Centre d'Estudis del Risc Tecnològic
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Estudi de la resistència al foc d'un mòdul estructural en un edifici format per diverses plantes de contenidors marítims habilitats com a allotjaments, mitjançant simulacions

D1. Informe Final.

Autors: Alba Àgueda, Frederic Marimon, Eulàlia Planas

Barcelona, 25 de març de 2021

CONTINGUT

1 Introducció 5
2 Presentació de l'edifici 6
2.1 Característiques dels mòduls 6
2.2 Compartimentació i acabats interiors 7
2.3 Característiques dels ocupants 8
3 Definició dels escenaris d'incendi 9
3.1 Escenari d'incendi post-flashover 9
3.1.1 Corba d'incendi per al mòdul individual 11
3.1.2 Corba d'incendi per al mòdul doble 15
3.1.3 Altres corbes d'incendi 17
3.2 Escenari d'incendi a través de finestres afectant la façana 19
4 Definició dels escenaris en FDS 20
4.1 Programari utilitzat 20
4.2 Escenaris simulats 20
4.3 Domini i mallat 20
4.4 Parets dels mòduls 24
4.4.1 Parets interiors 24
4.4.2 Acabat de les parets 25
4.5 Obertures 25
4.6 Condicions ambientals 26
4.7 Definició de les variables de sortida en FDS 26
4.7.1 Dispositius per controlar el trencament de les finestres 26
4.7.2 Dispositius per enregistrar temperatures a través de les parets 27
4.7.3 Arxius de tall 2D 29
4.7.4 Arxius de contorn 30

5 Resultats 31
5.1 Comportament de l'incendi 31
5.2 Temperatura del gas i de les parets dels contenidors 34
5.2.1 Escenari S_05[0]_E_0P_TT (#1) 34
5.2.2 Escenari S_05[-1]_E_0P_TT (#2) 36
5.2.3 Escenari D_10+05[-2]_E_1P_TT (#6) 38
5.3 Efecte de la posició de les obertures 41
5.3.1 Mòdul individual 41
5.3.2 Mòdul doble 42
5.4 Efecte del foc i el fum sobre els mòduls superiors 45
5.5 Evolució de la temperatura a l'interior de les parets i efecte sobre la resistència estructural 47
5.6 Efecte de la càrrega de foc 49
6 Estudi termomecànic de la protecció amb plaques Pladur FOC 15+15 mm de la xapa nervada d'acer 50
6.1 El sistema estructural i les accions mecàniques en situació d'incendi 50
6.1.1 Anàlisi estructural del projecte APROP a temperatura ambient 52
6.1.2 Afectació de les propietats mecàniques de l'acer degut a l'increment de temperatura 53
6.2 Accions tèrmiques en situació d'incendi 57
6.3 Simulació tèrmica de l'evolució de la temperatura sobre la xapa nervada i els aïllaments emprats 58
6.3.1 Validació inicial de les propietats del material Pladur FOC de 15+15 mm segons els resultats obtinguts en un assaig de laboratori de referència 59
6.3.2 CAS 1. Exposició ISO834 i 2 plaques 15+15 mm 61
6.3.3 CAS 2. Exposició ISO834, 2 plaques 15+15 mm i llana de roca 80 kg/m^3 61
6.3.4 CAS 3. Exposició foc natural i 2 plaques 15+15 mm 62
6.3.5 CAS 4. Exposició foc natural, 2 plaques 15+15 mm i llana de roca 80 kg/m^3 62
6.3.6 CAS 5. Mòdul doble. Exposició ISO834 i 2 plaques 15+15 mm 63

6.3.7 CAS 6. Mòdul doble. Exposició ISO834, 2 plaques 15+15 mm i llana de roca 80 kg/m^3 64

6.3.8 CAS 7. Mòdul doble. Exposició foc natural i 2 plaques 15+15 mm 64

6.3.9 CAS 8. Mòdul doble. Exposició foc natural, 2 plaques 15+15 mm i llana de roca 80 kg/m^3 65

6.3.10 CAS 9. Mòdul doble. Exposició foc natural amb càrrega de foc 948 MJ/m^2, 2 plaques 15+15 mm..... 65

6.4 Resultats finals de l'estudi termomecànic..... 66

7 Conclusions 68

8 Referències bibliogràfiques 70

Annex 72

1 Introducció

L'objectiu del projecte és estudiar la resistència al foc d'un edifici format per diverses plantes de contenidors marítims habilitats com a allotjaments, mitjançant simulacions. Per assolir aquest objectiu s'analitza el comportament de dos contenidors col·locats un sobre l'altre, quan el de sota es veu sotmès a l'efecte d'un incendi, mitjançant el simulador "*Fire Dynamics Simulator*" (FDS) [1] pel què fa al comportament del foc i mitjançant el simulador Diamonds (versió 2020) de l'empresa Buildsoft [2], pel què fa al comportament de l'estructura sota l'efecte del foc.

