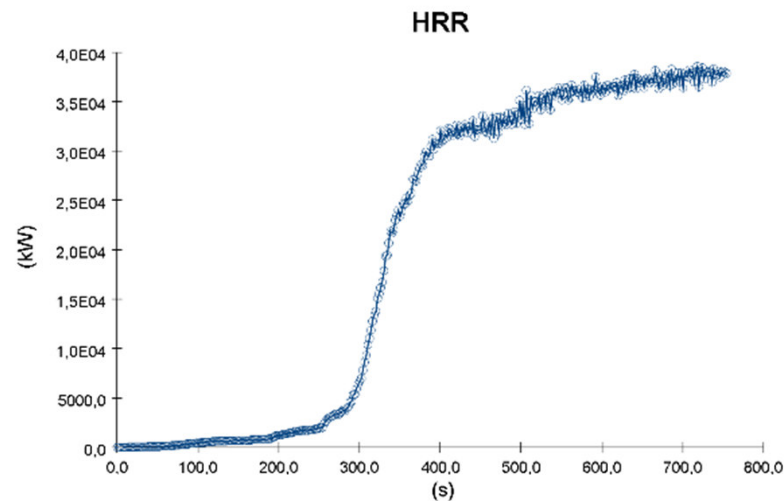
Tots els 49 ruixadors s'activen i el foc no es propaga a les caixes de cartró al altre cantó del passadissos de 2,4 m. *Igual que a l'assaig.*



MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE CAMP – FDS – EXEMPLE PALETS PLÀSTICS

2) Què hagués passat si no hi funcionen els ruixadors o no en hi ha? Refem la simulació treient l'aigua dels ruixadors i ...



El foc de 36 MW es propaga a la mercaderia més enllà dels passadissos.

Per tant, tot i que el sistema de ruixadors no és capaç de apagar ni controlar l'incendi, com a mínim mulla la mercaderia al voltant dels passadissos limitant els danys. Recomanacions de l'estudi:

1. *Incrementar la densitat de disseny per aquest tipus de risc.*
2. *Obligar a mantenir passadissos cada certa superfície de material.*

MODELACIÓ DE L'INCENDI

MODELS DE CAMP – FDS – EXEMPLE PALETS PLÀSTICS

3) Quina densitat controlaria l'incendi?

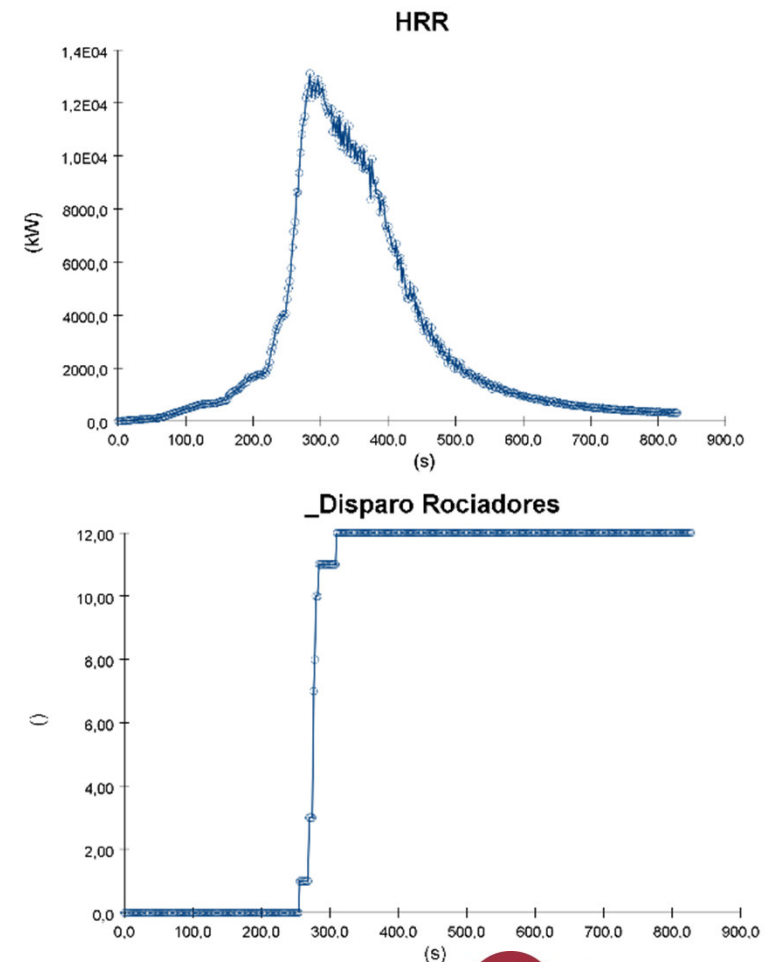
Segons NFPA 13 en un risc d'aquestes característiques caldria 24,5 mm/min amb ruixadors K240 i un àrea de operació de 185 m² (21 ruixadors).

Doncs provem-ho.

Resultats:

La potencia màxima arriba a 13 MW

I s'activen 12 ruixadors → OK



MODELACIÓ

CONCLUSIÓ

- ❑ L'atribut més important dels **Models d'Incendis** ha de ser la seva **capacitat per predir, de manera rigorosa i realista, el comportament de l'incendi dins uns límits preestablerts.**

GRÀCIES PER LA SEVA ATENCIÓ

28/11/2024

F. Xavier Querol Esparch
Director Tècnic



Gerència de Serveis d'Habitatge, Urbanisme i Activitats
Oficina d'Activitats Regulades i Programes en Protecció Civil

Tel. 934049312

Correu electrònic. o.activitats@diba.cat

<https://www.diba.cat/web/hua>

Disseny Prestacional

Modelació de l'Evacuació

28/11/2024

F. Xavier Querol Esparch
Director Zona Nord-Est



Diputació
Barcelona

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

ESTRATÈGIES D'EVACUACIÓ DE PERSONES

- **Evacuació simultània** de l'edifici.
- **Refugi en el lloc.** Els ocupants amb una capacitat limitada per moure's es mantenen al seu lloc durant l'esdeveniment (residències, hospitals, presons, ...). Aplicació de mesures de protecció activa i passiva.
- **Reubicació** dels ocupants d'una zona de perill potencial a una àrea de refugi protegida o un altre lloc segur.
- **Evacuació per fases i parcials** combinen l'evacuació o la reubicació d'una part dels ocupants (aquells que estan en perill immediat per l'incident) amb la possibilitat que els ocupants allunyats d'un incident puguin protegir-se al lloc. Ajuda a optimitzar l'ús dels components de sortida.
- **Vies de sortida i zones de refugi** adaptades a les necessitats de les persones amb discapacitat.
- **Estratègies d'evacuació prestacionals.** Adaptades als diferent escenaris. Apliquen els mateixos principis ja explicats en la primera exposició sobre estudis prestacional. Així com hi ha escenaris d'incendi, també en hi ha escenaris d'evacuació.

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

FACTORS HUMANS QUE AFECTEN L'EVACUACIÓ

- **Familiaritat** amb l'edifici.
- **Formació.**
- **Edat** (ancians, adults, nens)
- **Condicions físiques i psicològiques** (Malalts, capacitats disminuïdes, ...).
- **Vulnerabilitats.**
- **Grau d'intoxicació** (begudes alcohòliques, fàrmacs, etc).
- **Desperta o adormits.**
- **Agrupacions socials** (famílies, parelles, companys, etc)
- **Rols** (amfitrions, convidats, gerents, subordinats, etc).

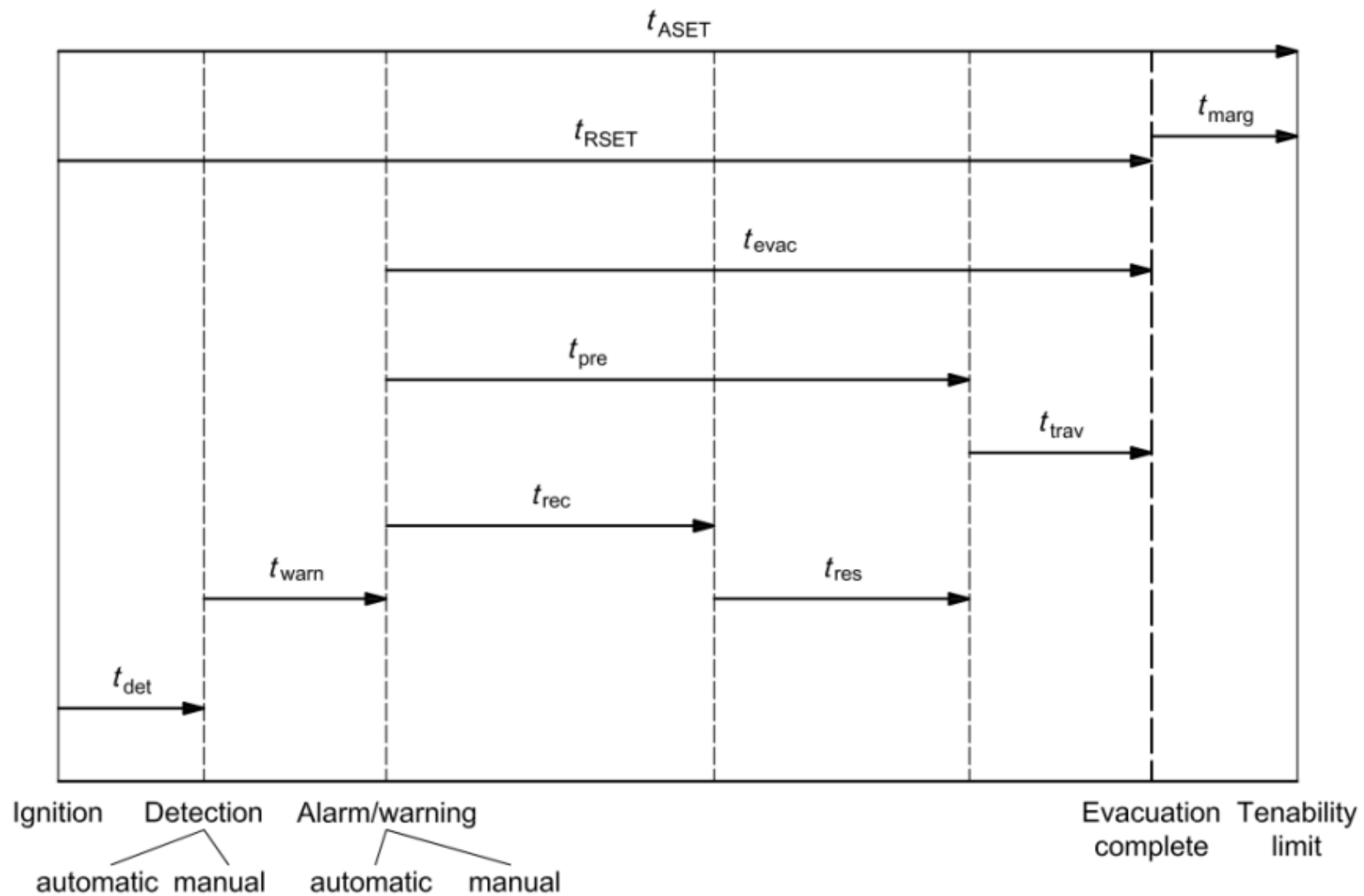
MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

REACCIONS HUMANES QUE AFECTEN L'EVACUACIÓ

- Interpretar els senyals d'alarma.
- Cercar confirmació visual del perill (presència del foc o fum,...)
- Cercar confirmació del perill per altres individus.
- Investigar.
- Reconèixer o no la situació de perill.
- Prendre's temps per decidir.
- Aturar o no l'activitat en curs.
- Comunicar-se per donar o rebre instruccions.
- Canviar-se d'indumentària.
- Recollir estris personals (roba, joies, ordinadors, papers,...)
- Intentar reduir el perill (tapar esquerdes, extingir el foc, protegir-se,...).
- Sol·licitar ajuda.
- Advertir altres.
- Condició de pànic o xoc.

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

COMPONENTS DEL TEMPS D'EVACUACIÓ (ISO-TR 16738:2009)



MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

COMPONENTS DEL TEMPS D'EVACUACIÓ

- Temps disponible per l'evacuació segura (t_{ASET})
- Temps requerit per l'evacuació (t_{RSET})
 - Temps de detecció (t_{det}).
 - Temps d'alarma (t_{warn}).
 - Temps de pre-moviment (t_{pre}).
 - Temps de reconeixement (t_{rec}).
 - Temps de resolució a iniciar l'evacuació (t_{res}).
 - Temps de moviment (t_{tra}).
 - Temps de desplaçament.
 - Temps de formació de cues.
 - Temps de flux (a través de portes,...).
- Marge de temps (t_{marg})

Metodologies: PD 7974/ SFPE ...

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

EINES

- Models analítics basats en velocitats i fluxos (simulació “hidràulica”).
- Models complexos basats en mètodes numèrics per ordinador.

Tipus d'anàlisi

- Estimació del temps necessari per a l'evacuació en condicions segures
 - RSET = Temps requerit
 - ASET = Temps disponible.
 - $ASET - RSET = \text{marge de seguretat}$
- Ajuda a entendre com es podria fer una evacuació en entorns molt complexos.
- Ajuda a decidir accions en els plans de gestió d'emergències.

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MESURES CORRECTORES O COMPENSATÒRIES SI NO S'ARRIBEN A COMPLIR ELS OBJECTIUS

- Millorar la sensibilitat del sistema de detecció.
- Millorar l'efectivitat dels sistemes d'extinció.
- Millorar l'efectivitat dels sistemes de protecció passiva.
- Millorar la reacció dels ocupants (formació, simulacres, personal seguretat).
- Augmentar el nombre i/o la capacitat de sortides d'evacuació.
- Incrementar zones de refugi.
- Modificar l'estratègia d'evacuació.
- ...

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

ASET - CFPA-E Guideline No 19:2009 F

Table 1 Tenability limits for a radioactive and convective heat

Mode of heat transfer	Intensity	Tolerance time
Radiation	< 2,5 KW/m ²	> 5 min
	2,5 KW/m ²	30 s
	10 KW/m ²	4 s
Convection	<60 °C 100% saturated	> 30 min
	100 °C < 10% H ₂ O	8 min
	110 °C < 10% H ₂ O	6 min
	120 °C < 10% H ₂ O	4 min
	130 °C < 10% H ₂ O	3 min
	150 °C < 10% H ₂ O	2 min
180 °C < 10% H ₂ O	1 min	

Source: PD 7974-6:2004 "Human factors: Life safety strategies –Occupant evacuation, behaviour and condition"

IDHL: "Immediate Dangerous to Life and Health", 30 minuts exposició

Table 1 Most common combustion products I.D.H.L. values

Substance	Formula	I.D.H.L. (ppm)
Carbon monoxide	CO	1200
Carbon dioxide	CO ₂	40000
Hydrocyanic acid	HCN	50
Ammonia	NH ₃	300
Hydrochloric acid	HCL	50

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

COMPLICACIONS DEL MODEL D'EVACUACIÓ

Multituds, varietat de persones (gen gran, nens, capacitat reduïda, cadires de rodes, desconeixent l'entorn), cues en portes o escales, bloqueig de sortides, ...



PEDESTRIAN QUEUE IN THE C TO D RANGE



MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

FACTORS QUE DEFINEIXEN UN ESCENARI D'EVACUACIÓ

CFPA_E_Guideline_No_19_2009

1. Tipus d'ocupació.
2. Sistema d'alarma.
3. Complexitat de la construcció.
4. Sistema de gestió de la seguretat.

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

FACTORS QUE DEFINEIXEN UN ESCENARI D'EVACUACIÓ

1. Tipus d'ocupació.

Table 1 Occupant Category

Category	Occupant alertness	Occupant familiarity	Occupant density	Enclosures/complexity	Examples
A	Awake	Familiar	Low	One or many	Office or industrial
B1	Awake	Unfamiliar	High	One or few	Shop,restaurant,circulation space
B2	Awake	Unfamiliar	High	One with focal point	Cinema,theatre
Ci	Asleep	Familiar	Low	Few	Dwelling
Cii	Managed occupancy				Serviced flats,halls of residence,etc.
Ciii	Asleep	Unfamiliar	Low	Many	Hotel,hostel
D	Medical care	Unfamiliar	Low	Many	Residential
E	Transportation	Unfamiliar	High	Many	Railway station/Airport

Source: PD 7974-6:2004 "Human factors: Life safety strategies –Occupant evacuation behaviour and condition"

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

FACTORS QUE DEFINEIXEN UN ESCENARI D'EVACUACIÓ

2. Sistema d'alarma.

Nivell A1: El temps des de la detecció automàtica fins a l'alarma general és zero.

Nivell A2: L'alarma general no és immediata sinó que va precedida de un temps de pre-alarma (de 2 a 5 minuts) que depèn del pla d'autoprotecció.

Nivell A3: Sistema d'activació manual d'alarma (polsador a prop de l'origen de l'incendi).

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

FACTORS QUE DEFINEIXEN UN ESCENARI D'EVACUACIÓ

3. Complexitat de la construcció.

Nivell B1: Edifici senzill rectangular d'una sola planta, un o dos tancaments, amb una distribució senzilla amb un bon accés visual, una distància de recorregut curta, i sortides que donen directament a l'exterior de l'edifici.

Nivell B2: Edifici senzill de diversos tancaments, amb la majoria de les característiques dissenyades de manera prescriptiva i dissenys interns senzills.

Nivell B3: Edifici complex. Integració d'una sèrie d'edificis existents en un mateix solar, centres d'oci, centres comercials i aeroports. Impliquen sovint espais grans i complexos, de manera que els ocupants poden tenir dificultats per trobar el camí durant una evacuació.

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

FACTORS QUE DEFINEIXEN UN ESCENARI D'EVACUACIÓ

4. Sistema de gestió de la seguretat.

Nivell M1: Proporció elevada de ocupants normals formats i entrenats per a un alt nivell de gestió de seguretat contra incendis. El sistema i els procediments estan subjectes a una certificació independent, inclosa una auditoria periòdica amb evacuacions supervisades.

Nivell M2: Semblant al nivell 1, però amb una proporció menor de personal i vigilants. Pot ser que no hi hagi auditoria independent.

Nivell M3: Instal·lacions estàndard amb una gestió mínima bàsica de seguretat contra incendis. No hi ha auditoria independent.

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

TEMPS DE PRE MOVIMENT – PD 7974-6

Table C.1 — Suggested pre-times for different design behavioural scenario categories

Scenario category and modifier	First occupants Δt_{pre} (1st percentile)	Occupant distribution Δt_{pre} (50th percentile) ^a
A: awake and familiar M1 B1 – B2 A1 – A2 M2 B1 – B2 A1 – A2 M3 B1 – B2 A1 – A3 For B3, add 0.5 for wayfinding M1 would normally require voice alarm/PA if unfamiliar visitors likely to be present	0.5 1 >15	1.0 2 >15
B: awake and unfamiliar M1 B1 A1 – A2 M2 B1 A1 – A2 M3 B1 A1 – A3 For B2 add 0.5 for wayfinding For B3 add 1.0 for wayfinding M1 would normally require voice alarm/PA	0.5 1.0 >15	2 3 >15
Ci: sleeping and familiar (e.g. dwellings – individual occupancy) M2 B1 A1 M3 B1 A3 For other units in a block assume one hour	5 10	5 >20
Cii: managed occupancy (e.g. serviced apartments, hall of residence) M1 B2 A1 – A2 M2 B2 A1 – A2 M3 B2 A1 – A3	10 15 >20	20 25 >20
Ciii sleeping and unfamiliar (e.g. hotel, boarding house) M1 B2 A1 – A2 M2 B2 A1 – A2 M3 B2 A1 – A3 For B3, add 1.0 for wayfinding M1 would normally require voice alarm/PA	15 30 >20	15 20 >20

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

TEMPS DE PRE MOVIMENT – PD 7974-6

Table C.1 — Suggested pre-times for different design behavioural scenario categories		
Scenario category and modifier	First occupants Δt_{pre} (1st percentile)	Occupant distribution Δt_{pre} (90th percentile) ^a
D: medical care		
Awake and unfamiliar (e.g. day centre, clinic, surgery, dentist)		
M1 B1 A1 – A2	0.5	2
M2 B1 A1 – A2	1.0	3
M3 B1 A1 – A3	>15	>15
For B2 add 0.5 for wayfinding For B3 add 1.0 for wayfinding M1 would normally require voice alarm/PA		
Sleeping and unfamiliar (e.g. hospital ward, nursing home, old peoples' home)		
M1 B2 A1 – A2	5 ^b	10 ^b
M2 B2 A1 – A2	10 ^b	20 ^b
M3 B2 A1 – A3	>10 ^b	>20 ^b
For B3 add 1.0 for wayfinding M1 would normally require voice alarm/PA		
E: transportation (e.g. railway, bus station or airport)		
Awake and unfamiliar		
M1 B3 A1 – A2	1.5	4
M2 B3 A1 – A2	2.0	5
M3 B3 A1 – A3	>15	>15
M1 and M2 would normally require voice alarm/PA		
NOTE There is a lack of data on evacuation behaviour and the times required for key aspects of evacuation. Therefore the limitations of the database needs to be borne in mind when proposing or assessing designs incorporating engineered solutions in relation to human behaviour.		
In particular the database needs to be improved by the provision of information such as evacuation time records, video records from real evacuation incidents (including fires) and data from monitored evacuations in a reasonably large set of each occupancy type, including sleeping accommodation. This could then provide a definitive database for design applications and the further development of predictive evacuation and behaviour models.		
^a Total pre-movement time = Δt_{pre} (1st percentile) + Δt_{pre} (90th percentile). Figures with greater levels of uncertainty are italicized.		
^b These times depend upon the presence of sufficient staff to assist evacuation of handicapped occupants.		

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

TEMPS DE PRE MOVIMENT – ALTRES FONTS

Table 2 pre-movement time

Occupancy type	W1 (min)	W2 (min)	W3 (min)	
Office, commercial and industrial buildings, schools, colleges and universities (Occupants awake and familiar with the building, the alarm system, and evacuation)	< 1	3	> 4	<p>W1: live directives using a voice communication system from a control room, or live directives in conjunction with well-trained, uniformed staff that can be seen and heard by all occupants in the space</p> <p>W2: nondirective voice messages (prerecorded) and/or informative warning visual display with trained staff</p> <p>W3: warning system using fire alarm signal and staff with no relevant training</p> <p>Note: For occupants in a small room/space of fire origin who can clearly see smoke and flames at a distance, adopt the relevant time given for the W1 For occupants in a large room/space of fire origin who can clearly see smoke and flames at a distance, adopt the relevant time given for the W2, unless W1 For occupants outside room/space of fire origin who cannot clearly see smoke and flames, adopt the relevant time given for the warning system in operation</p>
Shops, museums, leisure-sport centers, and other assembly buildings (Occupants awake but may be unfamiliar with the building, alarm system, and evacuation procedure.)	< 2	3	> 6	
Dormitories, residential mid-rise and high-rise (Occupants may be asleep but are predominantly familiar with the building, alarm system, and evacuation procedure.)	< 2	4	> 5	
Hotels and boarding houses (Occupants may be asleep but are predominantly familiar with the building, alarm system, and evacuation procedure.)	< 2	4	> 6	
Hospital, nursing home, and other institutional establishment (A significant number of occupants may require assistance)	< 3	5	> 8	

Source: Adapted from *Fire Safety Engineering In Building, Part 1: "Guide to the application of Fire Safety Engineering Principles"*, Table 21, British Standard Institute, DD240, London, 1997

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

ESCENARIS PER AVALUAR EL TEMPS DE MOVIMENT

PD 7974-6:2004 suggereix **simplificar l'anàlisi complexa del temps d'evacuació**, considerant la posició de cada ocupant, el temps previ al moviment, el temps de caminada i els efectes que la densitat dels ocupants té sobre el temps de caminada, només utilitzant dues estimacions senzilles:

1. Un cas en què el **recinte està poc poblat amb una densitat de població d'1/3 de la població de disseny.**
2. Un cas en què el recinte contingui la **població màxima de disseny.**

En ambdós casos, s'ha de descomptar la sortida més gran.

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

ESCENARIS PER AVALUAR EL TEMPS DE MOVIMENT

1. Un cas en què el **recinte està poc poblat amb una densitat de població d'1/3 de la població de disseny.**

El temps d'evacuació depèn del **temps previ al desplaçament de l'últim grup d'ocupants que decideix marxar** i del **temps que trigen a desplaçar-se fins a la sortida i passar-hi.**

Mentre la densitat dels ocupants sigui baixa, **la seva velocitat de marxa no es veurà impedida i no hi haurà cua a les sortides.**

$$t_{RSET} = \Delta t_{det} + \Delta t_a + \left(\Delta t_{pre(99thpercentile)} + \Delta t_{trav(walking)} \right)$$

S'ha de fer una estimació conservadora del temps de caminada utilitzant la distància màxima de desplaçament directe fins a la sortida.

S'ha de considerar que la velocitat de marxa és la d'un dels últims ocupants, no influenciada per la densitat.

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

ESCENARIS PER AVALUAR EL TEMPS DE MOVIMENT

2. Un cas en què el recinte contingui la població màxima de disseny.

El temps d'evacuació depèn del temps previ al moviment i el temps de caminada del primer grup d'ocupants que decideixen evacuar (1r percentil) més el temps de flux per les sortides on és probable que es formin cues.

$$t_{RSET} = \Delta t_{det} + \Delta t_a + \left(\Delta t_{pre(1stpercentile)} + \Delta t_{trav(walking)} + \Delta t_{trav(flow)} \right)$$

El cas més llarg s'hauria d'utilitzar per a finalitats de disseny i, en la majoria dels escenaris, el segon cas representarà els temps d'escapament requerits més llargs.

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS SIMPLIFICATS – CASOS

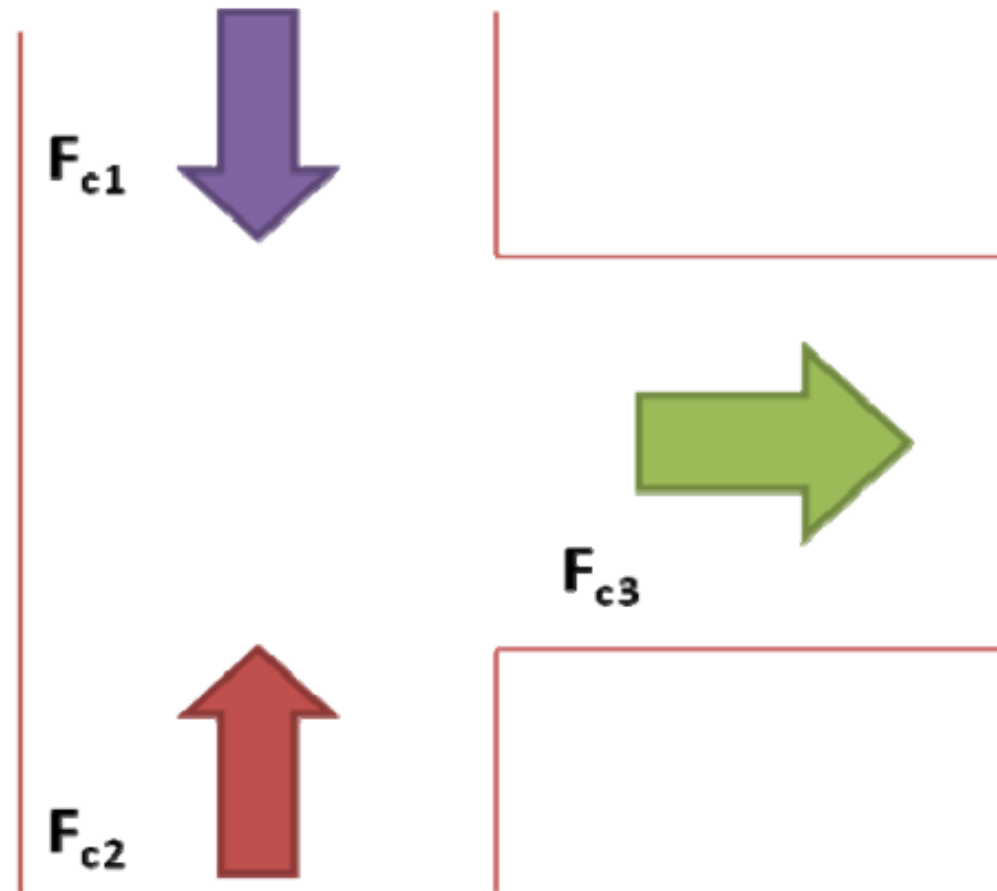


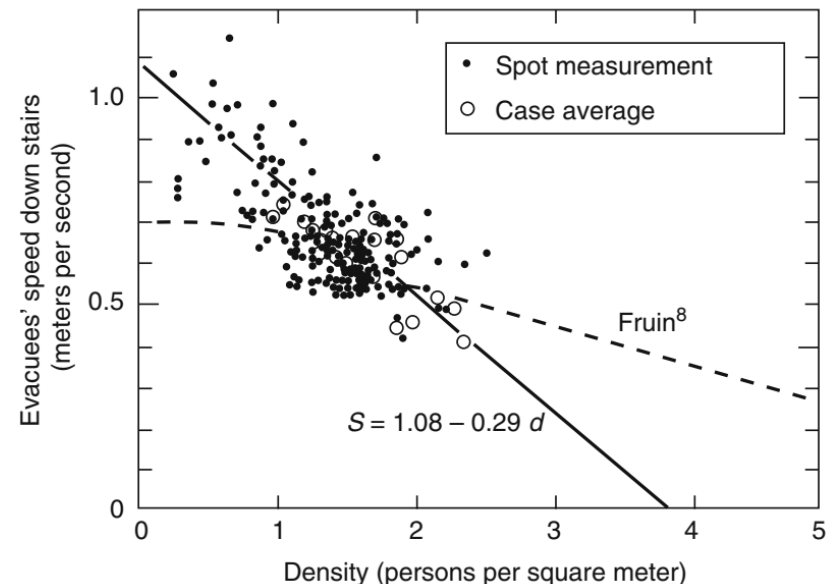
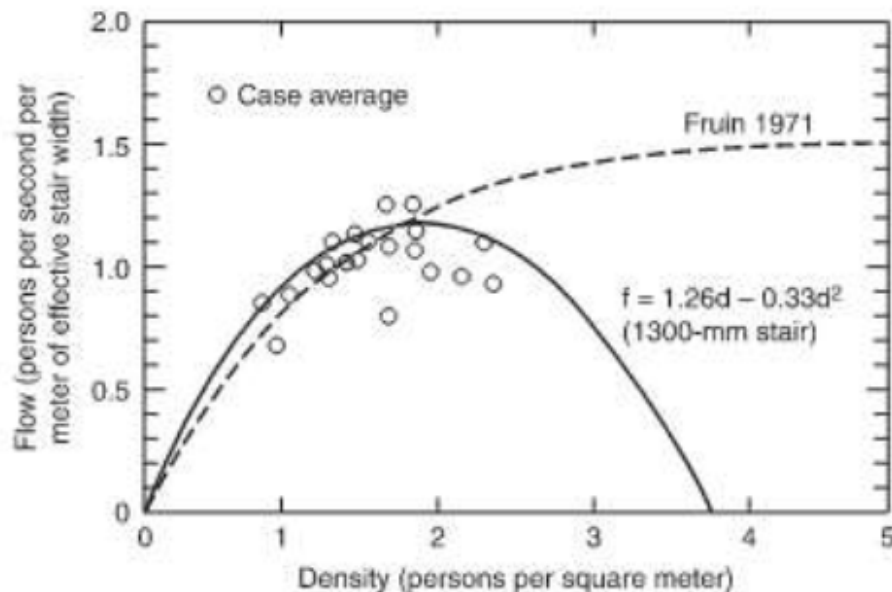
Figure 3 Merging Egress Flow

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS SIMPLIFICATS PEL TEMPS DE MOVIMENT

Equacions analítiques de velocitat de moviment i fluxos de persones en portes, escales, passadissos, etc.

Obtingudes d'assajos. Els punts són resultats experimentals.



MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS SIMPLIFICATS – VELOCITAT DE MOVIMENT

La velocitat de marxa en horitzontal sense obstacles en ocupants sense discapacitats físiques va **d'1,2 m/s** a 1,25 m/s. I en vertical entre 1,1 m/s i **0,85 m/s**. Es pot fer referència a aquesta velocitat de marxa en cas que la **densitat de població sigui inferior a 0,54 persones/m²**.

La velocitat de marxa disminueix proporcionalment a l'augment de la densitat fins 3,8 persones/m² que la velocitat és zero.

$$S = (1 - 0,266 D) k$$

S = Velocitat (m/s).

D = Densitat (pers/m²).

Table 3 Velocity factor

Egress Component		K (m/s)	K (ft/min)
Corridor, aisle, ramp, doorway		1.40	275
Stair Riser mm (in.)	Stair Tread mm (in.)		
S1: 190 (7.5)	254 (10)	1	196
S2: 272 (7.0)	279 (11)	1.08	212
S3: 165 (6.5)	305 (12)	1.16	229
S4: 165 (6.5)	330 (13)	1.23	242

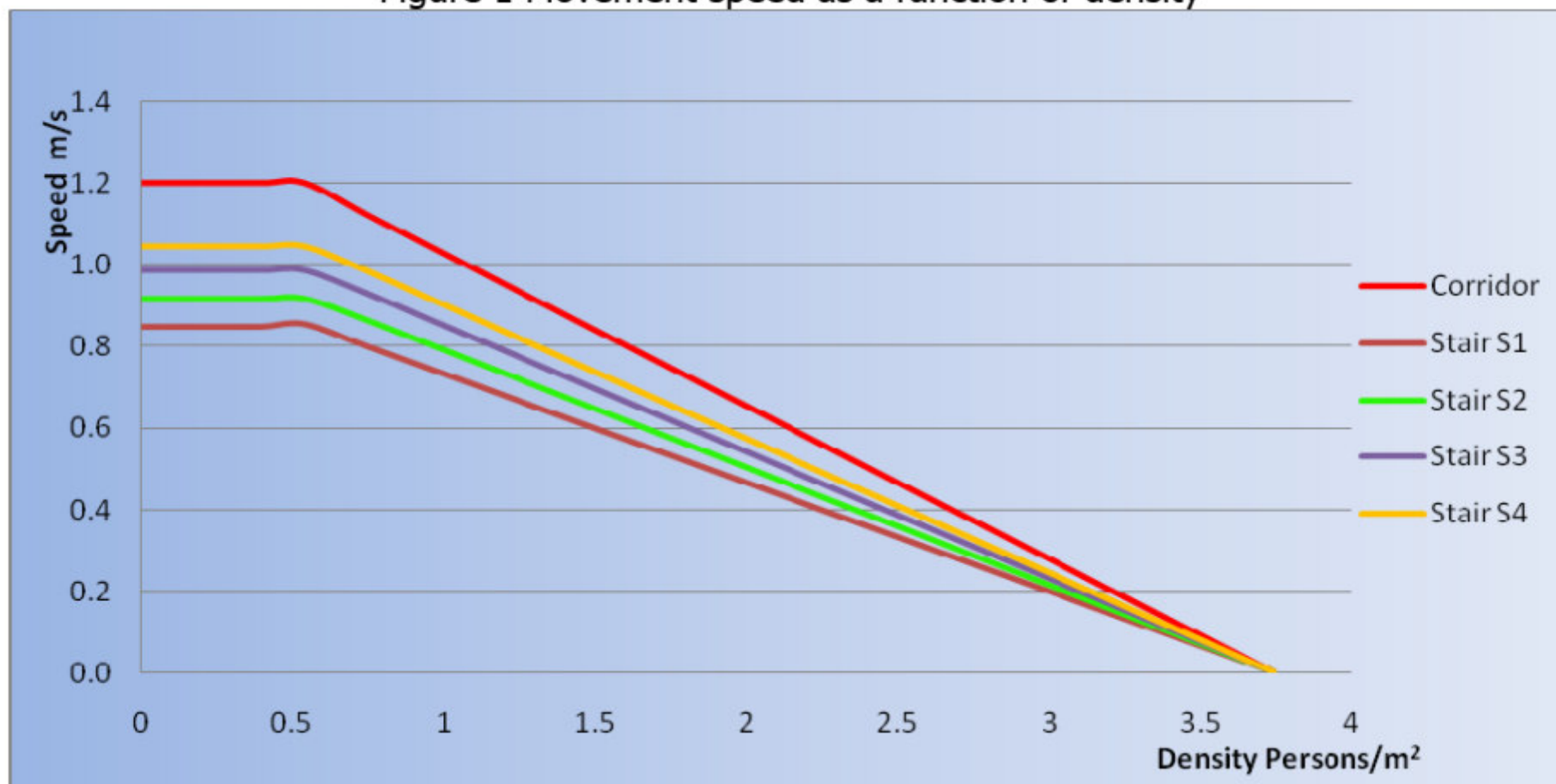
Source: PD 7974-6:2004 "Human factors: Life safety strategies –Occupant evacuation, behaviour and condition"

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS SIMPLIFICATS – VELOCITAT DE MOVIMENT

Velocitat de persones sense discapacitats en funció de la densitat de població

Figure 1 Movement speed as a function of density



MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS SIMPLIFICATS – VELOCITAT DE MOVIMENT

La velocitat de marxa estimada **en horitzontal per gent gran i nens menors de 6 anys** és d'uns **0,45 m/s**.

La velocitat de marxa de **persones grans amb cadires de rodes, equipatges o nens agafats a mà**, varia de **0,22 a 0,79 m/s**.

Speed on horizontal surface				
Subject Group	Mean	Standard deviation	Range	Interquartile range
All disabled	1,00	0,42	0,10-1,77	0,71-1,28
With locomotion disabilities	0,80	0,32	0,24-1,68	0,57-1,02
No aid	0,95	0,32	0,24-0,1,68	0,70-1,02
Crutches	0,94	0,30	0,63-1,35	0,67-1,24
Walking sticks	0,81	0,38	0,26-1,60	0,49-1,08
Rollator	0,57	0,29	0,10-1,02	0,34-0,83
No locomotion disability	1,25	0,32	0,82-1,77	1,05-1,34
Electric wheelchair	0,89	-	0,85-1,77	-
Manual wheelchair	0,69	0,35	0,13-1,35	0,38-0,94
Manual wheelchair	0,36	0,14	0,11-0,70	0,20-0,47
Assisted manual wheelchair	1,30	0,94	0,84-1,98	1,02-1,59
Assisted ambulant	0,78	0,34	0,21-1,40	0,58-0,92

Source: Table 3-13.2 from Section 3, Chapter 13: "Movement Of People: The Evacuation Timing", The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, NFPA Inc., Quincy, Massachusetts, 2002

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS SIMPLIFICATS – VELOCITAT DE MOVIMENT

Speed on stairs				
Subject Group	Mean	Standard deviation	Range	Interquartile range
Ascent				
With locomotion disabilities	0,38	0,14	0,13-0,62	0,26-0,52
No aid	0,43	0,13	0,14-0,62	0,35-0,55
Crutches	0,22	-	0,19-0,31	0,26-0,45
Walking stick	0,35	0,11	0,18-0,49	-
Rollator	0,14			
Without disabilities	0,70	0,24	0,55-0,82	0,55-0,78
Descendent				
With locomotion disabilities	0,33	0,16	0,11-0,70	0,22-0,45
No aid	0,36	0,14	0,11-0,70	0,20-0,47
Crutches	0,22	-	-	-
Walking stick	0,32	0,12	0,11-0,49	0,24-0,46
Rollator	0,16	-	-	-
Without disabilities	0,70	0,26	0,45-1,10	0,53-0,90

Source: Table 3-13.3 from Section 3, Chapter 13: "Movement Of People: The Evacuation Timing", The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, NFPA Inc., Quincy, Massachusetts, 2002

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

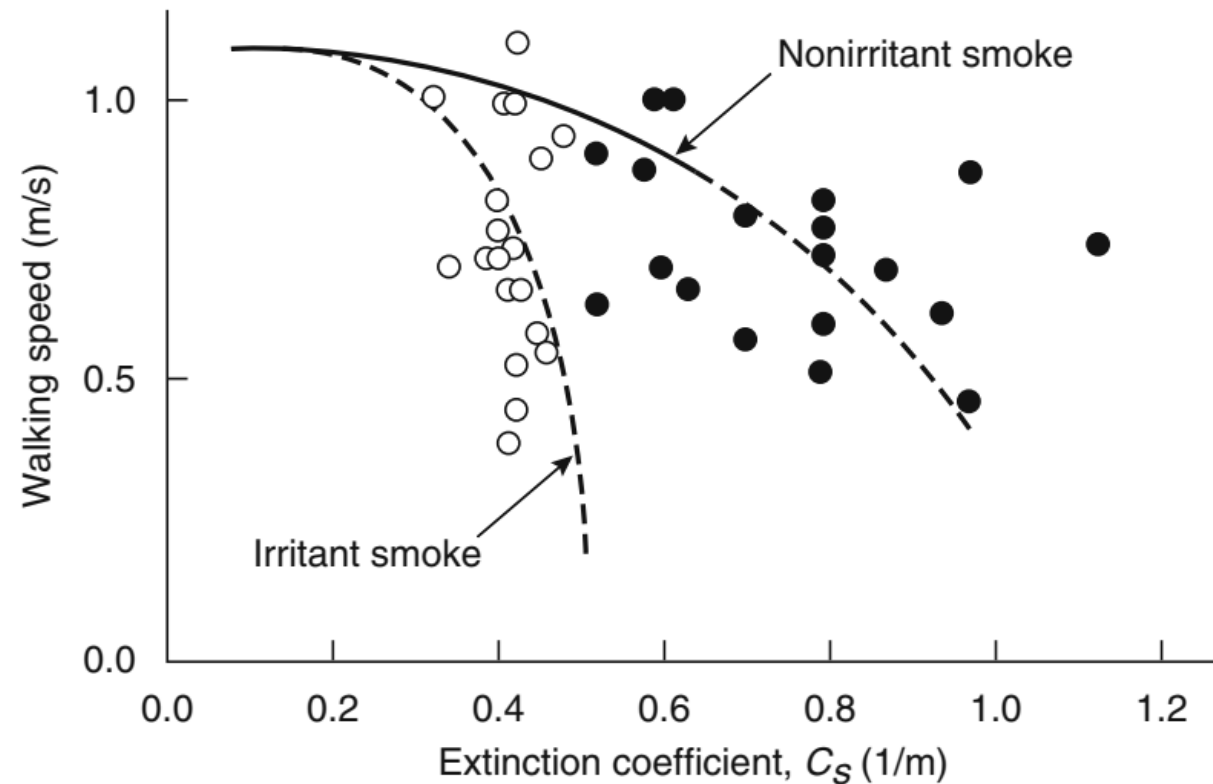
MODELS SIMPLIFICATS – VELOCITAT DE MOVIMENT AMB FUM

Visibilitat \approx Coeficient d'extinció

4 m \approx 0,5 1/m

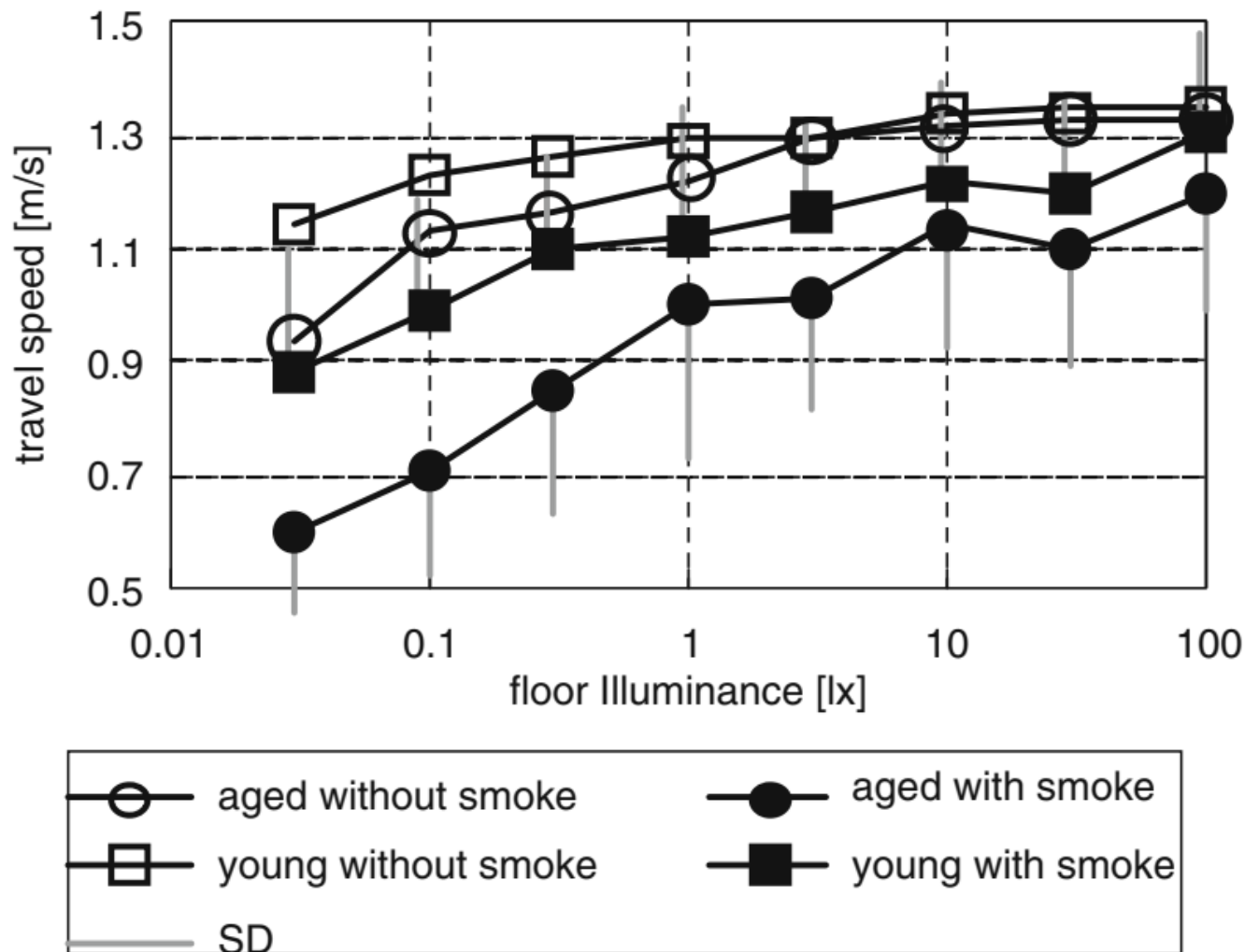
10 m \approx 0,2 1/m

20 m \approx 0,1 1/m



MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS SIMPLIFICATS – VELOCITAT DE MOVIMENT AMB FUM



MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS SIMPLIFICATS – FLUX ESPECÍFIC

El **flux específic** es troba **multiplicant la velocitat i la densitat**. Indica el nombre de persones que passen per un punt per metre d'amplada efectiva (porta o passadís) per segon. El cabal específic és similar al cabal de massa en un sistema hidràulic.

$$F = S \cdot D = (1 - 0,266 D) k D$$

F = Flux específic (pers/s/m)

S = Velocitat moviment (m/s)

D = Densitat (pers/m²).

k = factor de velocitat

Table 4 Maximum Specific Flows

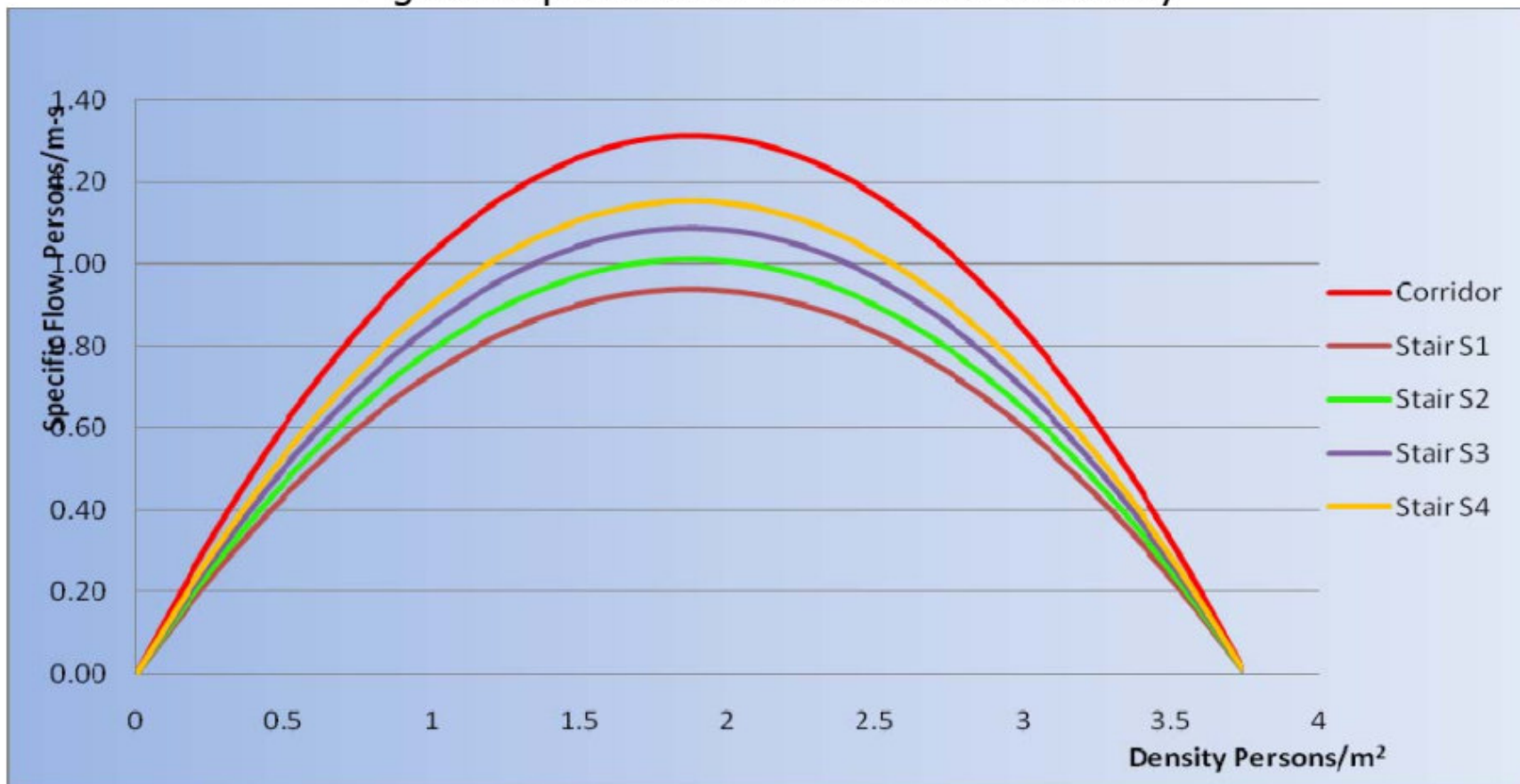
Egress Component		Fs pers/s m of Effective Width (pers/s ft of Effective Width)
Corridor, aisle, ramp, doorway		1.32 (24.0)
Stair Riser mm (in.)	Stair Tread mm (in.)	
190 (7.5)	254 (10)	0.94 (17.1)
272 (7.0)	279 (11)	1.01 (18.5)
165 (6.5)	305 (12)	1.09 (20.5)
165 (6.5)	330 (13)	1.16 (21.2)

El flux específic varia segons el quadrat de la densitat i no proporcionalment com ho fa la velocitat. El progrés del diagrama és el d'una corba parabòlica que té la concavitat apuntant cap a la part inferior amb **un valor màxim a una densitat de població de 1,88 persones/m²**.