L'estratègia adoptada segueix els principis del que es coneix com a disseny prestacional de la protecció contra incendis [3], en aquest cas aplicada a avaluar la resistència al foc de l'estructura dels contenidors d'acer col·locats de forma apilada aconseguint un edifici de varies plantes. S'avalua doncs l'afectació del material acer del contenidor degut a l'augment de la temperatura durant l'incendi obtinguda mitjançant una simulació tèrmica del problema en règim transitori.

A les simulacions amb FDS (relatives al comportament del foc) es consideren dues situacions : una amb el contenidor tal com s'ha dissenyat i previst seguint les indicacions del Codi Tècnic de l'Edificació i les indicacions del Cos de Bombers de la ciutat de Barcelona pel que fa als requisits de resistència al foc; i una altra on es redueix el gruix de l'aïllament definit en el disseny inicial, per comprovar si segueix complint amb els requisits de resistència al foc. Les simulacions s'han dut a terme tant amb un contenidor simple com amb un contenidor doble, que són les dues tipologies usades a l'edifici.

A les simulacions amb Diamonds (relatives a l'estudi termomecànic) s'han considerat diverses situacions: existència de només plaques aïllants, cas de plaques aïllants i llana de roca, i això en combinació amb l'exposició a la corba de foc més desfavorable procedent de l'estudi amb FDS i a la corba de foc normalitzat ISO834.

2 Presentació de l'edifici

L'edifici forma part del projecte APROP de l'Ajuntament de Barcelona. Aquest projecte consisteix en la construcció d'edificis temporals destinats a equipaments comunitaris en planta baixa i allotjaments col·lectius protegits en plantes pis.

L'edifici APROP GLÒRIES està format per set plantes amb 11 contenidors a cadascuna, i una planta baixa l'estructura de la qual és un entramat d'estructura d'acer. L'estructura de l'edifici són els contenidors marítims habilitats com a allotjament, els quals formen al mateix temps el tancament dels mòduls d'allotjament i la seva estructura. En total hi ha projectats 42 allotjaments, 35 dobles i 7 simples.

Els contenidors tenen aproximadament 12 m de profunditat, 2,5 m d'amplada i 2,5 m d'alçada interior. Tenen un reforç intern per poder fer els buits necessaris a la xapa perimetral. La unió entre contenidors es realitza amb unes peces especials d'acer galvanitzat anomenades Twist Lock que garanteixen una alçada entre sostres dels contenidors de 2,9 m [4].

2.1 Característiques dels mòduls

Hi ha dos tipus de mòduls prefabricats per a dos tipus d'allotjaments diferents, un amb programa funcional d'1 dormitori (allotjament simple) i l'altre de 2 (allotjament doble). Tots els allotjaments compten amb dues façanes. La façana que dona al C/ Bolívia compta amb balcons d'1 m de profunditat. L'altra façana dona a un pati interior d'illa on hi ha un edifici (actualment en construcció) de 7 plantes més la planta baixa (Figura 1). L'accés a cada allotjament es realitza a través de la passera exterior de l'edifici, d'1,7 m de profunditat.

Figura 1. Vista del solar on es construirà l'edifici de mòduls APROP (instantània feta el setembre de 2020).

El mòdul genèric individual compta amb 26,35 m^2 distribuïts en una sala i cuina obertes, una cambra higiènica i una habitació doble (Figura 2). El mòdul queda compartimentat gràcies a una porta que separa la zona on hi ha la sala i la cuina obertes, i la zona on hi ha l'habitació doble i el sanitari, el qual té una porta corredissa.