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS SIMPLIFICATS – FLUX PER AMPLE EFECTIU

Figure 2 Specific Flow as a function of density



MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS SIMPLIFICATS – FLUX PER AMPLE EFECTIU

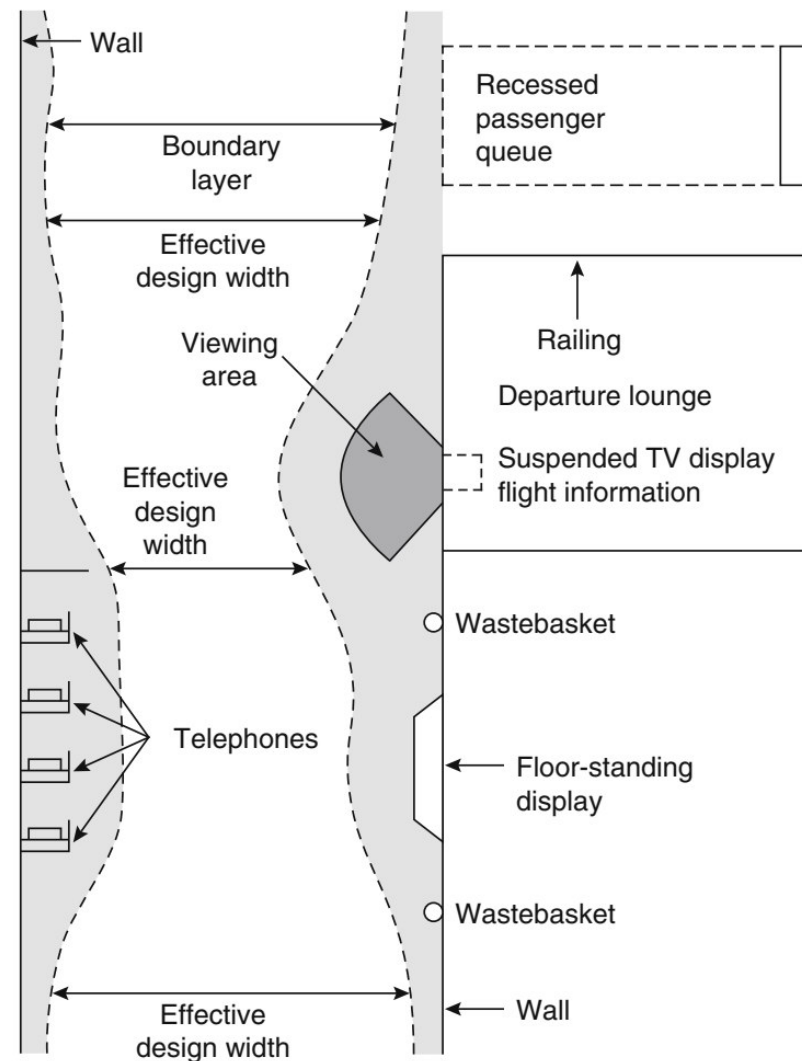
Adult (estiu) = 0,1 m²

Adult (hivern) = 0,125 m²

= un 25% de cabal inferior amb roba d'hivern (p/m/s)

Table 5 Boundary Layer Width

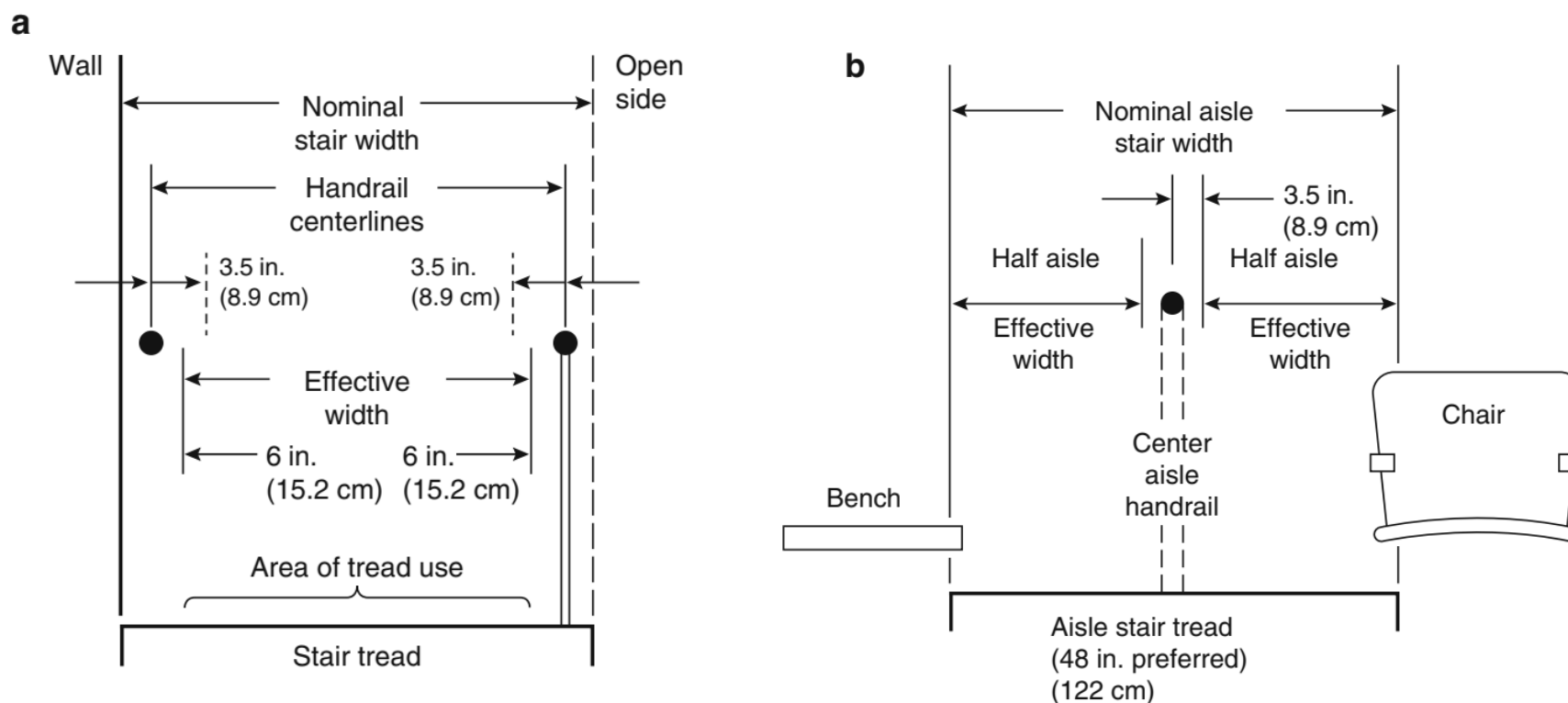
Component	Boundary Layer mm (inch)
Theater chairs, stadium benches	0 (0)
Railings, handrails	89 (3.5)
Obstacles	100 (4)
Stairways, door, archways	150 (6)
Corridors and ramp walls	200 (8)



MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS SIMPLIFICATS – AMPLE EFECTIU

Quan els components de sortida tenen capes límit, **els ocupants flueixen mantenint una distància de les parets o altres obstacles.** En fer-ho, poden tenir espai per moure's lateralment en cas de necessitat. L'amplada del resultat es dona eliminant de l'amplada total un valor variable donat per estimacions experimentals.



MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS SIMPLIFICATS – TEMPS DE DESPLAÇAMENT I DE FLUX

Temps de desplaçament:

$$t_{des} = L / S$$

L = Longitud de recorregut (m)

S = Velocitat de moviment (m/s)

Temps de flux a través d'una sortida per a un grup de persones:

$$t_p = P / (F \cdot W)$$

$$t_p = P / [1 - 0,266 D) k D W]$$

P = Número de persones

W = Ample efectiu (m)

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS SIMPLIFICATS – CASOS



Figure 4 Transitions in Egress Component

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

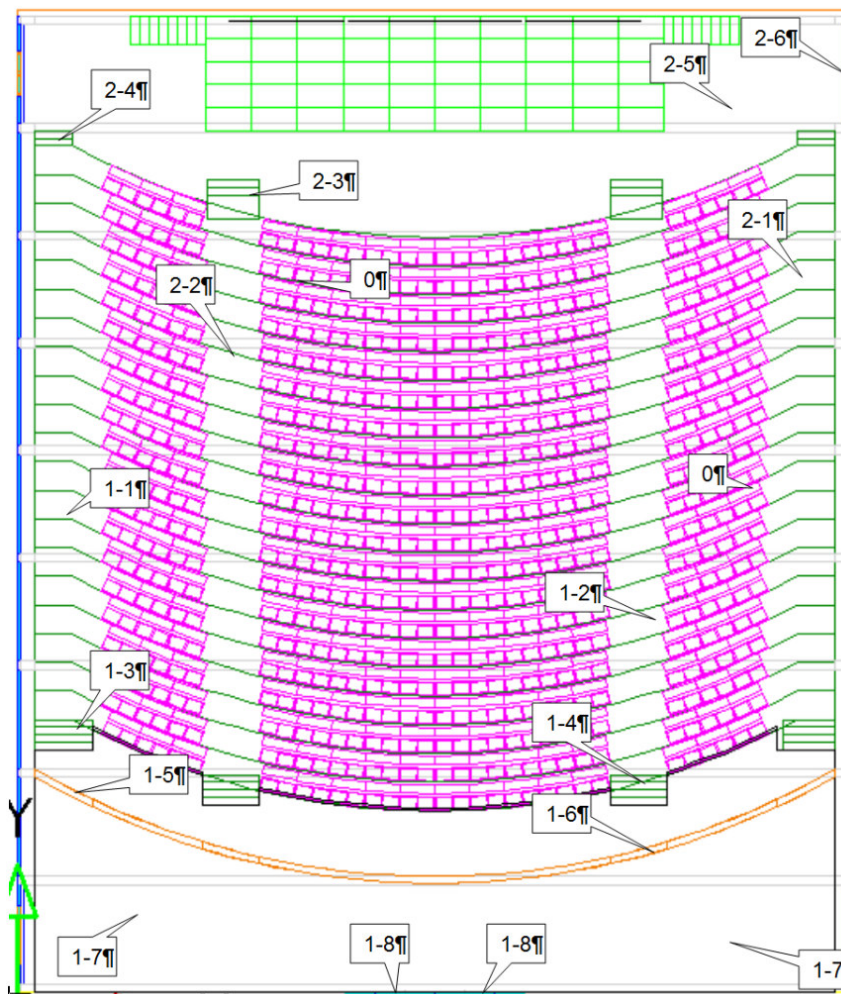
EXEMPLE D'AVALUACIÓ DEL TEMPS DE MOVIMENT

Comparison of Evacuation Simulation Models Aseri, buildingExodus, FDS+Evac, and PedGo applied to an Auditorium, 2012

1.000 persones

Dues rutes possibles:

- 1) Sortida principal 1-8
- 2) Sortida emergència 2-6



MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

EXEMPLE D'AVAUACIÓ DEL TEMPS DE MOVIMENT

Ruta 1: Sortida dels 1000 per la porta 1-8. El recorregut 1-9 en zona segura

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No.	Route element	Number [-]	Effective width [m]	Specific flow [P/(m*s)]	Flow [P/s]	Total flow [P/s]	Maximum length [m]	Velocity [m/s]	Walking time [s]
0	Aisle	120	0.42	⁻¹	0.63 ¹	75.60	-	-	-
1-1	Outer Stairwell	2	1.20	0.8	0.96	1.92	10.0	0.6	16,7
1-2	Central Stairwell	2	1.80	0.8	1.44	2.88	10.0	0.6	16,7
1-3	Stair	2	1.60	0.8	1.28	2.56	1.5	0.6	2,5
1-4	Stair	2	2.00	0.8	1.60	3.20	1.5	0.6	2,5
1-5	Through pass	2	1.40	0.9	1.26	2.52	0.3	1.0	0,25
1-6	Door	2	2.00	0.9	1.80	3.60	0.3	1.0	0,25
1-7	Floor	4	2.50	1.1	2.75	11.00	15.0	1.0	15,0
1-8	Main exits	2	2.00	0.9	1.80	3.60	0.5	1.0	0,5
1-9	Stair in foyer	2	2.40	0.8	1.92	3.84	15.0	0.6	25,0

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

EXEMPLE D'AVAUACIÓ DEL TEMPS DE MOVIMENT

Ruta 2: Sortida dels 1000 per la porta 2-6.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No.	Route element	Number [-]	Effective width [m]	Specific flow [P/(m*s)]	Flow [P/s]	Total flow [P/s]	Maximum length [m]	Velocity [m/s]	Walking time [s]
2-1	Stair down	2	1.20	0.8	0.96	1.92	10.0	0.6	16,7
2-2	Central stair down	2	1.80	0.8	1.44	2.88	10.0	0.6	16,7
2-3	Stair	2	2.00	0.8	1.60	3.20	0.7	0.6	1,17
2-4	Stair	2	1.20	0.8	0.96	1.92	0.7	0.6	1,17
2-5	Floor to exit	4	1.20	1.1	1.32	5.28	10.0	1.0	10,0
2-6	Exit doors front	2	2.00	0.9	1.80	3.60	0.5	1.0	0,5
<p>¹ The capacity in the rows does not depend on the width [2]. The values are for normal movement.</p> <p>² Stairwells are modelled as stairs (error on the safe side). No distinction is made between down and up.</p> <p>³ If this area is used for exhibition. the minimal width must be ensured.</p>									

Resultats: $1000 / 3,6 = 278$ s. Ruta 1: +35 s = **313 s**; Ruta 2: +28 = **306 s**

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

EXEMPLE D'AVALUACIÓ DEL TEMPS DE MOVIMENT

Table 3. Summary of the movement times.

Model	Route 1		Route 2	
	Time [s]	Congestion	Time [s]	Congestion
Capacity Analysis	313	Exit doors (1-8)	306	Exit doors (2-6)
P&M	295	Stairs (1-1 & 1-2). Stairs in foyer (1-9)	318	Stairs (2-1 & 2-2)
Exodus	382	Stairs (1-1 & 1-2)	266	Stairs (2-1 & 2-2)
PedGo	348	(Stairs (1-1 & 1-2)). Exit doors (1-8) (Stairs in foyer (1-9))	276	Stairs (2-1 & 2-2) (Exit doors (2-6))
ASERI	324	Stair (1-1 & 1-2) Exit doors (1-8)	311	Stair (2-1 & 2-2) Exit doors (2-6)
FDS+Evac	373	(Stairs (1-1 & 1-2)). Exit doors (1-8)	239	Stairs (2-1 & 2-2)
Mean	338		285	

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS COMPUTACIONALS – REPRESENTACIÓ DE L'EDIFICI

Node gruixut: Considera l'espai dividit en "segments" que representen tota una habitació o passadís. **El moviment dels ocupants s'avalua de segment a segment** (per exemple: d'habitació a habitació), sense una definició precisa de la seva posició real; per tant, la representació és menys detallada. Similar al model simplificat (hidràulic).

Node fi: Divideix tot l'espai en una col·lecció de nodes amb mida i forma fixa (per exemple, 0,5 x 0,5 quadrats). **El moviment dels ocupants s'avalua de node a node.**

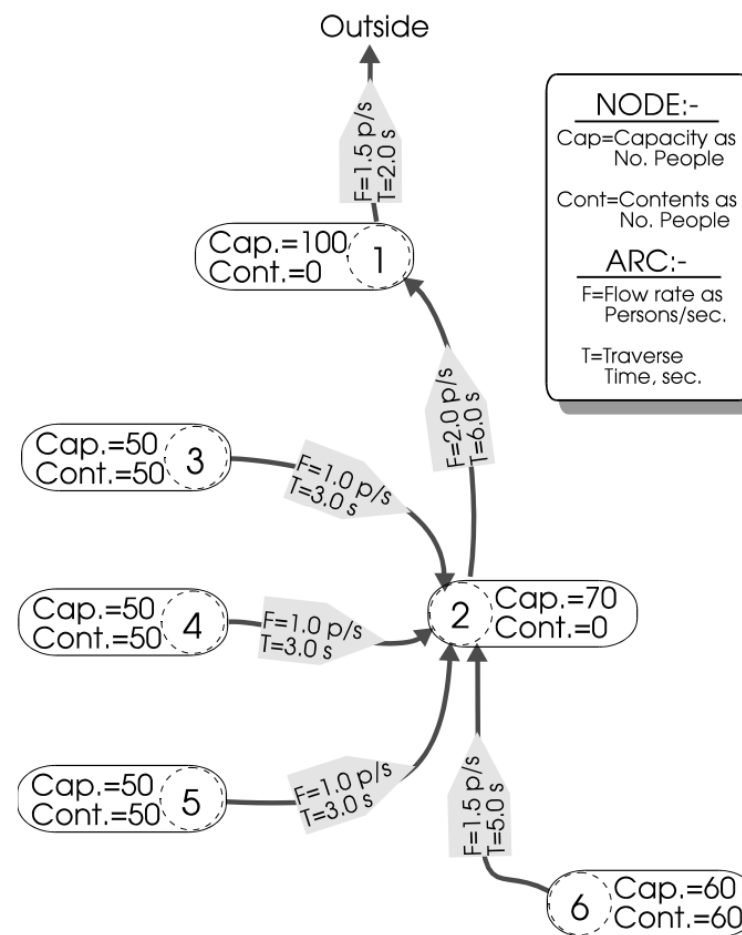
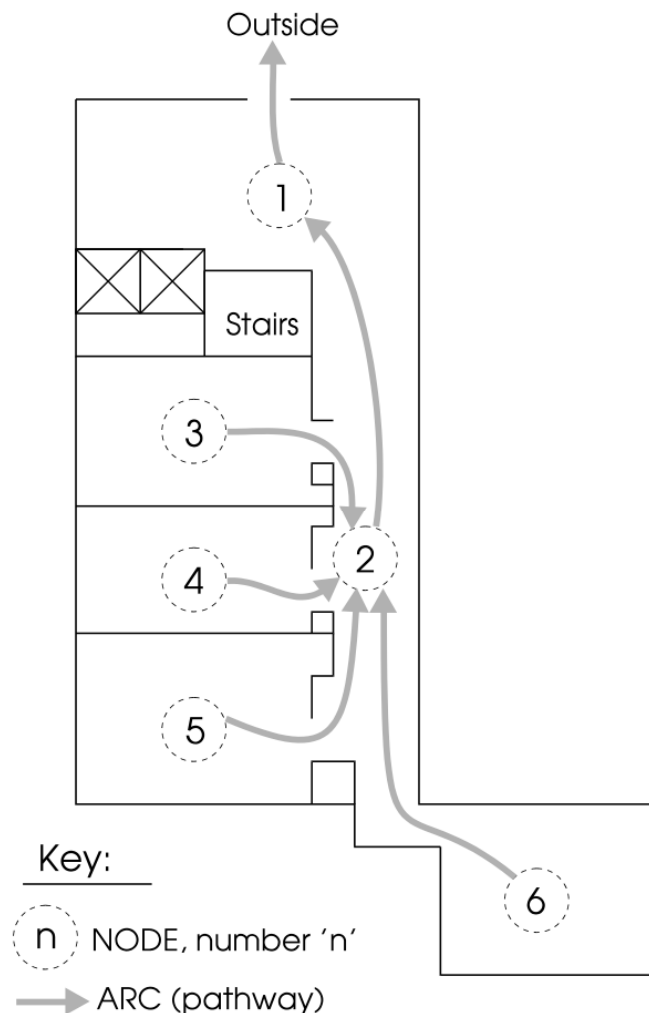
Continu: Aplica un espai bidimensional continu als plànols de l'estructura, permetent als ocupants caminar d'una coordenada a una altra per tot l'edifici. Situació més realista possible.

Les xarxes fines i contínues tenen la capacitat de **simular la presència d'obstacles i barreres als espais de l'edifici que influeixen en l'elecció individual de la ruta del camí**, mentre que les xarxes gruixudes "mouen" els ocupants només d'una part d'un edifici a una altra.

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS COMPUTACIONALS – REPRESENTACIÓ DE L'EDIFICI

Nodes Gruixuts



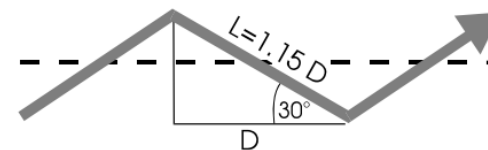
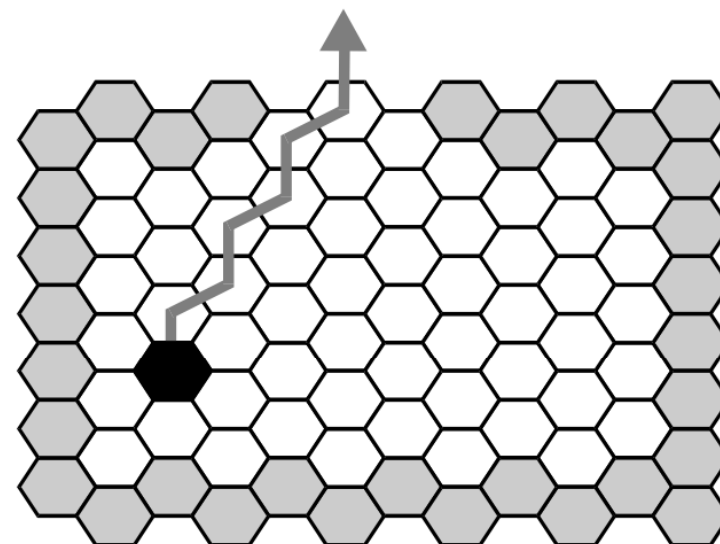
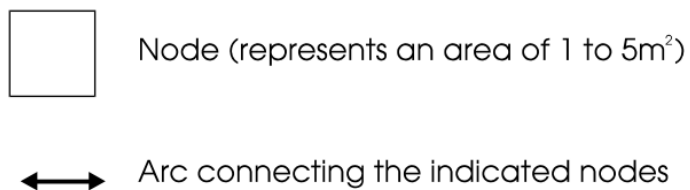
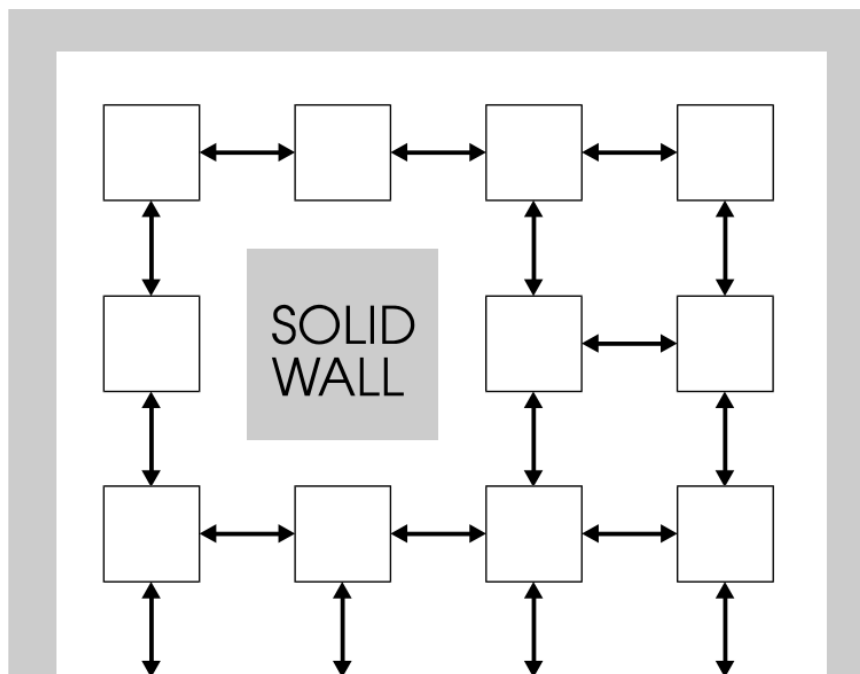
NODE:-
Cap=Capacity as No. People
Cont=Contents as No. People

ARC:-
F=Flow rate as Persons/sec.
T=Traverse Time, sec.

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS COMPUTACIONALS – REPRESENTACIÓ DE L'EDIFICI

Nodes fins (graella)

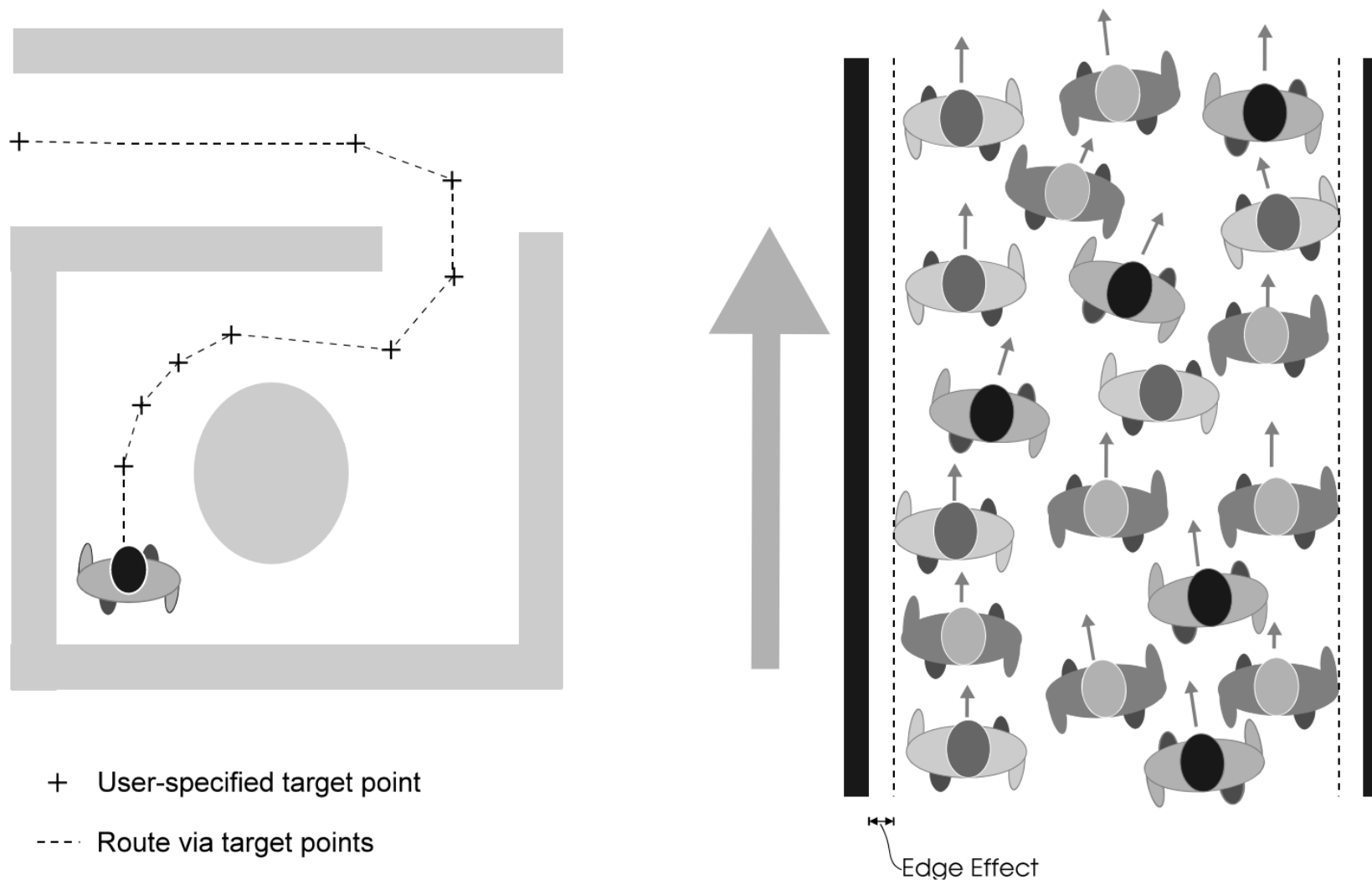


Length is 15% greater than real travel distance

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS COMPUTACIONALS – REPRESENTACIÓ DE L'EDIFICI

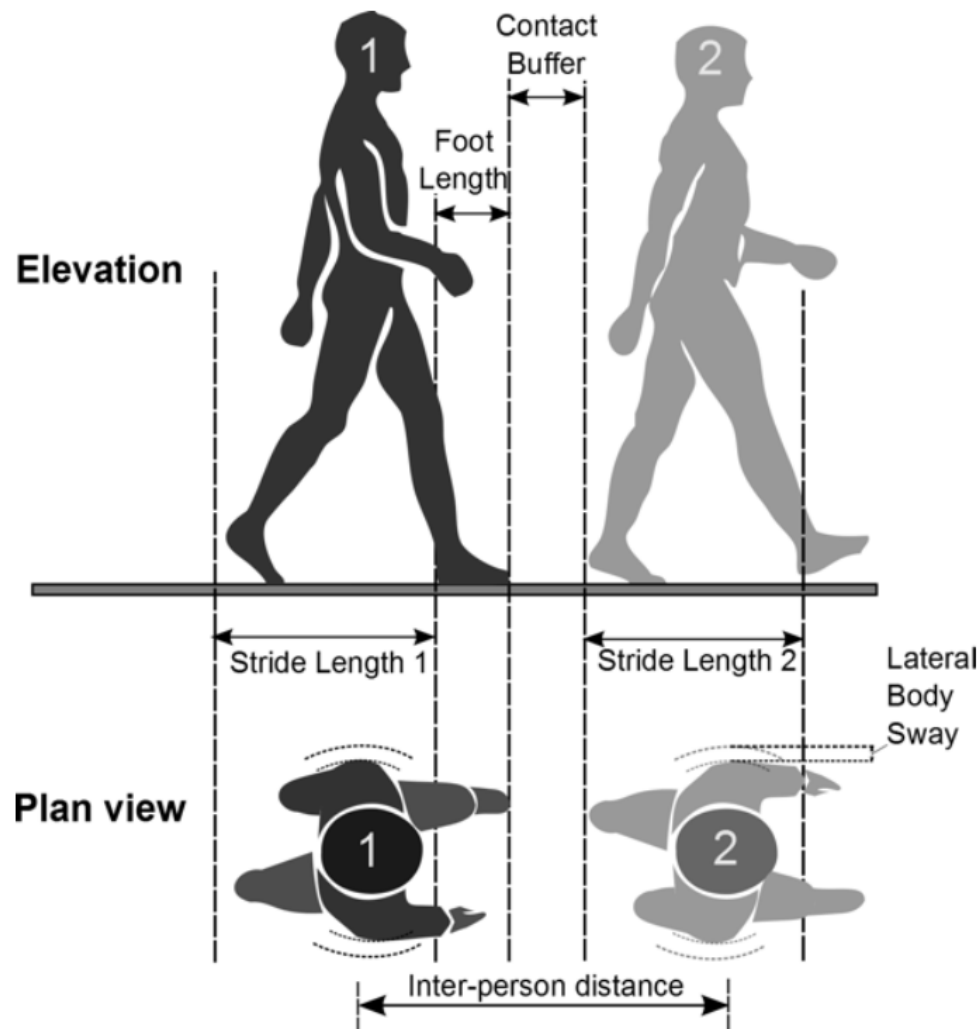
Continu:



MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS COMPUTACIONALS – REPRESENTACIÓ DE L'EDIFICI

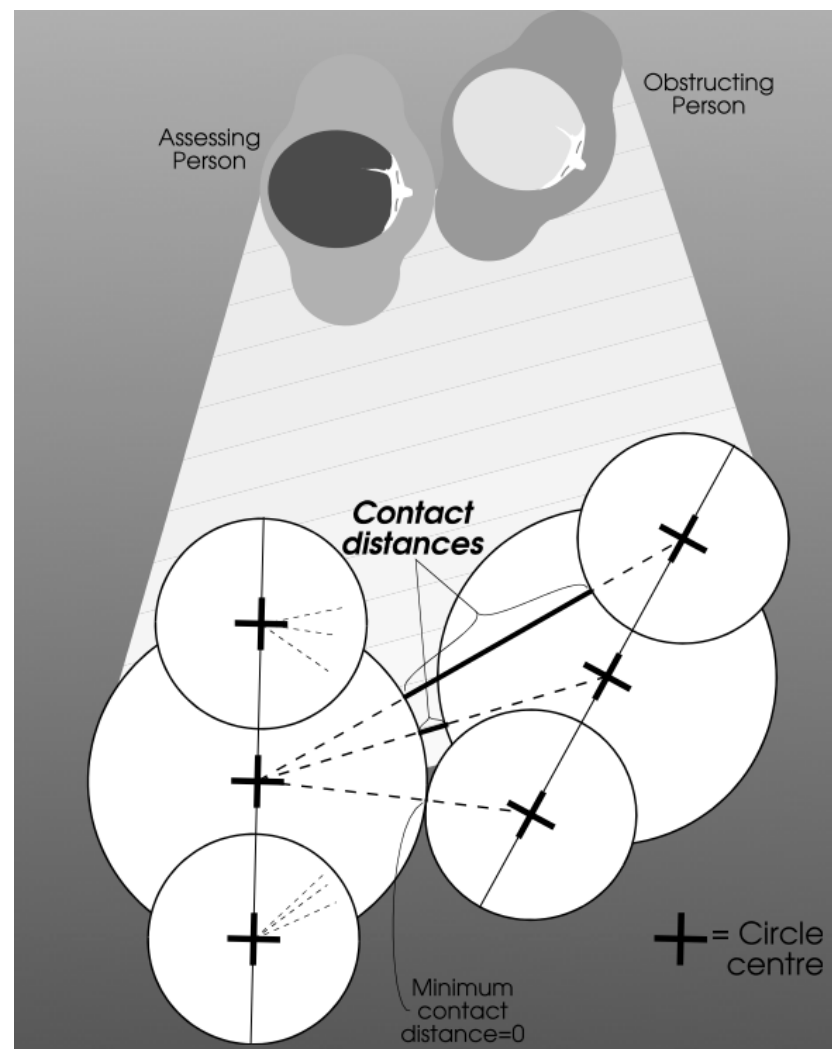
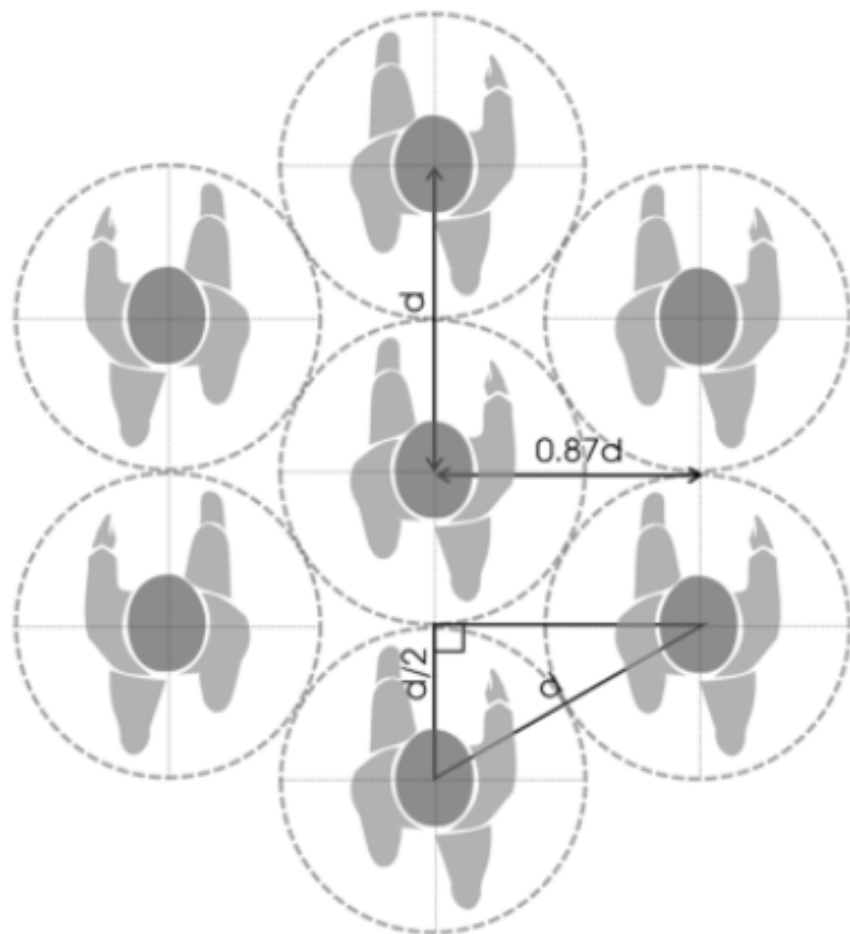
Continu: Cal analitzar el espai entre persones amb més detall



MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS COMPUTACIONALS – REPRESENTACIÓ DE L'EDIFICI

Continu: Utilitza l'anàlisi vectorial i la distància de contacte



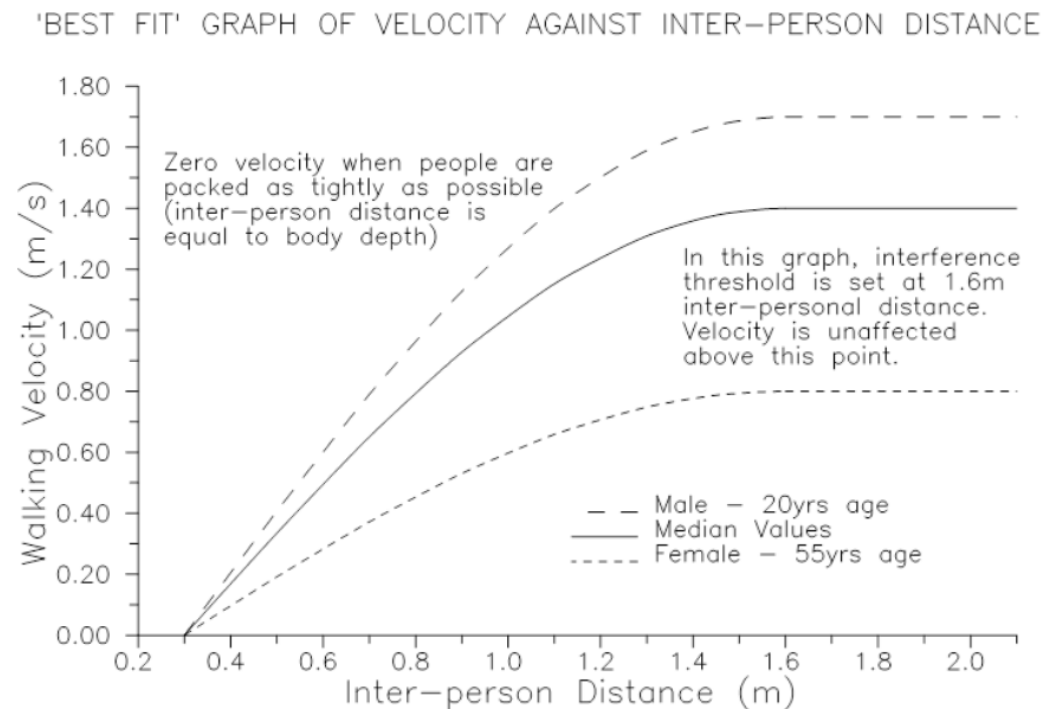
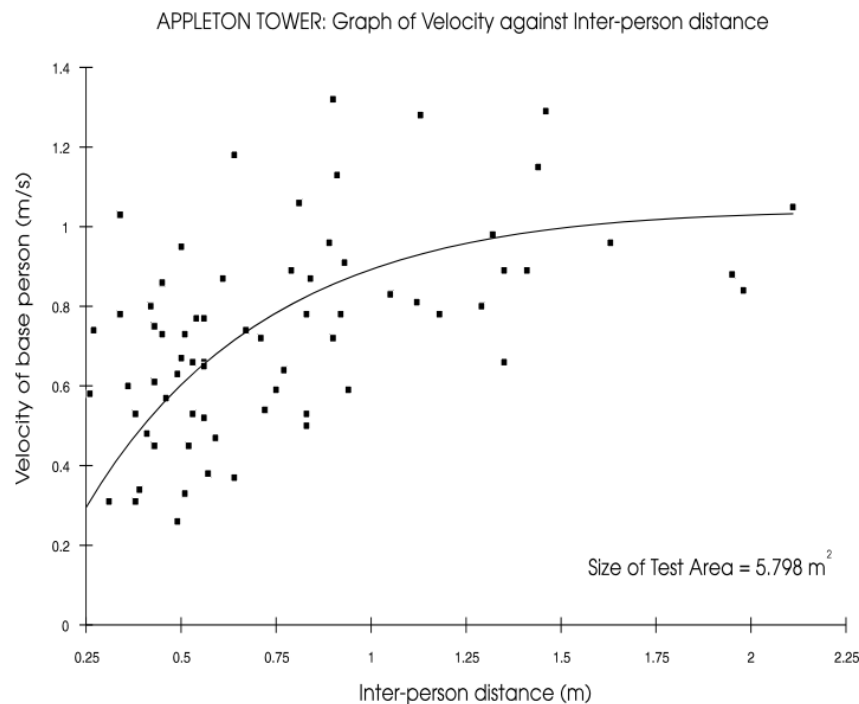
MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS COMPUTACIONALS – REPRESENTACIÓ DE L'EDIFICI

Continu: Gran difusió de dades de l'efecte de la distància interpersonal tot i marcant unes línies de tendència

També quantificats:

- L'acceleració $\sim 10\%/0,1$ s
- El gir rotacional: 10 graus/0,1 s



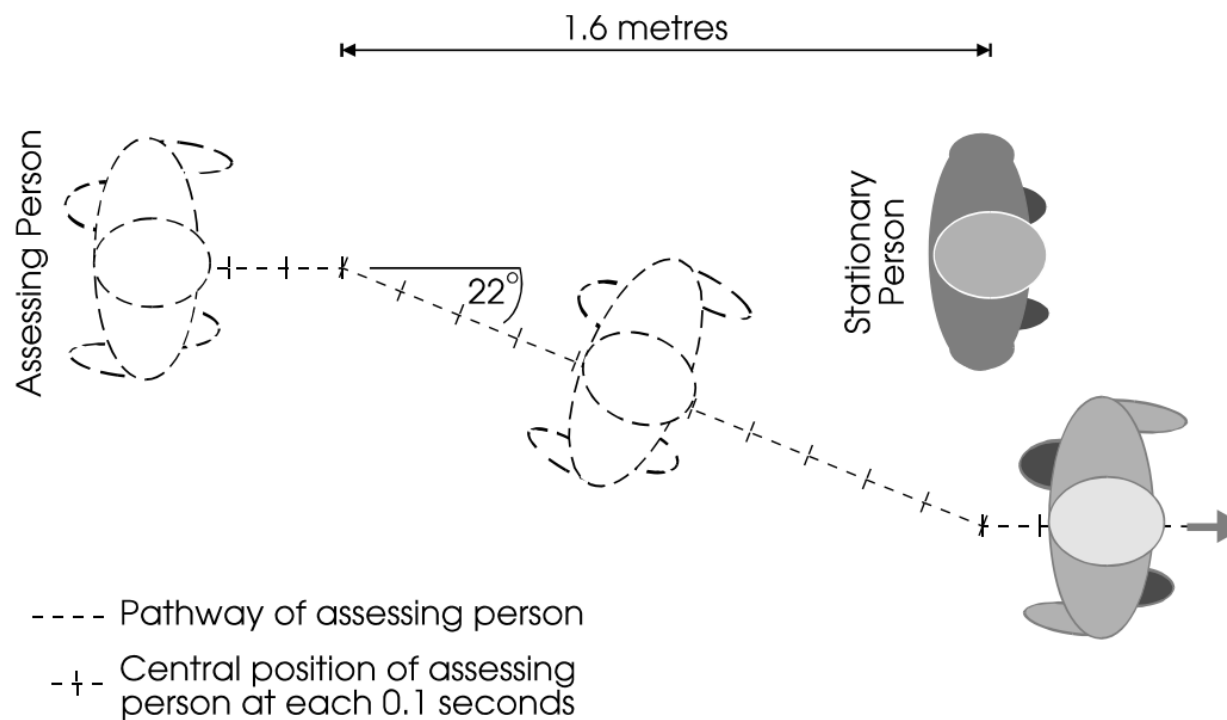
MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS COMPUTACIONALS – REPRESENTACIÓ DE L'EDIFICI

Continu:

Els algorismes d'intel·ligència artificial prenen decisions sobre la resposta: avançar, arrossegar els peus, girar.

El moviment basat en vectors es re-avalua cada 0,1 segons.



MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS COMPUTACIONALS – REPRESENTACIÓ DE LA POBLACIÓ

Individual: Permet assignar diversos atributs a la població, que es poden utilitzar per definir el procés de moviment i presa de decisions. Per tant, és possible representar diverses poblacions i rastrejar fins i tot un historial de sortida.

Global: No reconeix els atributs individuals, definint la població com un tot homogeni sense diferències. Per tant, només es poden establir resultats mitjans.

MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS COMPUTACIONALS – TIPUS DE SIMULACIÓ

Models d'optimització: Assumeixen que les persones evacuen de manera eficient, fent la millor elecció en cada situació (les vies d'evacuació són òptimes) i que les característiques de flux de persones i sortides són òptimes. Acostumen a considerar només una gran població d'ocupants.

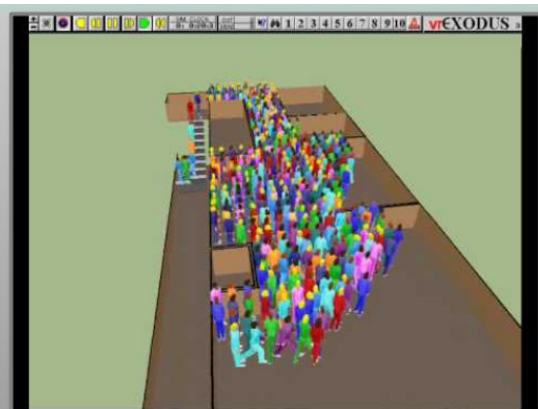
Models de simulació: Intenten reproduir el moviment i els comportaments observats durant les evacuacions reals. Per aquests motius, els resultats tendeixen a variar molt, igual que la precisió que es basa en la sofisticació del model.

Nota important: Tots els models **filen prim** amb el “**temps de moviment**”. Però recordem que hi ha altres porcions del temps d'evacuació que poden ser tant o més importants (“temps de detecció”, “temps d'alarma”, “temps de premoviment”). Són més útils en els casos en què el temps de moviment és preponderant (grans multituds, edificis d'alta ocupació, ...).