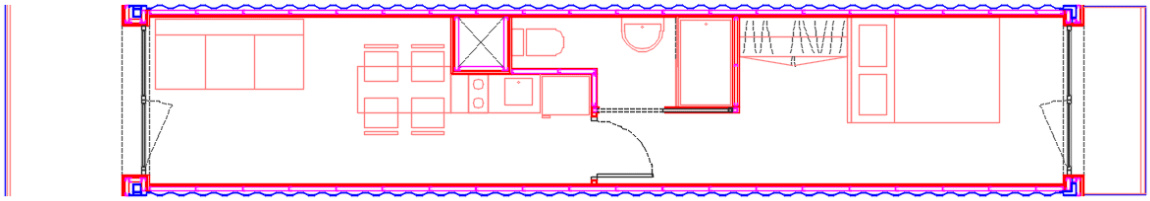


Figura 2. Mòdul genèric individual (passera a la banda esquerra; balcó a la banda dreta).

El mòdul genèric doble compta amb 52,46 m^2 distribuïts en una sala-menjador i cuina obertes, una cambra higiènica, un espai d'emmagatzematge, una habitació doble i una individual. El mòdul queda compartimentat gràcies a una porta que separa la zona on hi ha la sala-menjador i la cuina obertes, les portes de les habitacions i la porta del sanitari.

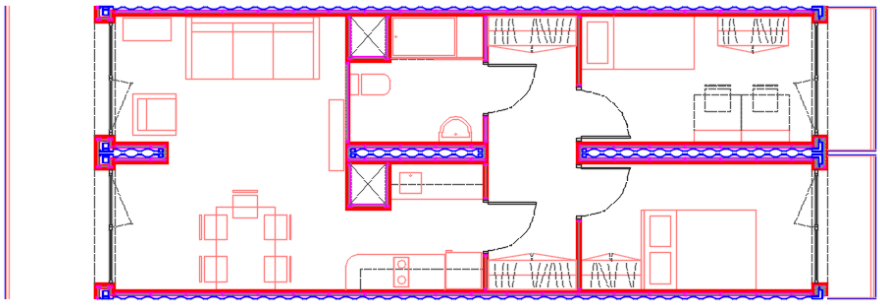


Figura 3. Mòdul genèric doble (passera a la banda esquerra; balcons a la banda dreta).

2.2 Compartimentació i acabats interiors

En el moment d'iniciar aquest estudi no es coneixen encara les característiques exactes dels acabats interiors de l'edifici, de manera que s'han considerat les mateixes que té actualment l'edifici similar ja construït a Ciutat Vella. Si finalment el material no és exactament el mateix, les característiques generals seran semblants i no es preveu que això tingui impacte significatiu en el comportament del foc, per tant els resultats obtinguts seguiran essent igualment aplicables a l'edifici de Glòries.

Per tal de garantir una resistència al foc R90, els allotjaments per l'interior van extradossats al seu perímetre interior amb el sistema autoportant w628B.es de Knauf, amb muntants metàl·lics

de 48 mm x 36 mm x 0,6 mm, dues plaques de 15 mm tallafoc DF i una placa de 15 mm Knauf Diamant hidròfuga d'alta duresa com a acabat. Hi ha aïllament de llana de roca a l'espai dels muntants de 48 mm.

Els envans interiors es resolen amb una placa de 15 mm Knauf Diamant hidròfuga d'alta duresa a banda i banda i amb subestructura metàl·lica de 48 mm i aïllant de llana de roca a l'interior (15/48/15).

Les propietats tèrmiques dels diferents materials presents a les parets dels mòduls es poden veure a la Taula 1. Aquestes propietats s'han extret de diferents fonts bibliogràfiques.

Taula 1. Propietats tèrmiques i gruix dels diferents materials presents als allotjaments.

Material	Densitat [kg/m^3]	Calor específica [kJ/kg K]	Conductivitat [W/m K]	Gruix [mm]	Referències propietats tèrmiques
Diamant	1000	1	0,27	15	[5]
Tallafoc DF	800	1	0,23	15+15	[5]
Llana mineral	17[a]	1,03[b]	0,037[c]	48	a.[6]; b.[7]; c. [5]
Acer	7850	0,46	45,8	2	[8]
Vidre	2500	0,8	0,8	100	[9]

2.3 Característiques dels ocupants

Els ocupants de les plantes pis pertanyen a col·lectius especialment vulnerables que es troben en situacions d'emergència econòmica i social. Pertanyen a aquest col·lectiu aquelles persones en risc de pèrdua de l'habitatge imminent o en risc d'exclusió residencial (article 75 del DL 75/2014).