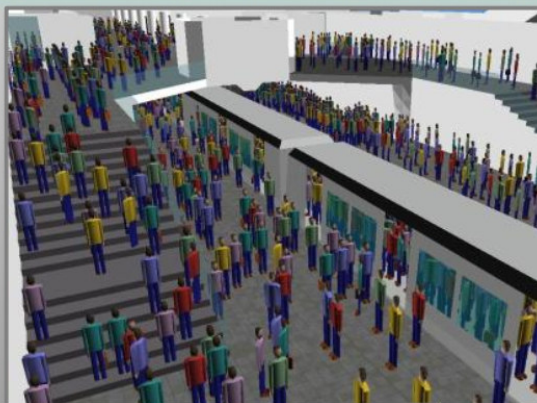
MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

MODELS COMPUTACIONALS – VISORS 3D

Els visors 3D donen la impressió d'un modelat sofisticat



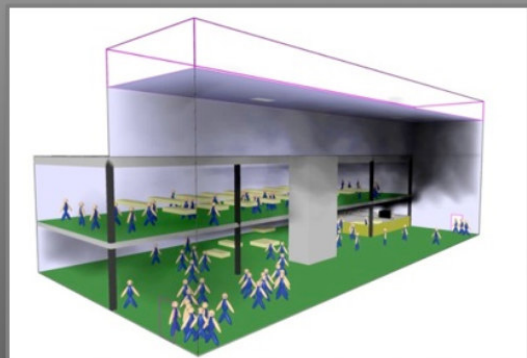
BuildingEXODUS (FSEG)



STEPS (MottMac)



MassMotion (OASys)



FDS + Evac (OpenSource)



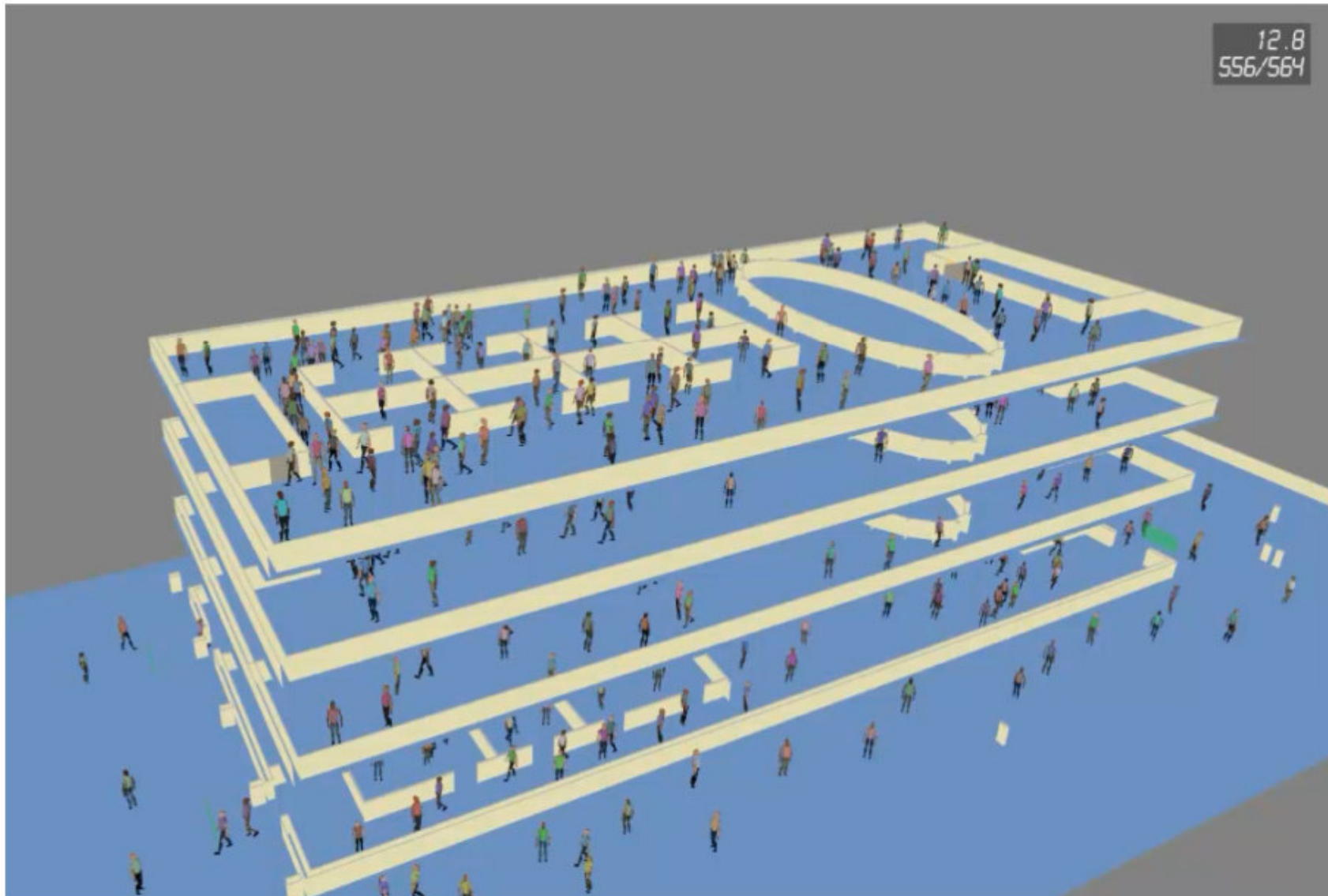
PathFinder (Thunderhead)



Simulex (IES)

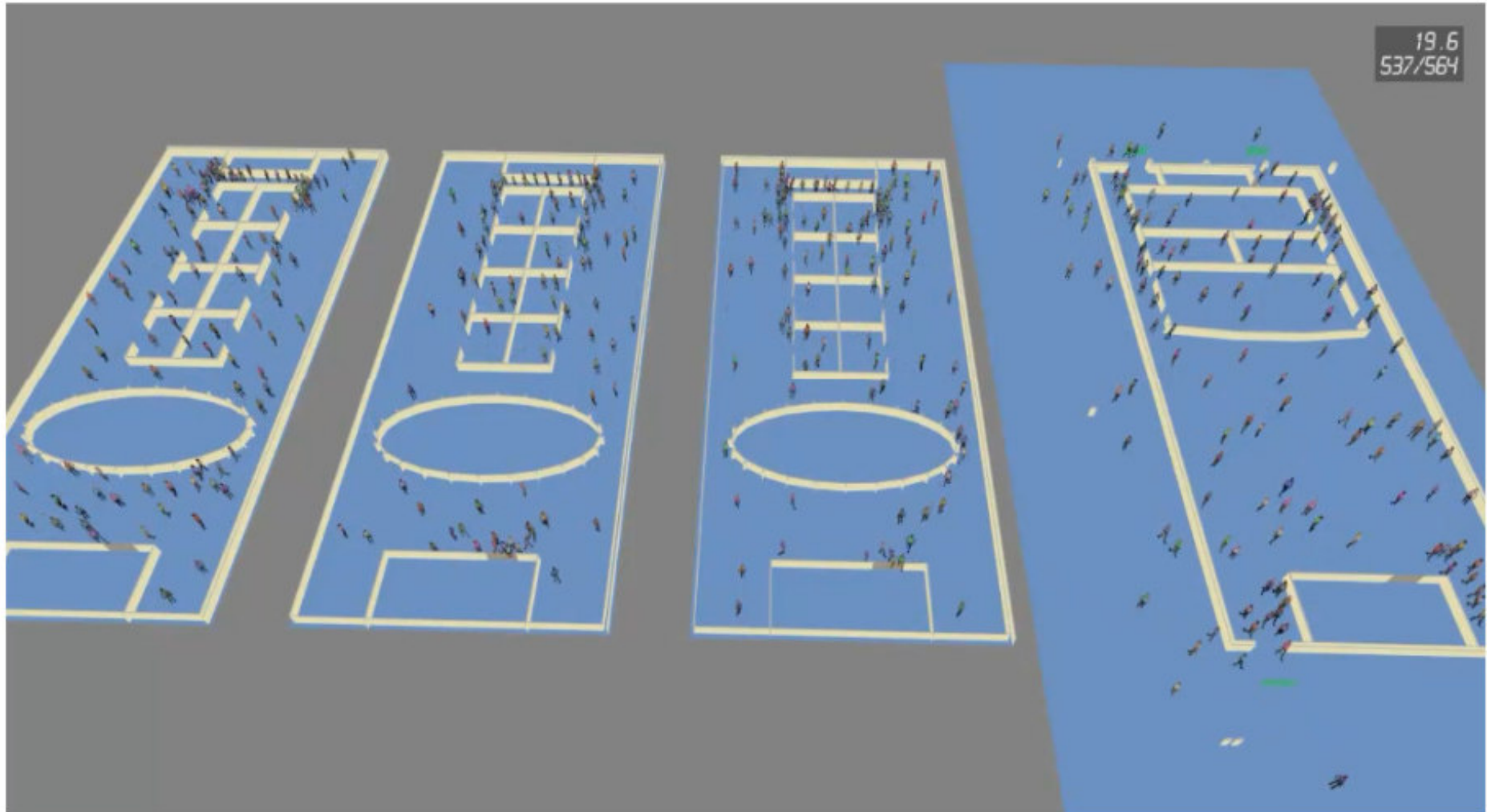
MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

EXEMPLES DE SIMULACIÓ COMPUTACIONAL



MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

EXEMPLES DE SIMULACIÓ COMPUTACIONAL



MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

EXEMPLES DE SIMULACIÓ COMPUTACIONAL



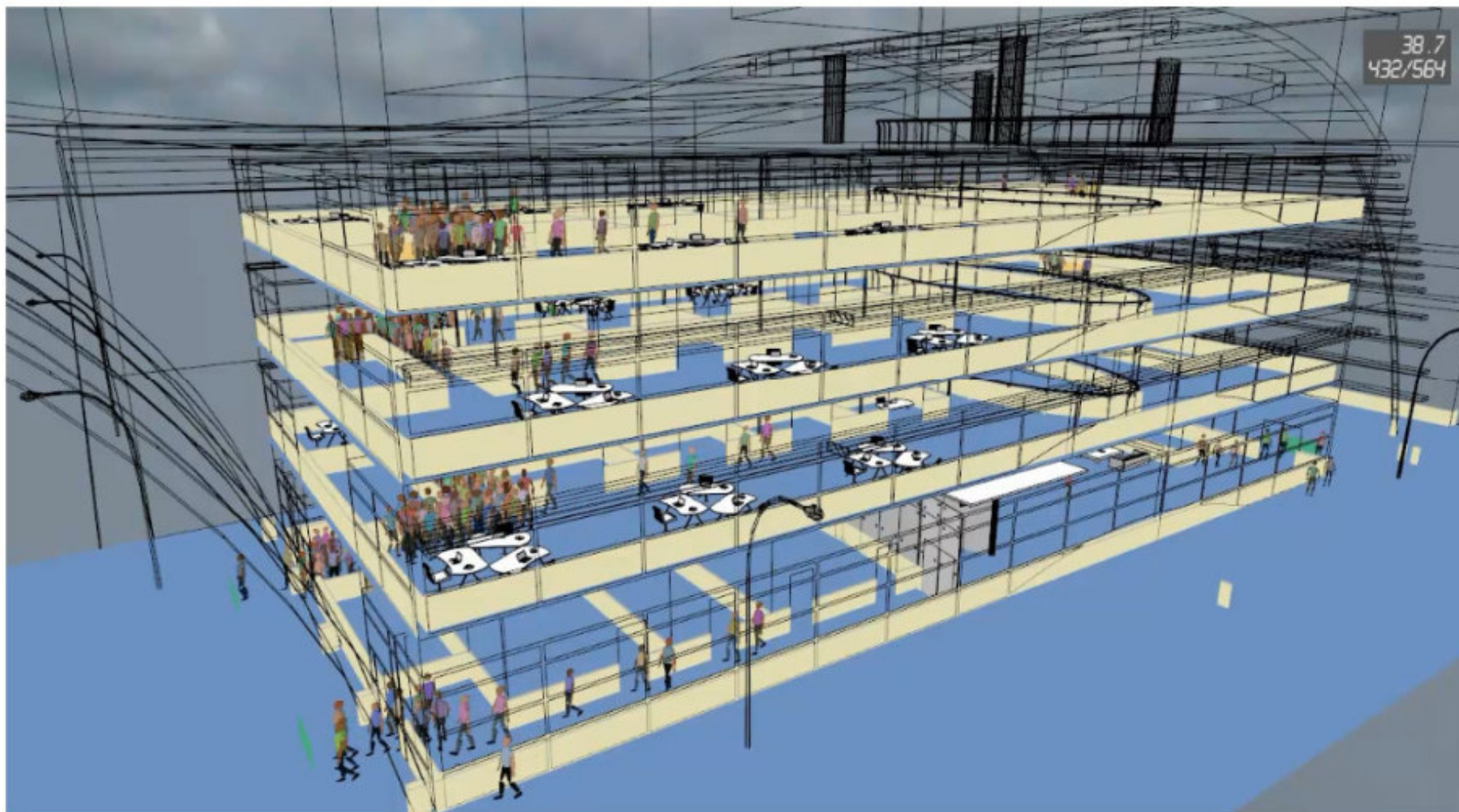
MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

EXEMPLES DE SIMULACIÓ COMPUTACIONAL



MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

EXEMPLES DE SIMULACIÓ COMPUTACIONAL



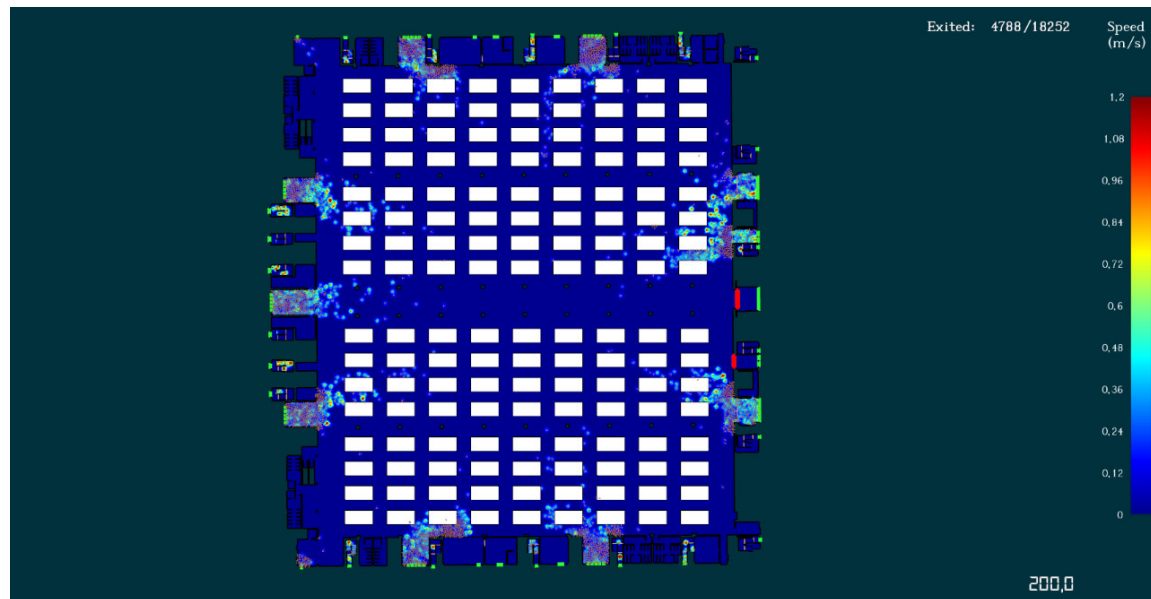
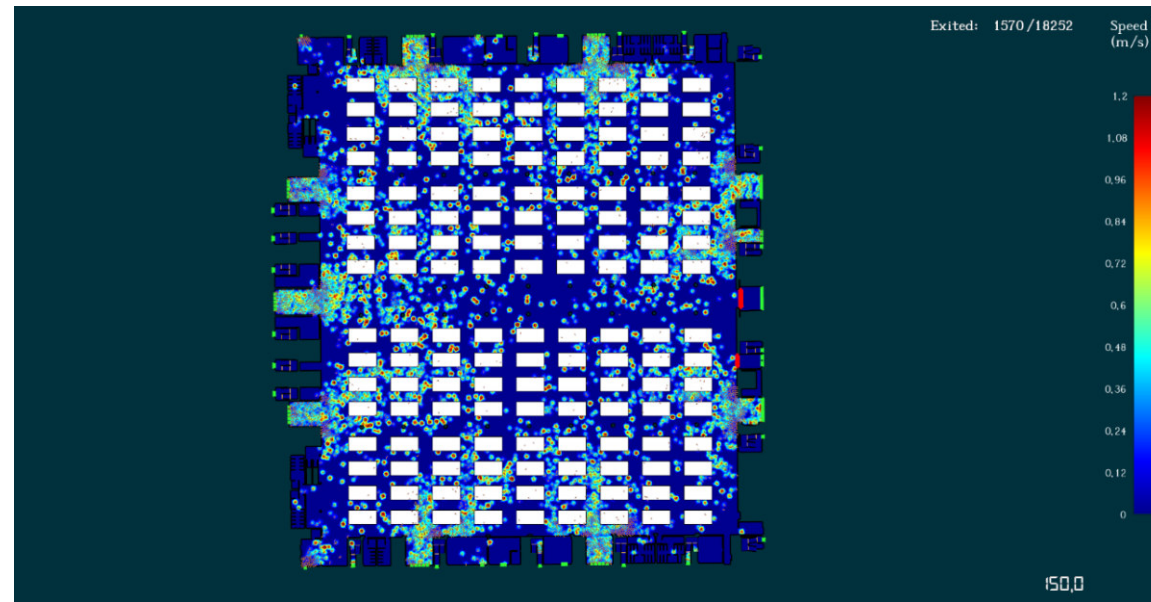
MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

EXEMPLES DE SIMULACIÓ COMPUTACIONAL



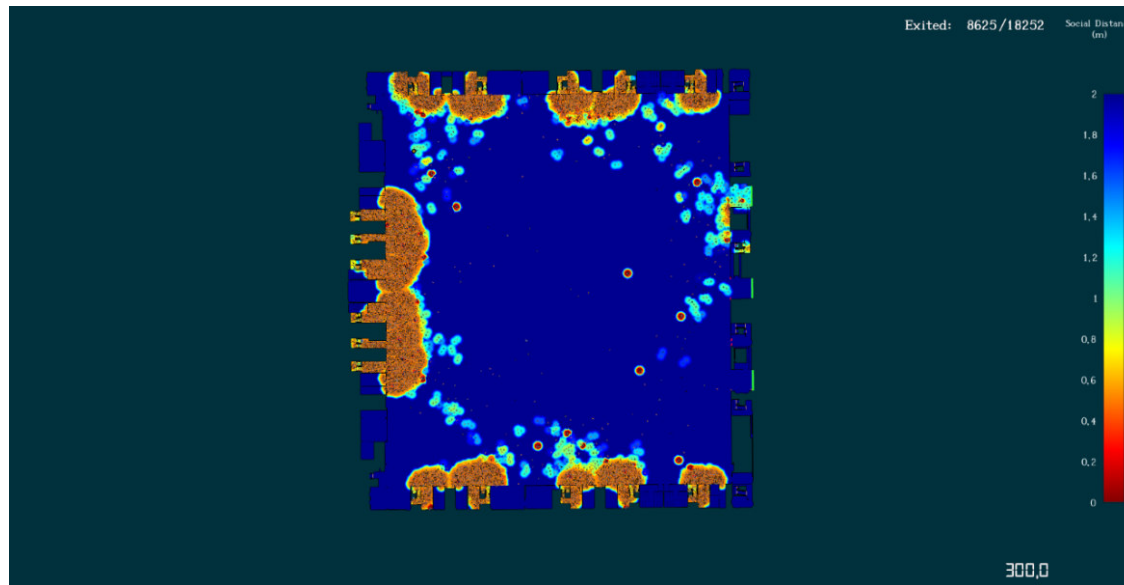
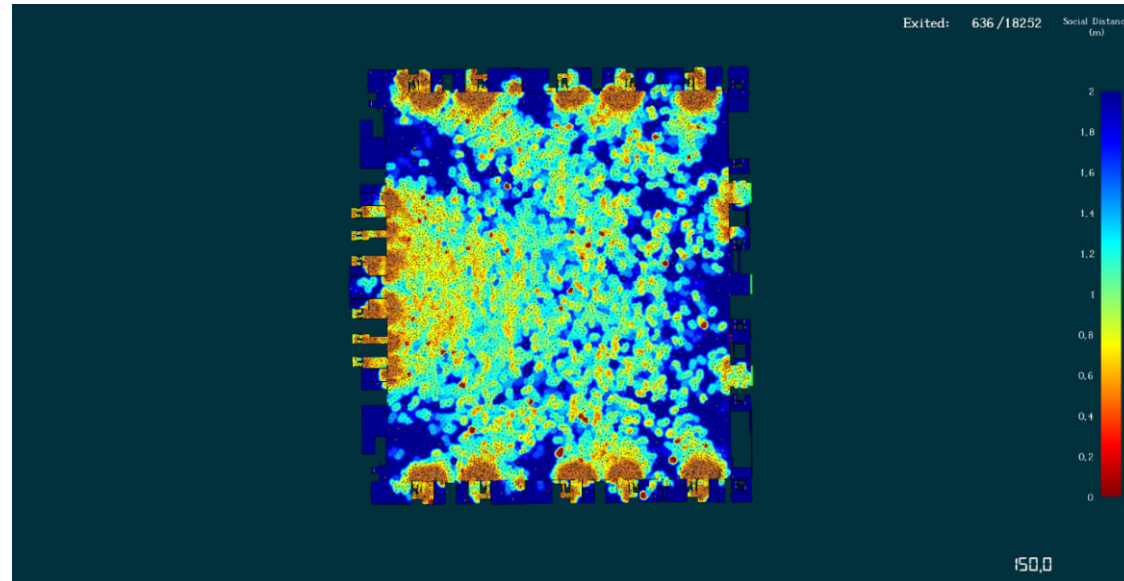
MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

VELOCITAT



MODELACIÓ DE L'EVACUACIÓ DE PERSONES

DISTANCIA SOCIAL



GRÀCIES PER LA SEVA ATENCIÓ

28/11/2024

F. Xavier Querol Esparch
Director Tècnic



Gerència de Serveis d'Habitatge, Urbanisme i Activitats
Oficina d'Activitats Regulades i Programes en Protecció Civil

Tel. 934049312

Correu electrònic. o.activitats@diba.cat

<https://www.diba.cat/web/hua>

Disseny Prestacional

Modelació Estructural i Incendi

28/11/2024

F. Xavier Querol Esparch
Director Zona Nord-Est

pefipresa
MINIMAX GmbH GROUP



Diputació
Barcelona

MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

ANÀLISI DEL COMPORTAMENT ESTRUCTURAL EN CAS D'INCENDI

- Anàlisi del comportament estructural **en situació d'incendi**. És necessari tot i havent mesures de protecció contra incendis, ja que aquestes poden fallar. Per exemple, els ruixadors tenen una efectivitat del 85%. Què passa amb el 15% restant?
- Transcendeix el projecte d'estructures i està **relacionada amb els riscos d'incendi i les mesures per mitigar-lo**.
- Estudi prestacional → **Temps de resistència necessari**. Però sotmès a quin incendi? Per exemple, l'incendi estàndard pot estar molt sobredimensionat en grans espais a on les flames i els fums estan localitzats.
- Hi ha **múltiples mètodes i eines de càlcul** per resoldre la resistència al foc davant d'una exigència prestacional.
- Un error estructural en situació d'incendi és un dels efectes més greus possibles → CTE DB-SI6

MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

RESULTATS EN INCENDIS REALS

Durada del foc: **4,5 hores**
Temperatura > **1000 °C**
durant **2 hores**

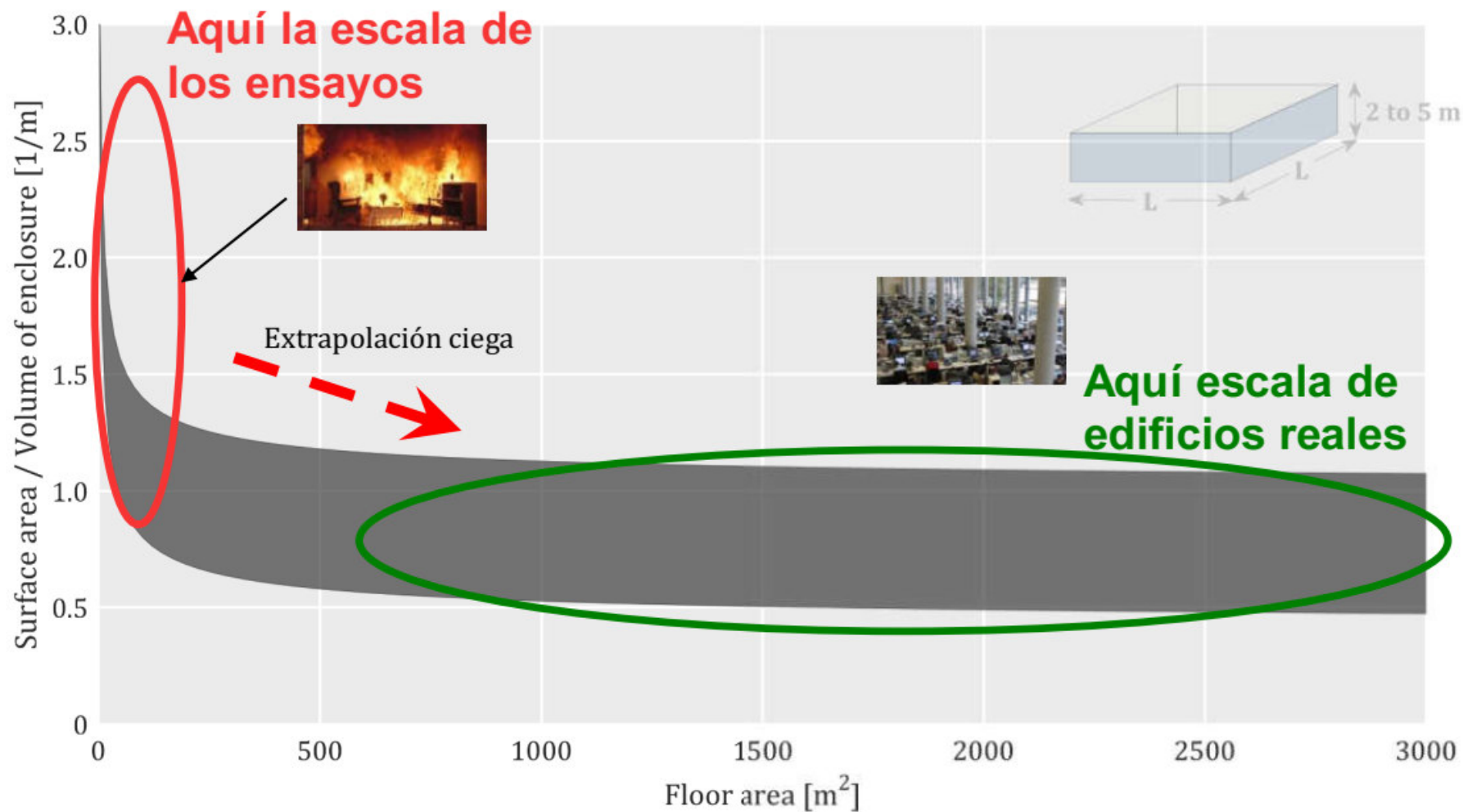
Protecció contra incendis incompleta, **temperatures d'acer estimades per sota dels 600 °C**

Encavallades i sòls de 13,5 m d'envergadura / 1 m de gruix tenien més de **500 mm de deflexió permanent**. Membres amb sivella i columnes no protegides **s'havien escurçat fins a 100 mm**, però no hi va haver col·lapse general.

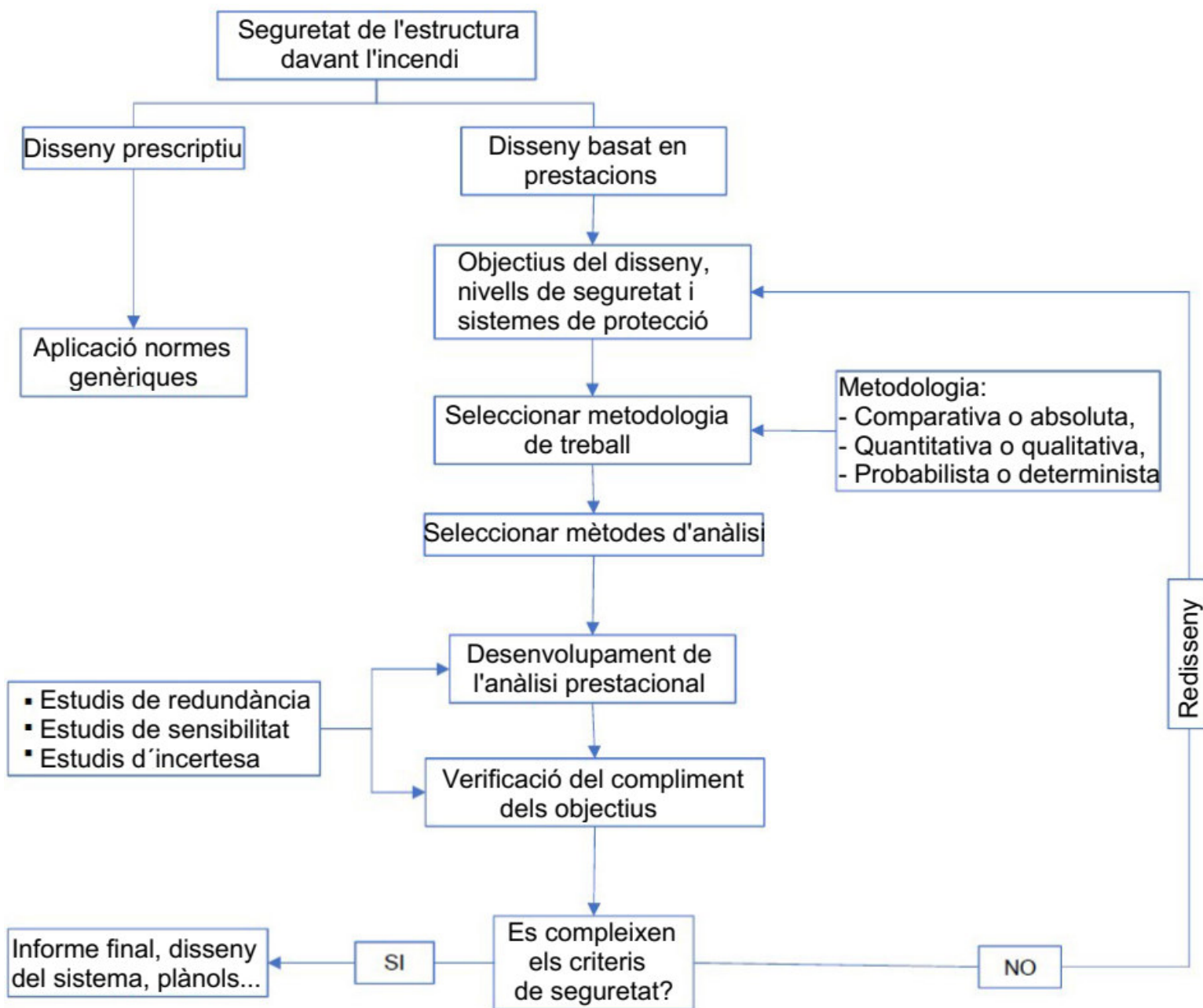


MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

LIMITACIÓ DELS ASSAIGS DE FOC



METODOLOGIA DEL DISSENY PRESTACIONAL



MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

EUROCODIS EN-1991-1-2 Accions en estructures exposades al foc

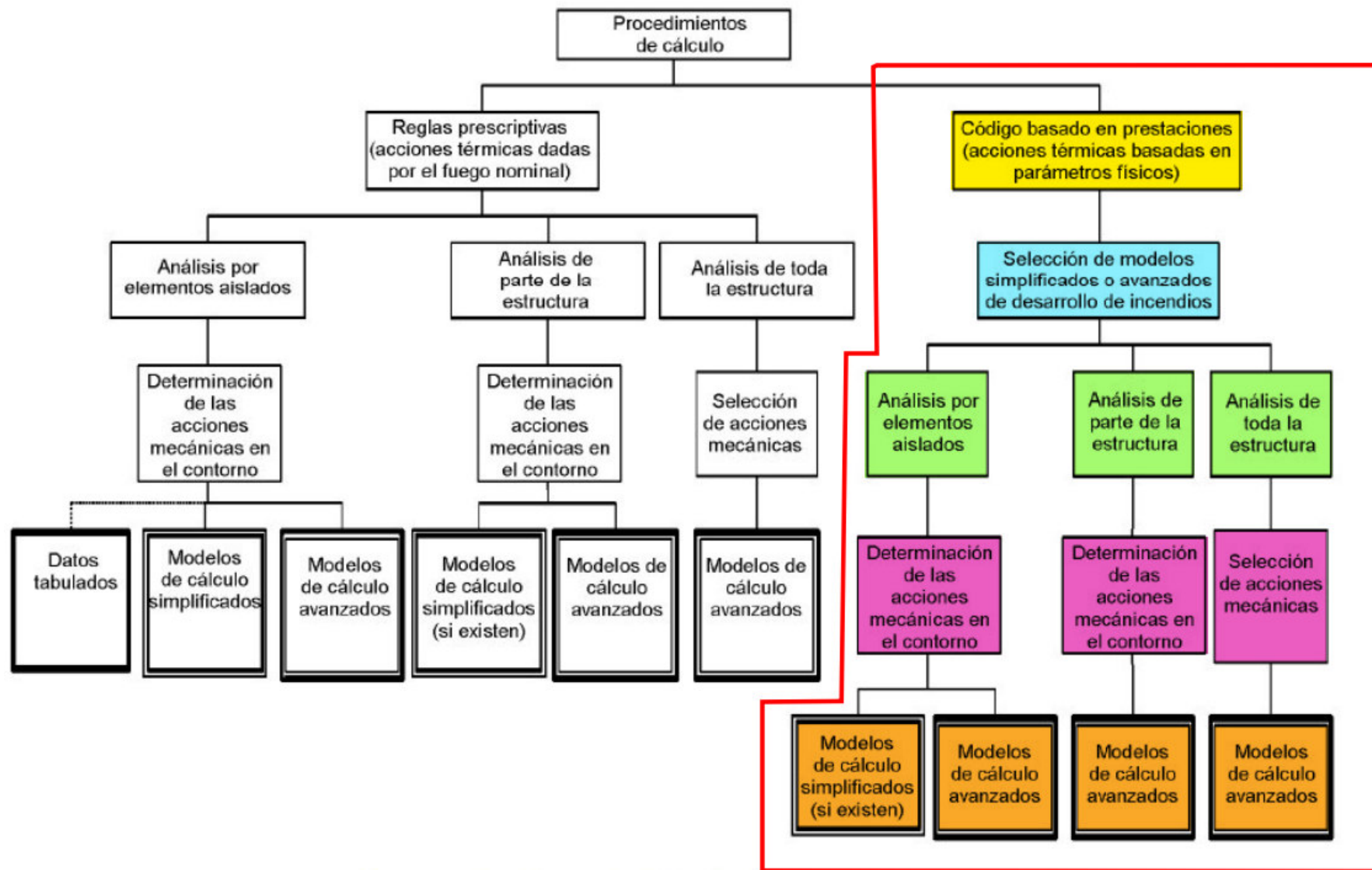


Figura 0.1 – Procedimientos de cálculo alternativos

MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

EUROCODIS EN-1991-1-2 Accions en estructures exposades al foc

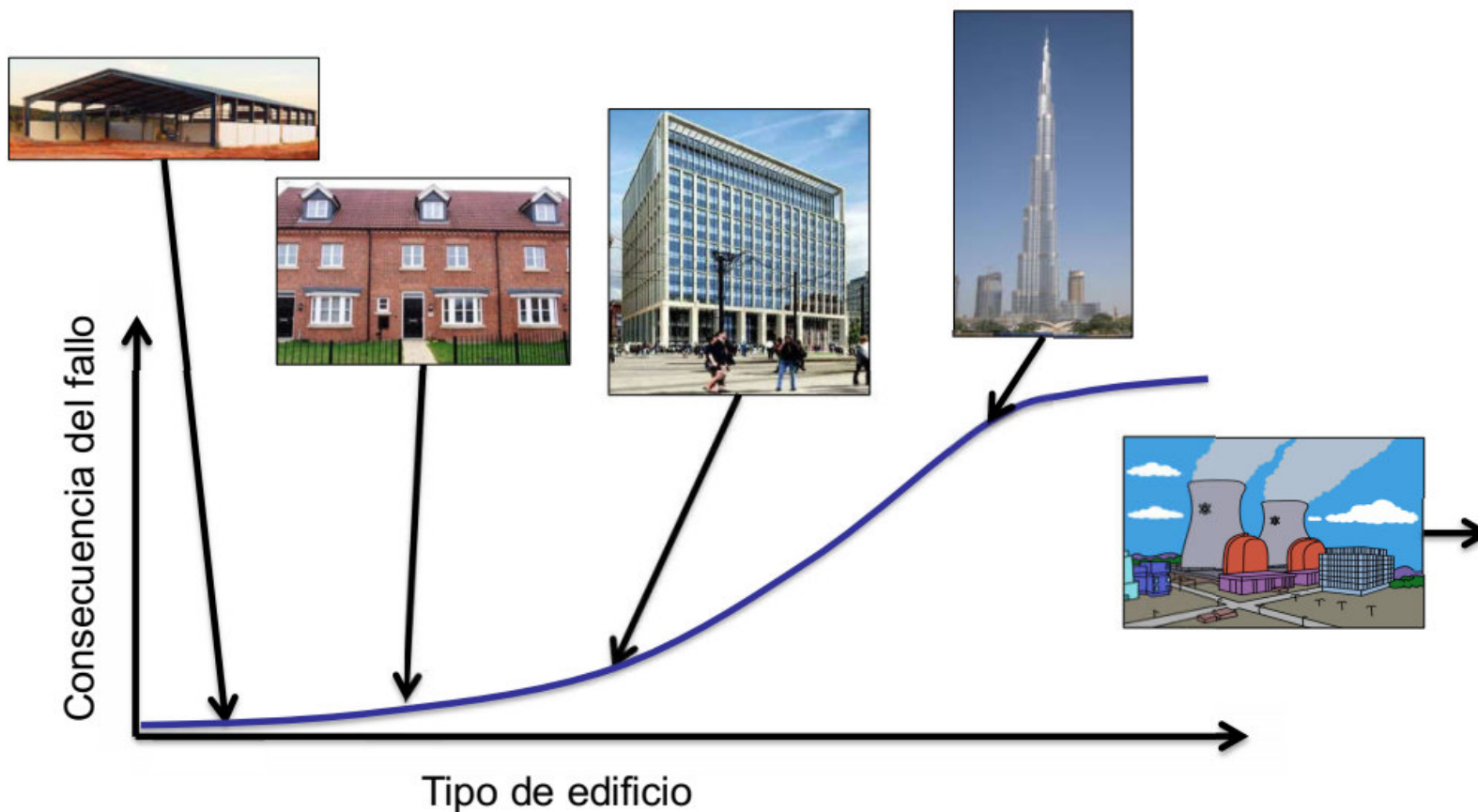
$$q_D = q_K \cdot m \cdot \delta_{q1} \delta_{q2} \delta_1 \dots \delta_n$$

$$q_K = \frac{1}{A} \sum M_i H_i \psi_i$$

Fire activation risk factor due of size of the compartment		Floor area (m ²)				
		25	250	2500	5000	10000
δ_{q1}		1.1	1.5	1.9	2.0	21.3
Fire activation risk factor due of occupancy type		Examples of type of occupancies				
		museum	offices	engines factories	chemical factories	fireworks factories
δ_{q2}		0.78	1.0	1.22	1.44	1.66
Fire Fighting Measures	Automatic suppression system	δ_{n1} Automatic Water suppression system				
		0.61				
		δ_{n2} Independent water supplies				
		0		1		2
	1		0.87		0.7	
	Automatic Fire detection system	δ_{n3} Heat detection				
		0.87 or 0.73				
		δ_{n4} Smoke detection				
	0.87 or 0.73					
	Automatic alarm transmission to fire brigade		δ_{n5} 0.87			
Manual Fire Suppression	Work Fire brigade		δ_{n6} 0.61 or 0.78			
	Offsite Fire brigade		δ_{n7} 0.61 or 0.78			
	Safe access route		δ_{n8} 0.9 or 1 or 1.5			
	Fire Fighting devices		δ_{n9} 1 or 1.5			

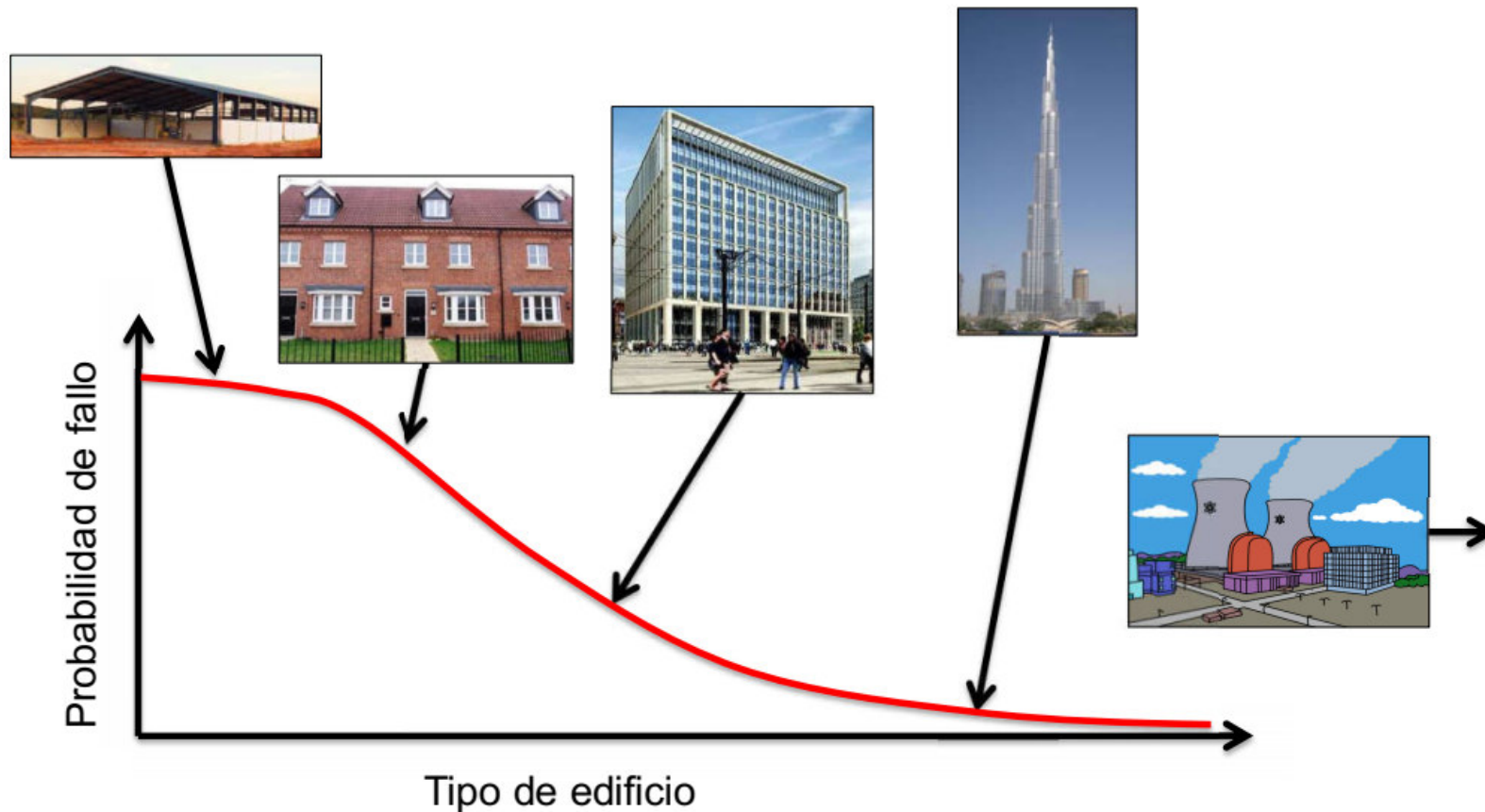
MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

CONSEQUENCIES DE FALLADA ESTRUCTURAL



MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

PROBABILITAT DE FALLADA ESTRUCTURAL

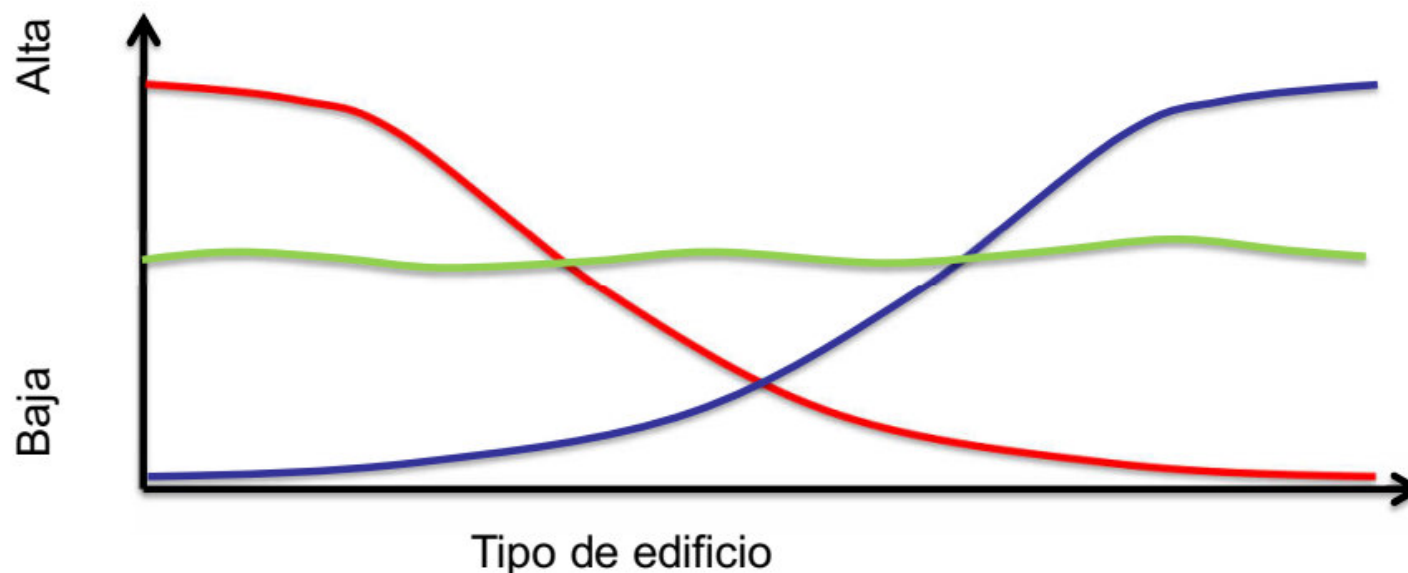


MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

RISC DE FALLADA ESTRUCTURAL

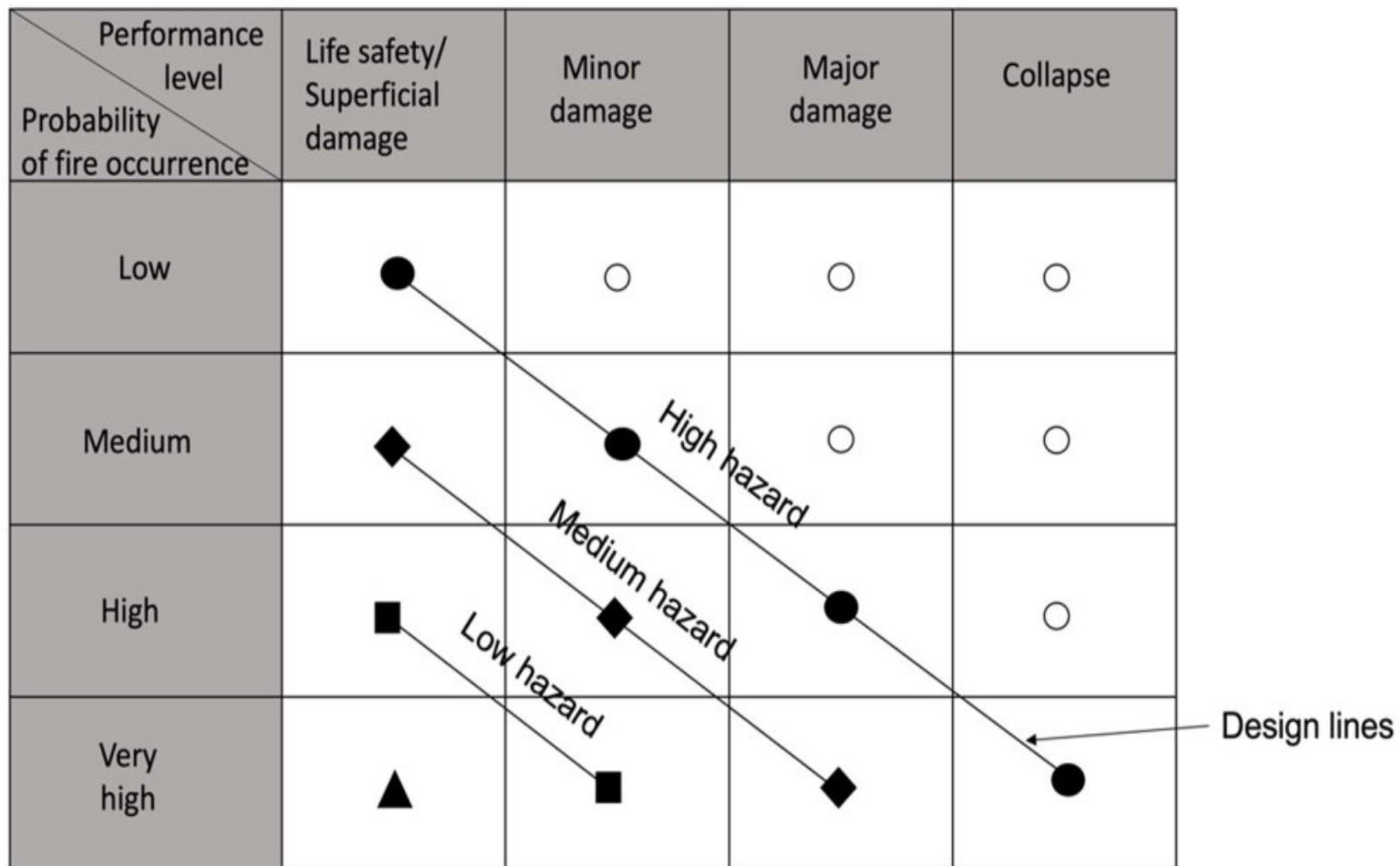
- Probabilidad
- Consecuencia

Probabilidad x Consecuencia = Riesgo



MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

RISC TOLERABLE



MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

CTE DB-SI6

1 Generalidades

- 1 La elevación de la temperatura que se produce como consecuencia de un incendio en un edificio afecta a su estructura de dos formas diferentes. Por un lado, los materiales ven afectadas sus propiedades, modificándose de forma importante su capacidad mecánica. Por otro, aparecen acciones indirectas como consecuencia de las deformaciones de los elementos, que generalmente dan lugar a tensiones que se suman a las debidas a otras acciones.
- 2 En este Documento Básico se indican únicamente métodos simplificados de cálculo suficientemente aproximados para la mayoría de las situaciones habituales (véase anejos B a F). Estos métodos sólo recogen el estudio de la *resistencia al fuego* de los elementos estructurales individuales ante la *curva normalizada tiempo temperatura*.
- 3 Pueden adoptarse otros modelos de incendio para representar la evolución de la temperatura durante el incendio, tales como las denominadas *curvas paramétricas* o, para efectos locales los modelos de incendio de una o dos zonas o de *fuegos localizados* o *métodos basados en dinámica de fluidos (CFD)*, según siglas inglesas) tales como los que se contemplan en la norma UNE-EN 1991-1-2:2004. En dicha norma se recogen, asimismo, también *otras curvas nominales* para fuego exterior o para incendios producidos por *combustibles de gran poder calorífico*, como hidrocarburos, y métodos para el estudio de los elementos externos situados fuera de la envolvente del *sector de incendio* y a los que el fuego afecta a través de las aberturas en fachada.
- 4 En las normas UNE-EN 1992-1-2:2011, UNE-EN 1993-1-2:2016, UNE-EN 1994-1-2:2016, UNE-EN 1995-1-2:2016, se incluyen modelos de resistencia para los materiales.
- 5 Los modelos de incendio citados en el párrafo 3 son adecuados para el estudio de edificios singulares o para el tratamiento global de la estructura o parte de ella, así como cuando se requiera un estudio más ajustado a la situación de incendio real.

MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

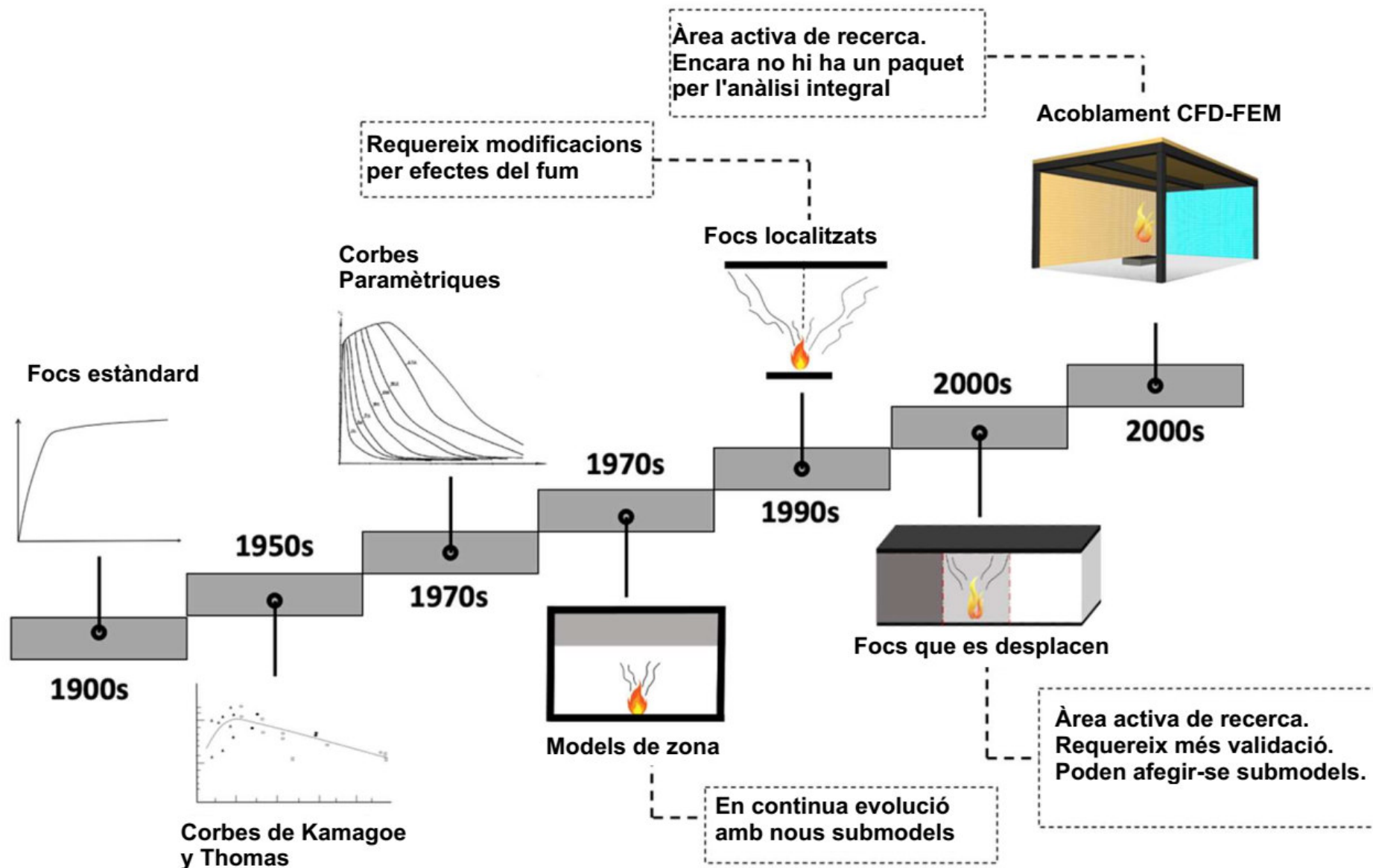
CTE DB-SI6

2 Resistencia al fuego de la estructura

- 1 Se admite que un elemento tiene suficiente *resistencia al fuego* si, durante la duración del incendio, el valor de cálculo del efecto de las acciones, en todo instante t , no supera el valor de la resistencia de dicho elemento. En general, basta con hacer la comprobación en el instante de mayor temperatura que, con el modelo de *curva normalizada tiempo-temperatura*, se produce al final del mismo.
- 2 En el caso de *sectores de riesgo mínimo* y en aquellos *sectores de incendio* en los que, por su tamaño y por la distribución de la *carga de fuego*, no sea previsible la existencia de *fuegos totalmente desarrollados*, la comprobación de la *resistencia al fuego* puede hacerse elemento a elemento mediante el estudio por medio de *fuegos localizados*, según se indica en el Eurocódigo 1 (UNE-EN 1991-1-2: 2004) situando sucesivamente la *carga de fuego* en la posición previsible más desfavorable.
- 3 En este Documento Básico no se considera la capacidad portante de la estructura tras el incendio.

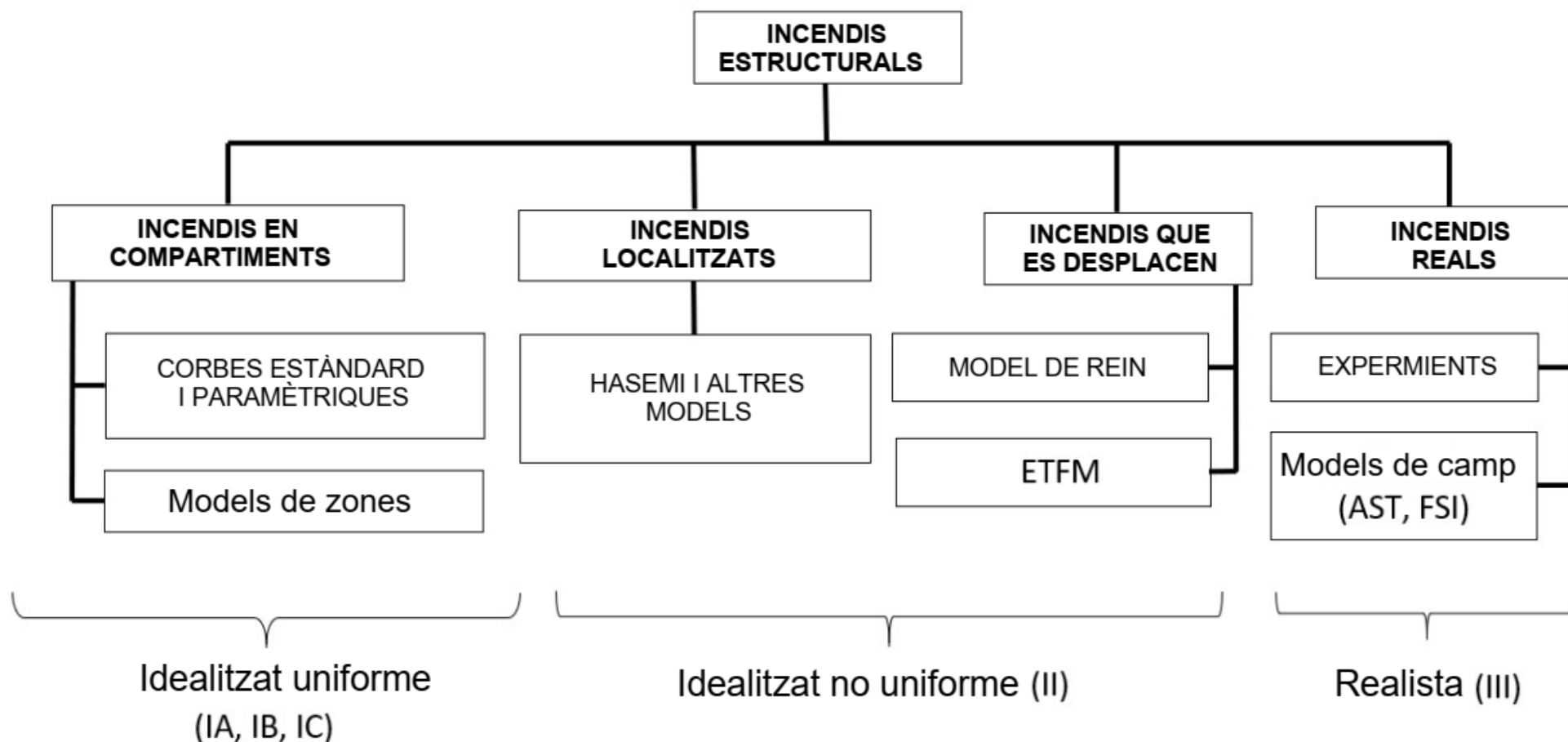
MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

HISTÒRIA DELS MODELS DE FOC I DESENVOLUPAMENT ACTUAL



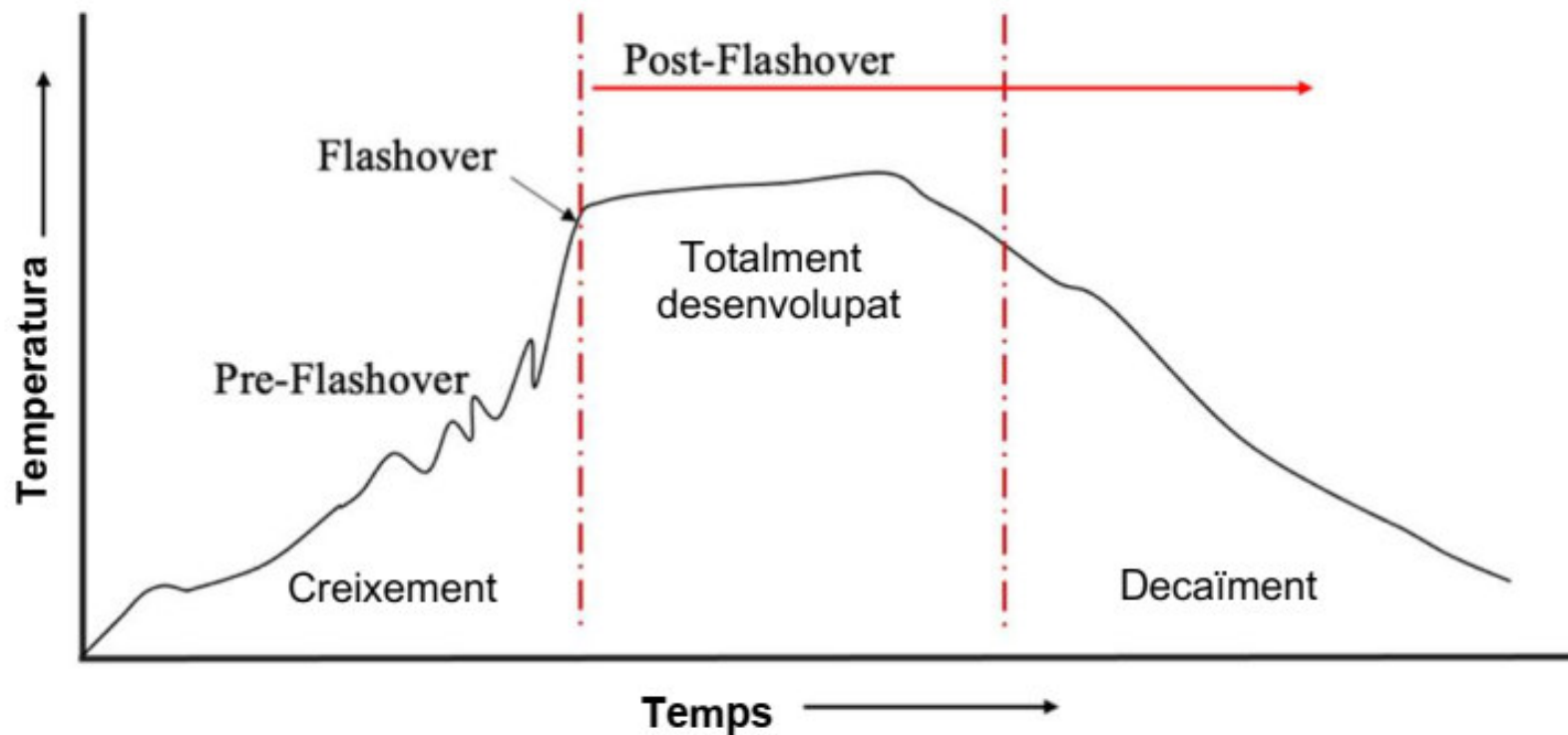
MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

CLASSIFICACIÓ DELS MODELS PER RESISTÈNCIA ESTRUCTURAL



MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

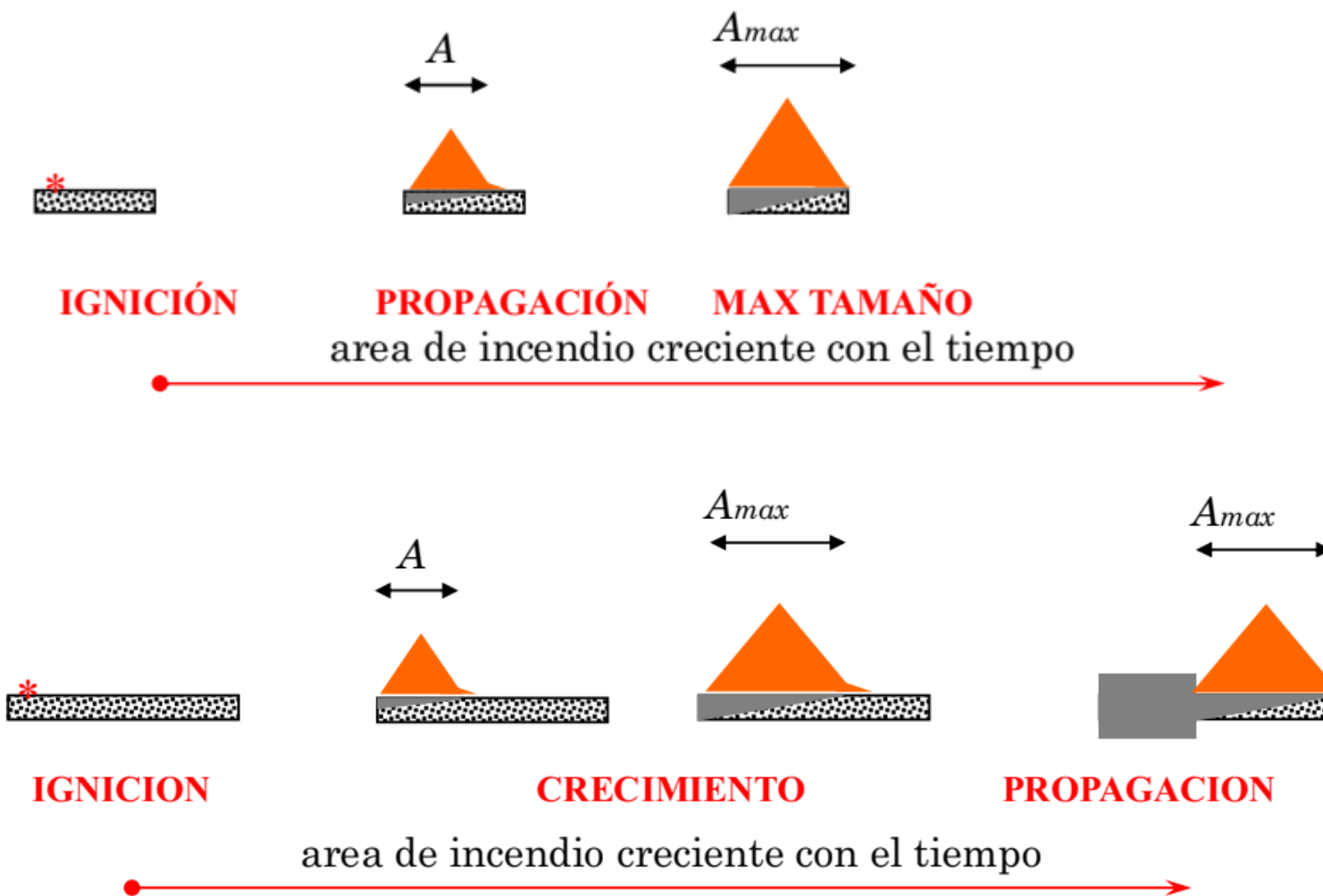
ETAPES DE L'INCENDI EN UN COMPARTIMENT



MODELACIÓ DE L'INCENDI

FOCS QUE ES DESPLACEN

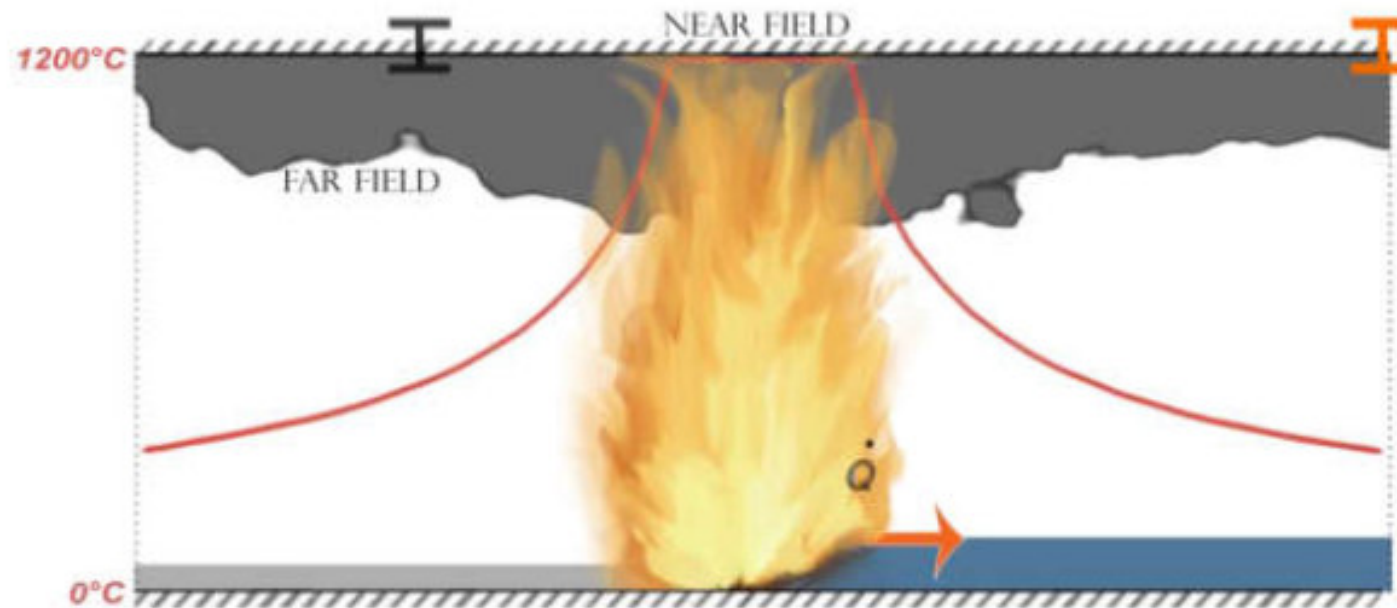
- Comparatiu versió estacionaria vs en desplaçament



MODELACIÓ DE L'INCENDI

FOCS QUE ES DESPLACEN

- La distribució de temperatures no es uniforme.



MODELACIÓ DE L'INCENDI

TIPUS DE FOC A CONSIDERAR



Acción localizada



Acción generalizada



Fuego exterior

MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

CLASSIFICACIÓ DELS MODELS PER RESISTÈNCIA ESTRUCTURAL

CATEGORIA		DESCRIPCIÓ	MODELS	
Models Idealitzats	Uniforme	IA	Temperatura uniforme, tots els components estructurals estan envoltats pel foc, completament desenvolupats i no es descriu cap fase de refredament	Corbes ISO, ASTM, hidrocarburs
		IB	Una temperatura màxima en estat estacionari durant un període de temps, ventilació controlada, foc totalment desenvolupat, temperatura uniforme	Kawagoe, Thomas, Law, Babrauskas
		IC	Temperatures variables en el temps però distribuïdes uniformement, també representen la fase de refredament del desenvolupament del foc.	Magnusson i Thelandersson, Pettersson, Corbes paramètriques a l'Eurocodi I, models de zones
	No uniforme	II	Incendis localitzats, combustible controlat, incendis itinerants	Model d'Hasemi, model de Rein, ETFM
Models Realistes		III	Distribucions de temperatura realistes	Experiments, models de camp (mètodes FSI, AST)

MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

RESUM D'ALGUNS MODELS DE FOC DESTACATS (ESTRUCTURAL)

Models		Corba / Característiques	Assumpcions	Limitacions
Temperatura nominal - Corbes de temps (Eurocodi I)	ISO834	- El mètode més senzill	- Temperatura uniforme	- No hi ha representació de la fase de refredament del foc
	Hidrocarburs	- Ampliament utilitzat en el disseny estructural	- Les temperatures radiatives es prenen com a temperatura del gas	- Cap connexió amb la càrrega de combustible o la ventilació o la geometria del compartiment
	ASTM E118	- Les temperatures dels gasos s'utilitzen per calcular els fluxos de calor sobre les superfícies	- Factor de configuració = 1 - Valors fixos del coeficient de transferència de calor convectoria	- Aplicable quan la longitud òptica pot ser molt petita per utilitzar l'efecte de la radiació local
Magnusson and Thelandersson		- Representa la temperatura de la fase de refredament - Aplicable a diferents tipus de material estructural i càrrega de combustible - Expressió per a obertures horitzontals i verticals	- Combustió completa, on es consumeix tot l'aire i el combustible - Temperatura uniformement distribuïda - Els productes dels gasos de combustió i l'aire tenen la mateixa calor específica i el seu volum es manté constant	- Aplicable només per a foc de ventilació controlada - Només per al foc completament desenvolupat i el compartiment ple de sutge
Pettersson		- Extended study of Magnusson - Parametric corves are provided for different opening factors	Igual que Magnusson	Igual que Magnusson

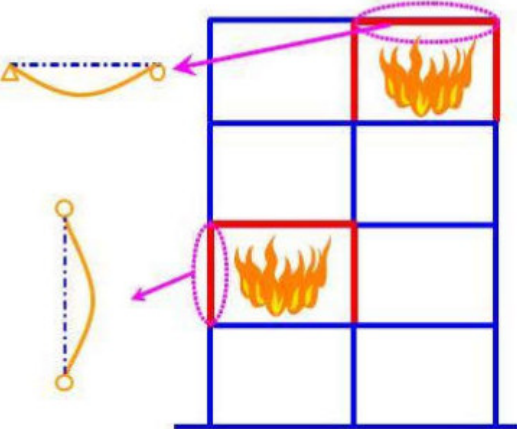
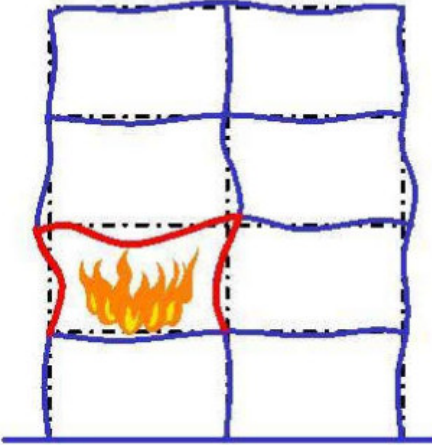
MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

RESUM D'ALGUNS MODELS DE FOC DESTACATS (ESTRUCTURAL)

Models		Corba / Característiques	Assumpcions	Limitacions
Babrauskas		<ul style="list-style-type: none"> - Proporciona correlació teòrica - Es quantifiquen diversos factors, com la combustió, l'obertura de ventilació 	<ul style="list-style-type: none"> - Constant empírica de la temperatura màxima aconseguida durant la combustió - Per a la condició de flashover i la temperatura és uniforme a tot el compartiment 	<ul style="list-style-type: none"> - Escenaris d'incendi controlat ventilat
Law		<ul style="list-style-type: none"> - Proporciona la correlació per a la durada del foc - També introdueix l'expressió de càrrega de foc 	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatures uniformes - Foc totalment desenvolupat 	<ul style="list-style-type: none"> - Escenaris d'incendi controlat ventilat
Eurocodi I	Foc paramètric	<ul style="list-style-type: none"> - Es presenta la correlació de la fase de calefacció i la de refrigeració 	<ul style="list-style-type: none"> - El combustible s'esgota completament 	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicable per a superfícies inferiors a 500 metres quadrats - Escenaris d'incendi amb ventilació controlada
	Incendi localitzat	<ul style="list-style-type: none"> - Es dona l'expressió per a dos escenaris d'incendi (la flama arriba al sostre i on la flama no arriba al sostre) 	<ul style="list-style-type: none"> - La temperatura superficial es considera temperatura del gas - Hi ha una sèrie de valors empírics presents a les correlacions 	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicable quan la potència calorífica és inferior a 50 MW - No es considera pèrdua per radiació - La radiació del sotge no s'inclou en els càlculs

MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

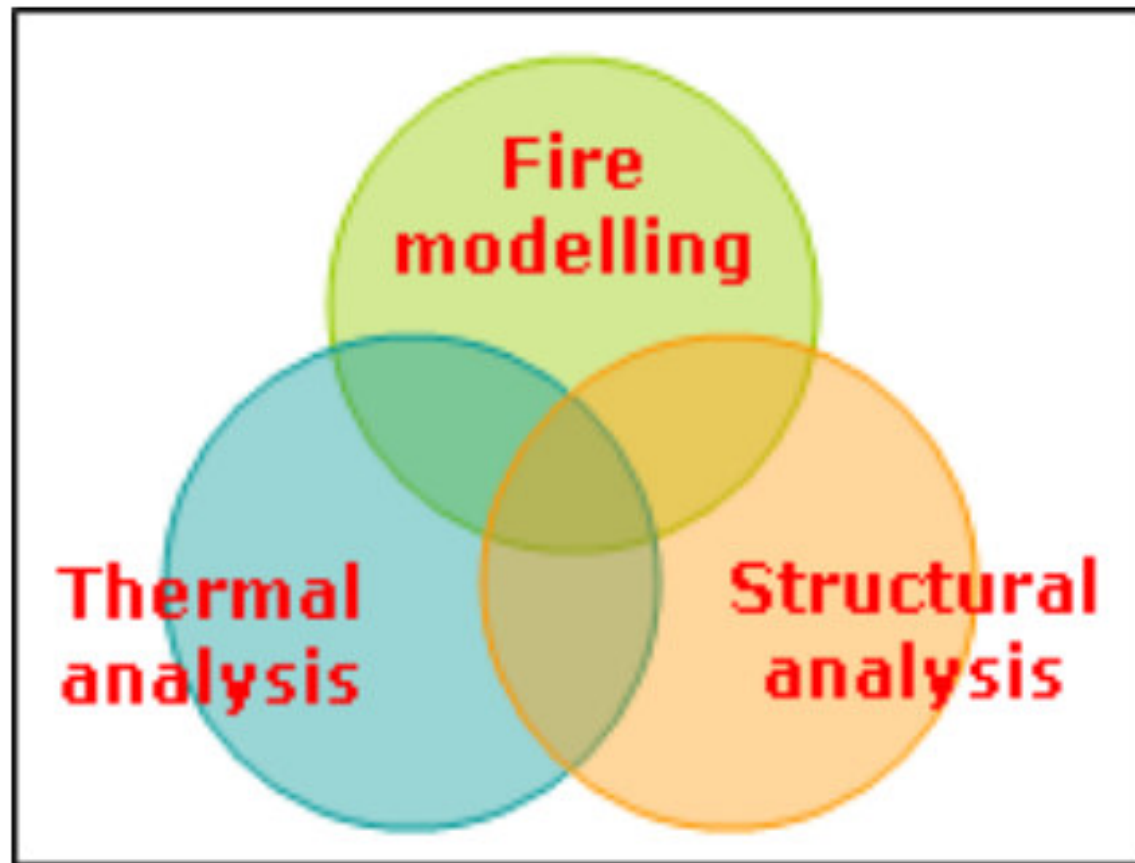
TIPUS D'ANÀLISI

Análisis por elementos	Análisis global/ parcial de la estructura
	
<p>Análisis estructural de elementos independientes Fácil de aplicar Generalmente para condiciones de fuego nominal</p>	<p>Efectos de interacción entre las distintas partes de la estructura En función del recinto Estudio de la estabilidad global</p>

MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

MODELS

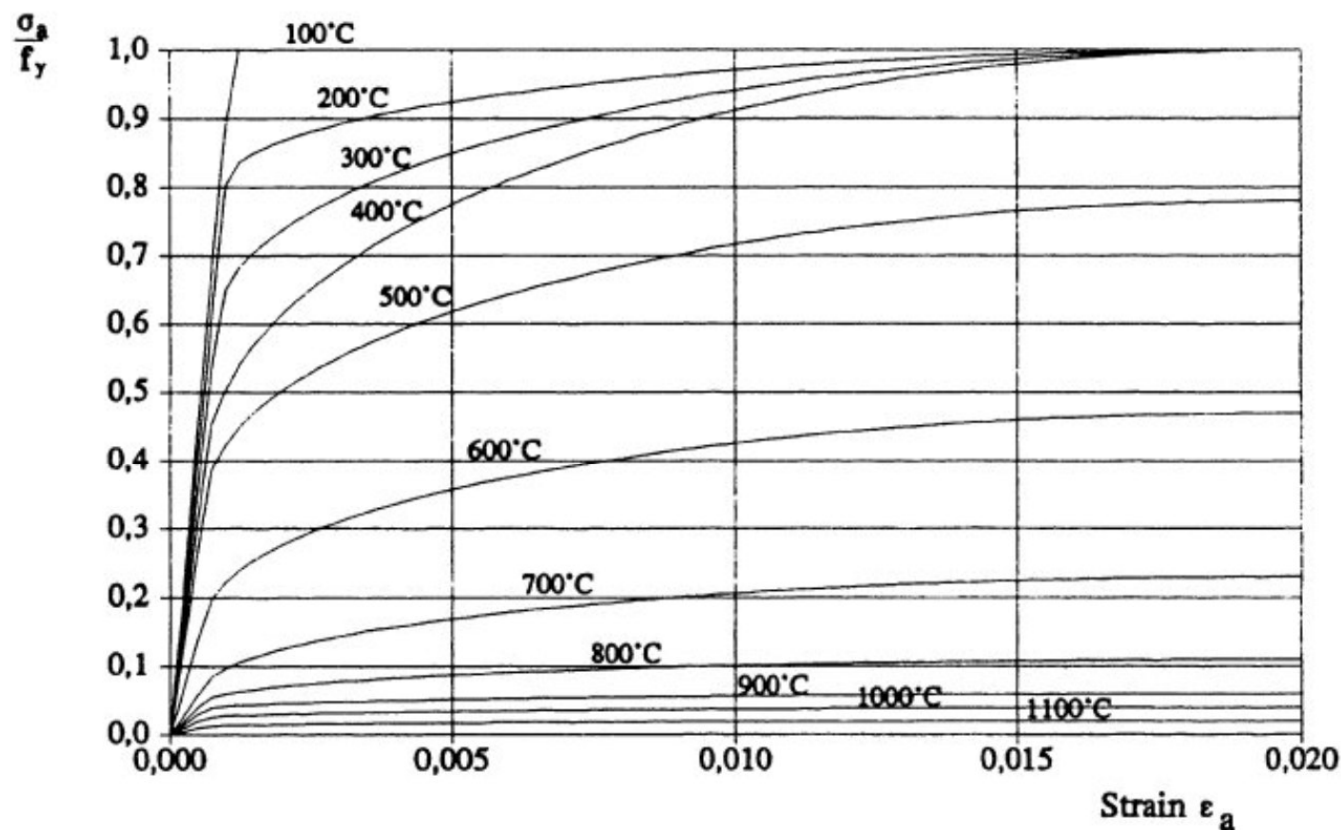
Apart dels models de l'incendi fan falta models addicionals per l'anàlisi estructural



MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

VARIACIÓ DE LA RESISTÈNCIA DE L'ACER EN CAS D'INCENDI

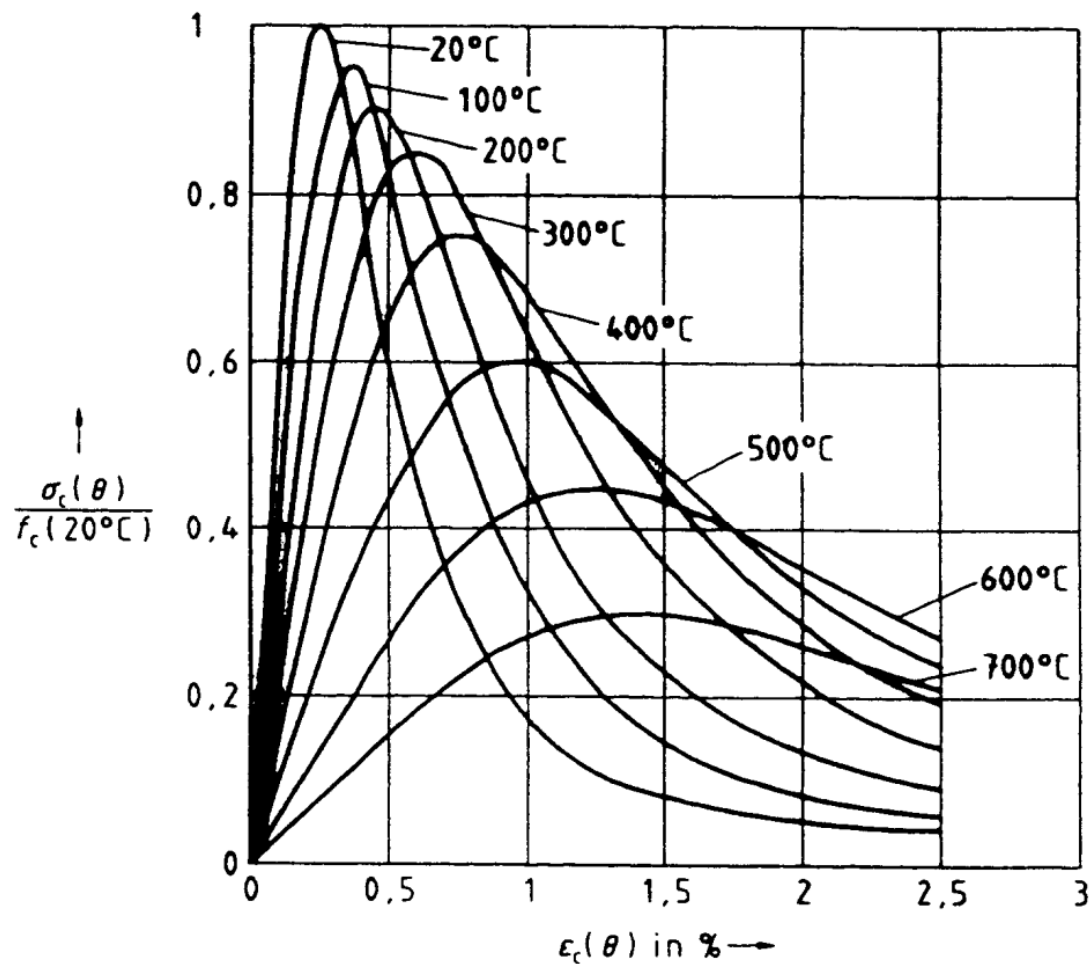
El foc escalfa l'acer, l'acer perd rigidesa i comença a perdre resistència a temperatures superiors als 400°C, amb només la meitat de la resistència a 550°C.



Source: ENV 1993-1-2:1995
(S235 steel)

MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

VARIACIÓ DE LA RESISTÈNCIA FORMIGÓ SILICI EN CAS D'INCENDI



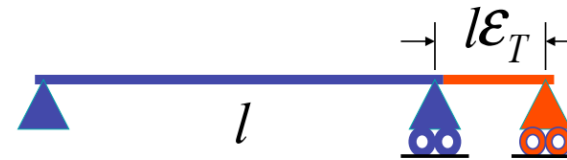
Source: ENV 1992-1-2:1995

MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

EFFECTE DE LA DILATACIÓ TÈRMICA EN CAS D'INCENDI

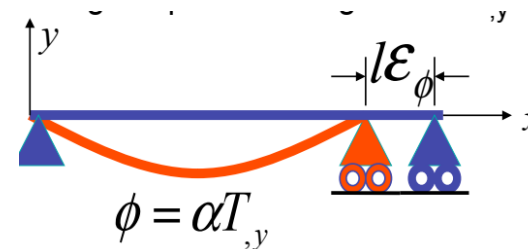
Expansió tèrmica induïda per l'increment mitjà de temperatura ΔT

$$\varepsilon_T = \alpha \Delta T$$

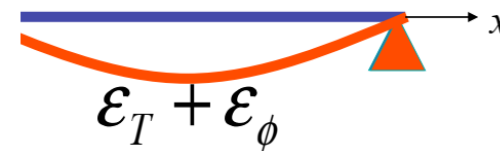


Curvatura tèrmica ϕ induïda pel gradient tèrmic de profunditat T_y

$$\varepsilon_\phi = 1 - \frac{\sin l\phi/2}{l\phi/2}$$



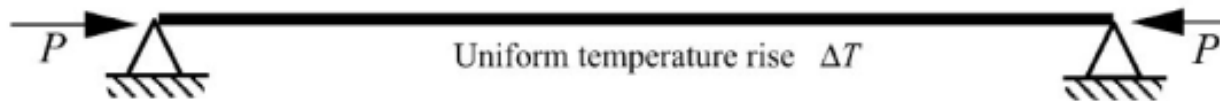
La combinació dels dos efectes condueix a grans deflexions i sovint esforços molt baixos (forces internes)



MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

EFFECTE DE LA DILATACIÓ TÈRMICA EN CAS D'INCENDI

Expansió tèrmica amb extrems restringits contra la translació

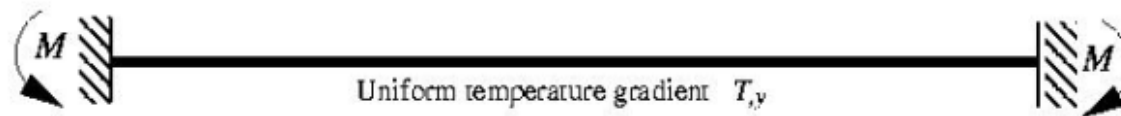


$$\varepsilon_t = \varepsilon_T + \varepsilon_m = 0$$

$$\varepsilon_T = -\varepsilon_m$$

$$P = EA\varepsilon_m = -EA\varepsilon_T = -EA\alpha\Delta T$$

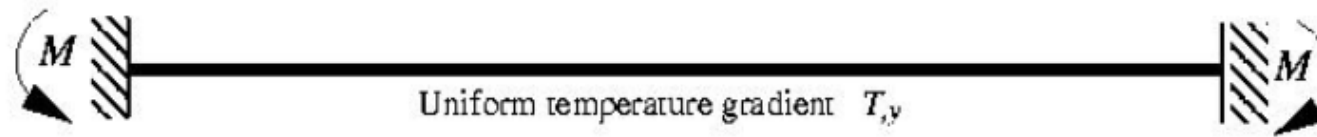
Arqueig tèrmic amb extrems subjectes contra rotació



$$M = EI\phi = EI\alpha T_y$$

MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

EFFECTE DE LA DILATACIÓ TÈRMICA EN CAS D'INCENDI



Biga forta (fluència): a 125°C ja si arriba.

$$\Delta T_y = \frac{\sigma_y}{E\alpha}$$

Biga esvelta (pandeig):

$$\Delta T_{cr} = \frac{\pi^2}{\alpha\lambda^2}$$

MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

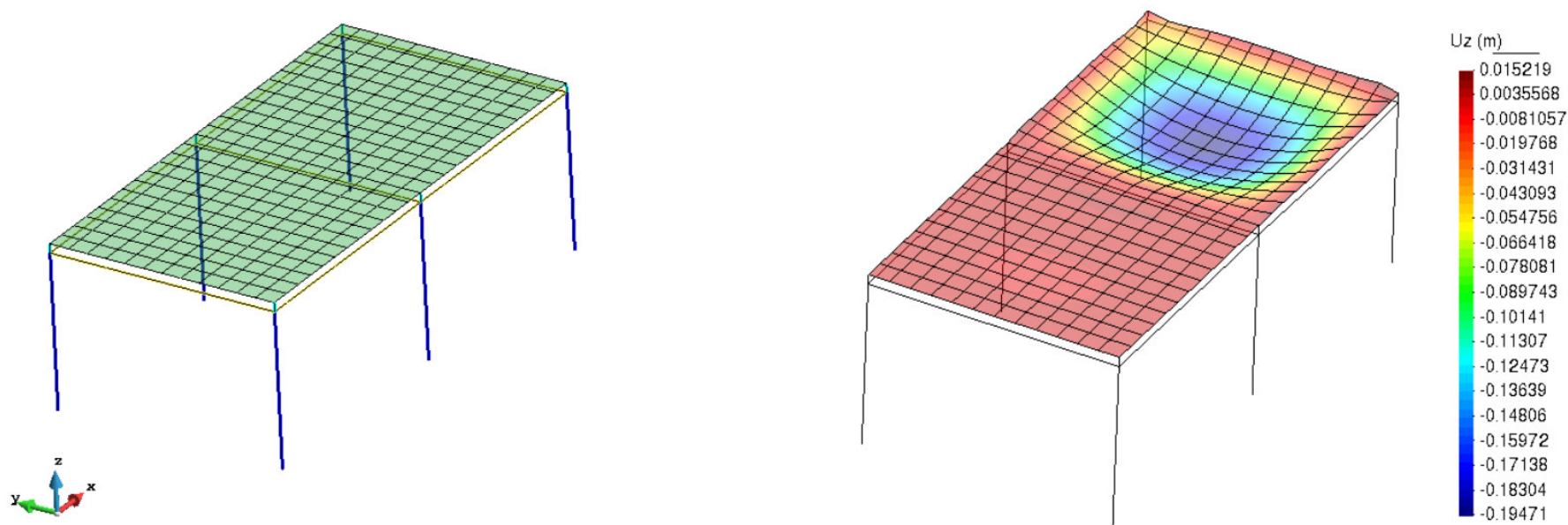
MÈTODES UTILITZATS EN L'ACOBLAMENT CFD-FEM

MODELS	SIMPLIFICACIONS / ASSUMPCIONS	CARACTERÍSTIQUES	LIMITACIONS
FSI (Interfície de l'Estructura al Foc)	<ul style="list-style-type: none"> - Mitjana espacial de les magnituds en direcció vertical. - Propietats tèrmiques uniformes a les capes superiors. - Sutge molt gruixut a les capes superiors. 	<ul style="list-style-type: none"> - Proporciona resultats realistes a partir d'un model de CFD. - Pot definir els gradients tèrmics en direcció vertical. 	<ul style="list-style-type: none"> - No aporta gradients tèrmics en sentit horitzontal, condició homogènia sobre la superfície. - Proporcionaria resultats excessivament conservadors per al foc que es desplaça
AST (Temperatura de superfície adiabàtica)	<ul style="list-style-type: none"> - Considera el valor del factor de visió = 1 - Considera l'emissivitat de les partícules de sutge = 1 	<ul style="list-style-type: none"> - Inclou la informació de la transferència de calor convectiva i dels fluxos radiatius de totes les superfícies. - Fàcil d'aplicar doncs hi ha una única quantitat per transferir al model - El propi FDS pot calcular i proporcionar un fitxer de sortida que conté valors temporals d'AST. 	<ul style="list-style-type: none"> - Resultats conservadors on la superfície és còncava o la profunditat òptica és gran. - Pot proporcionar resultats conservadors per a foc localitzat o que es desplaça.
Jowsey	<ul style="list-style-type: none"> - Condició totalment envoltat pels fums / flames - Foc totalment desenvolupat - Sense retroalimentació radiativa de la superfície estructural 	<ul style="list-style-type: none"> - Una eina de postprocessament que pren dades de sortida de qualsevol CFD. - Proporciona fluxos de calor més realistes en funció de les condicions locals. - Càlcul de la calor convectiva a partir de les velocitats obtingudes amb CFD. 	<ul style="list-style-type: none"> - Resultats conservadors per a ambients òpticament primers (capa de fums fina).

MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

EXEMPLES

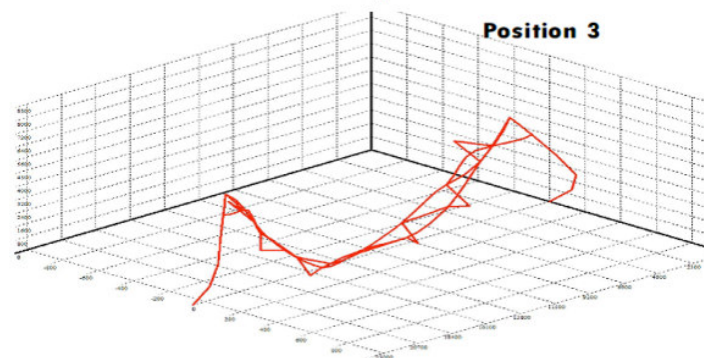
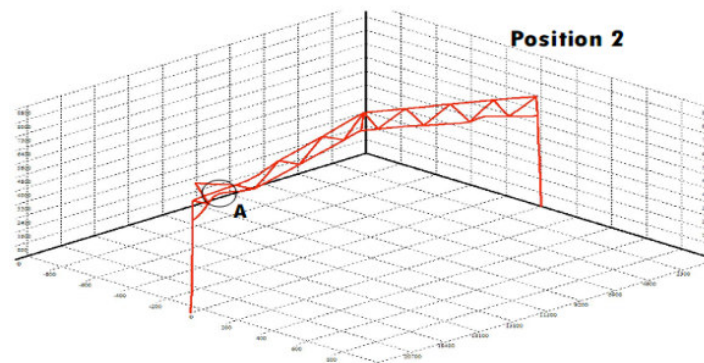
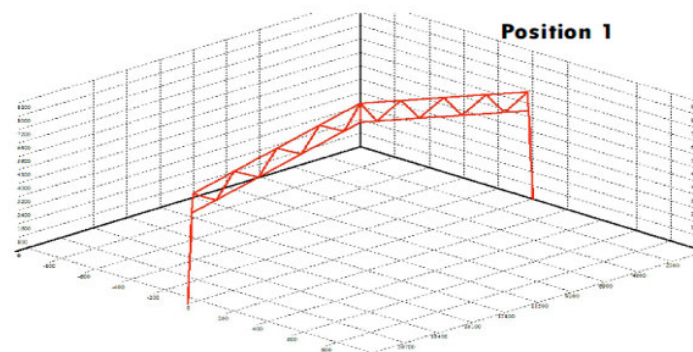
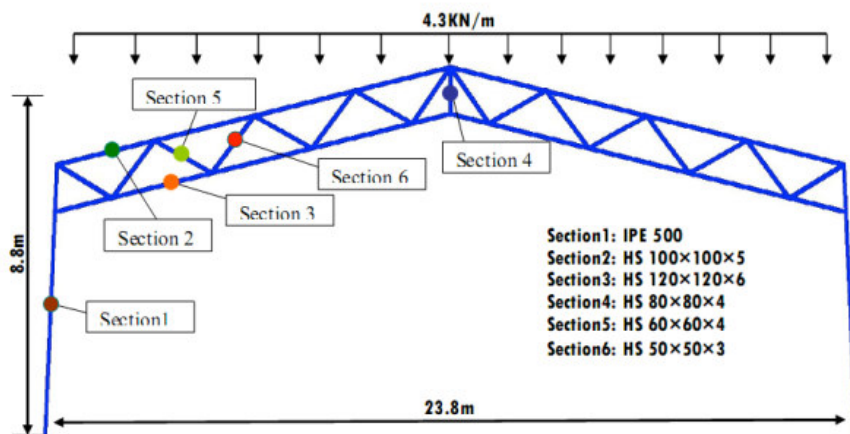
- Estructura d'acer de dues traveses + terra de formigó.
- Gradient lineal amb 800 °C inferior i 100 °C superior.



MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

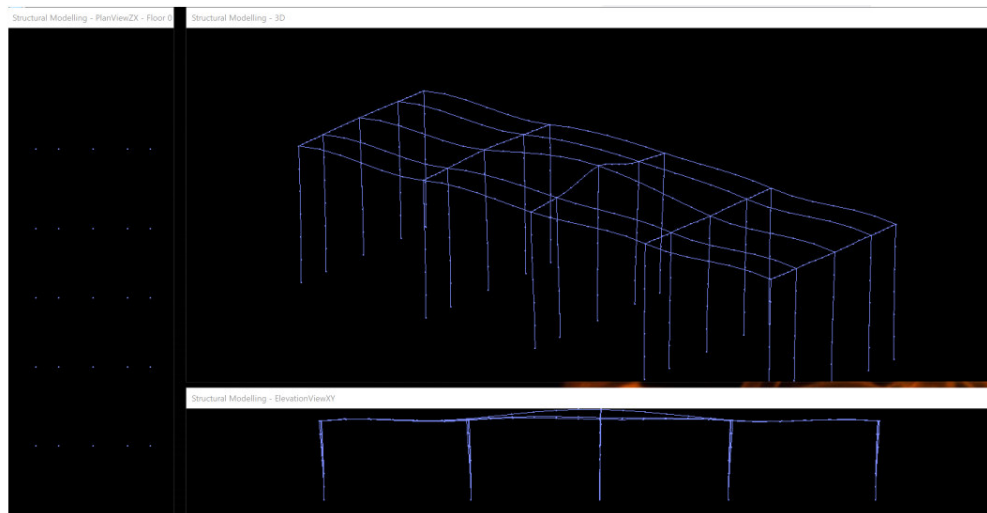
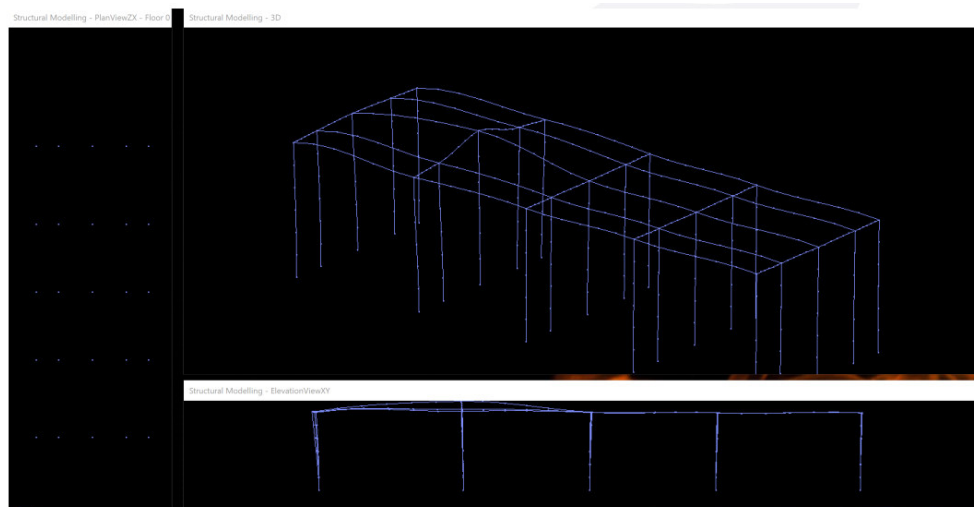
EXEMPLES – NAU

Sotmès a un foc ISO843



MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

EXEMPLES



MODELACIÓ ESTRUCTURAL DAVANT EL FOC

PROGRAMES INFORMÀTICS

Simplificat

- ELEFIR
- POTFIRE
- AFCC
- AFCB
- ...

Avançat

- SAFIR
- ABAQUS
- ANSYS
- VULCAN
- ...
- OPENSEES - OPENFIRE

GRÀCIES PER LA SEVA ATENCIÓ

28/11/2024

F. Xavier Querol Esparch
Director Tècnic



Gerència de Serveis d'Habitatge, Urbanisme i Activitats
Oficina d'Activitats Regulades i Programes en Protecció Civil

Tel. 934049312

Correu electrònic. o.activitats@diba.cat

<https://www.diba.cat/web/hua>