Atès que l'estudi no pretén avaluar l'evacuació dels ocupants durant l'emergència en cas d'incendi, l'únic aspecte a tenir en compte és que els ocupants hauran d'emmagatzemar totes les seves pertinences en aquests habitatges temporals, fet que es tindrà en compte a l'hora d'avaluar la càrrega de foc present en el contenidor.

3 Definició dels escenaris d'incendi

Quan s'ha de dur a terme l'anàlisi de la resistència al foc de l'estructura en projectes de disseny prestacional només s'acostumen a considerar incendis completament desenvolupats. La transferència de calor a l'estructura durant la fase de creixement de l'incendi proporciona un flux de calor petit comparat amb la durada total de la fase en la que l'incendi està completament desenvolupat. A més, per a estructures d'acer amb aïllament (com és el cas que ens ocupa) també és necessari considerar la fase de decaïment de l'incendi ja que la calor continuarà transferint-se a través de l'aïllament i la temperatura de l'acer pot continuar augmentant durant aquesta darrera fase de l'incendi [3]. En l'anàlisi de la resistència al foc de l'estructura, s'han de considerar dues tipologies d'escenaris:

- Incendi post-flashover
- Incendi a través de finestres afectant la façana

3.1 Escenari d'incendi post-flashover

Tenint en compte l'objectiu del projecte, un dels escenari d'interès (el pitjor dels casos) és un foc *post-flashover* en què les temperatures de la capa de fums estaran per sobre dels 500°C, on tot el combustible s'acabarà cremant i on no es posarà en marxa cap mecanisme d'extinció de l'incendi.

Per a definir la corba d'incendi en aquest escenari, se segueix la següent metodologia, basada en la normativa prestacional de Nova Zelanda [10]:

1. Es corre una simulació amb corba d'incendi *pre-flashover* les característiques de la qual s'han extret de la norma europea UNE-EN-1991-1-2:2019 [11]. S'assumeix que el foc creix a una velocitat moderada fixada pel model t^2 fins que s'arriba al *flashover*, o fins que el *Heat Release Rate* (HRR) assoleix el valor màxim, o fins que hi ha ventilació limitada. Es considera que la situació de ventilació limitada es dona en el primer instant en què el HRR calculat ja no es correspon amb el HRR dissenyat degut a la manca d'oxigen suficient per aconseguir la combustió completa.
2. Segons els resultats de la primera simulació, es determina quin cas aplica dels de la Taula 2 (el cas 2 s'ha omès perquè inclou l'ús de ruixadors) i es fa una nova simulació ajustant la corba de HRR segons l'acció corresponent especificada a la taula.

Taula 2. Modelització dels focs post-flashover segons la normativa prestacional de Nova Zelanda [10]. T_{UL}: Temperatura mitjana de la capa de fums (de l'anglès, upper layer); HRR: Cabal d'energia alliberada (de l'anglès, heat release rate); HRRPUA: Cabal d'energia alliberada per unitat d'àrea (de l'anglès, heat release rate per unit area).

Casos possibles	Resultats de la primera simulació	Acció a realitzar per ajustar el HRR i tornar a córrer el model
Cas 1	El foc creix i arriba al màxim HRR abans de que T_{UL}=500°C. Creixement ràpid del foc perquè arribi al màxim HRR. Les espècies igual que en la situació *pre-flashover*.	-
Cas 3	T_{UL}=500°C abans de que el HRR arribi al màxim i no hi ha ventilació limitada. Creixement ràpid del foc fins a T_{UL}=500°C. Les espècies igual que en la situació *pre-flashover*.	Quan T_{UL}=500°C s'incrementa el HRR fins al màxim HRR durant un període de 15 s. Les espècies, igual que en la situació *post-flashover*.
Cas 4	T_{UL}=500°C abans de que el HRR arribi al màxim i hi ha ventilació limitada. El foc creix fins a T_{UL}=500°C. Les espècies igual que en la situació *pre-flashover*.	Quan T_{UL}=500°C (o hi ha ventilació limitada, el que ocorri primer) s'incrementa el HRR 1,5 vegades el valor del HRR corresponent a la situació de ventilació limitada durant 15 s. Les espècies, igual que en la situació *post-flashover*.
Cas 5	T_{UL}<500°C i hi ha ventilació limitada. Creixement ràpid del foc fins al límit de ventilació. Les espècies igual que en la situació *pre-flashover*.	En el límit de ventilació, s'incrementa el HRR 1,5 vegades el valor del HRR corresponent a la situació de ventilació limitada durant 15 s. Les espècies, igual que en la situació *post-flashover*.

Per a definir la corba d'incendi s'ha utilitzat un valor de densitat de càrrega de foc mitjà (q) de 780 MJ/m^2 tal com recomana per a habitatges la norma UNE-EN-1991-1-2:2019 [11]. El valor del pic de HRR que es pot assolir s'extreu a partir del HRRPUA de la mateixa norma, que és de 250 kW/m^2, ja que el valor recomanat a la norma de Nova Zelanda s'ha considerat molt conservador (500 – 1000 kW/m^2). La velocitat de creixement de l'incendi s'ha considerat mitjana α = 0,011 kW/s^2, tal com recomana la norma UNE-EN-1991-1-2:2019. En general, els valors proposats per la norma de Nova Zelanda serien equivalents al que proposa la norma UNE-EN-1991-1-2:2019 per a biblioteques; per tant, és força més conservadora.

La fase de decaïment de l'incendi s'ha fet també seguint les indicacions de la norma UNE-EN-1991-1-2:2019, segons la qual es pot suposar un decaïment lineal que comença quan s'ha

consumit el 70% de la càrrega de foc i finalitza quan s'ha consumit tota la càrrega de foc. La superfície de l'habitatge ocupada pel combustible (A) s'ha considerat igual a 24 m^2 per al mòdul individual i de 50 m^2 per al mòdul doble.

3.1.1 *Corba d'incendi per al mòdul individual*

A continuació s'indiquen els càlculs necessaris per dissenyar la corba d'incendi inicial.

Pic màxim de HRR (HRR_{max})

$$HRR_{max} = HRRPUA \cdot A = 250 \cdot 24 = 6000\ kW = 6\ MW$$

Energia total disponible en el combustible present a l'habitatge (E_{total})

$$E_{total} = q \cdot A = 780 \cdot 24 = 18720\ MJ$$

Durada de la fase de creixement de l'incendi (t_{creix})

$$t_{creix} = \sqrt{\frac{HRR_{max}}{\alpha}} = \sqrt{\frac{6000}{0{,}011}} = 738{,}5\ s$$

Energia despresa durant la fase de creixement de l'incendi (E_{creix})

$$E_{creix} = \frac{\alpha}{3} \cdot (t_{creix})^3 = \frac{0{,}011}{3} \cdot (738{,}5)^3 = 1477097{,}9\ kJ = 1477\ MJ$$

Energia despresa durant la fase de decaïment de l'incendi (E_{deca})

$$E_{deca} = 0{,}3 \cdot E_{total} = 0{,}3 \cdot 18720 = 5616\ MJ$$

Durada de la fase de decaïment de l'incendi (t_{deca})

$$t_{deca} = \frac{E_{deca} \cdot 2}{HRR_{max}} = \frac{5616 \cdot 2}{6} = 1872\ s$$

Energia despresa durant la fase on l'incendi està completament desenvolupat (E_{dese})

$$E_{dese} = E_{total} - E_{creix} - E_{deca} = 18720 - 1477 - 5616 = 11627\ MJ$$

Durada de la fase on l'incendi està completament desenvolupat (t_{dese})

$$t_{dese} = \frac{E_{dese}}{HRR_{max}} = \frac{11627}{6} = 1937{,}8\ s$$

La Figura 4 mostra la corba d'incendi resultant dels càlculs anteriors, la qual és aplicable en el cas que l'incendi estigui controlat pel combustible i sempre que no s'assoleixi T_{UL} = 500°C dins el contenidor abans d'assolir el HRR_{max}.

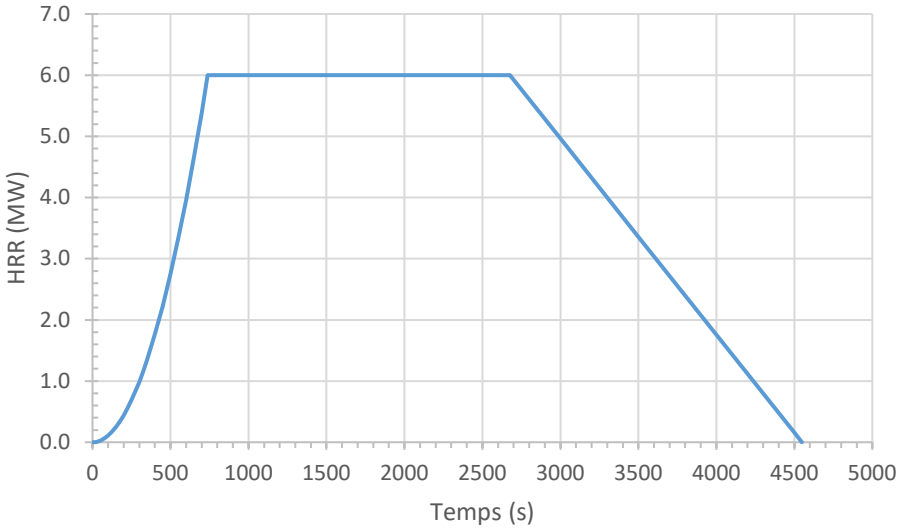


Figura 4. Corba d'incendi en el supòsit del Cas 1 de la Taula 2.

En aquesta simulació inicial s'observa que la temperatura de la capa de fums arriba als 500°C abans de que el HRR arribi al màxim, i no hi ha ventilació limitada. Aquesta situació s'observa al voltant dels 410 s (segons la Figura 5, la majoria del compartiment té una capa de fums que arriba als 500°C).

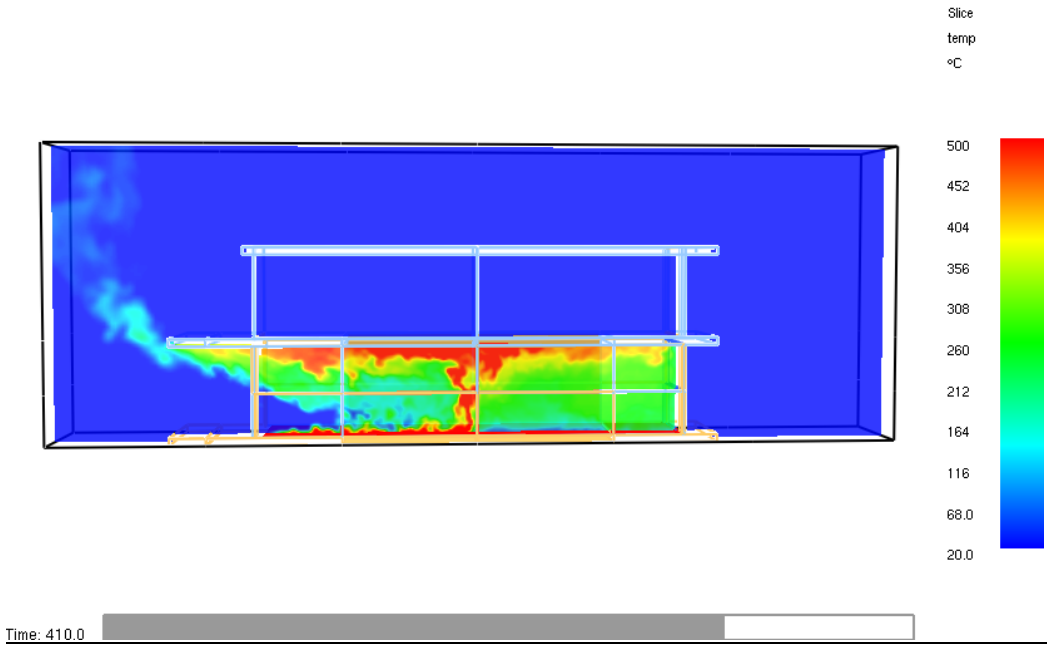


Figura 5. Temperatura (segons l'arxiu de tall 2D a l'eix y) en l'instant de temps en què es considera que la capa de fums ha assolit els 500°C.

En base a aquest resultat (Cas 3 de la Taula 2) es fixa una nova corba d'incendi (definitiva) segons les accions especificades a la Taula 2. La corba d'incendi dissenyada per aquesta segona situació es mostra a la Figura 6; els càlculs necessaris per dissenyar-la es presenten a continuació:

Pic màxim de HRR (HRR_{max})

$$HRR_{max} = HRRPUA \cdot A = 250 \cdot 24 = 6000\ kW = 6\ MW$$

Energia total disponible en el combustible present a l'habitatge (E_{total})

$$E_{total} = q \cdot A = 780 \cdot 24 = 18720\ MJ$$

Durada de la fase pre-flashover (t_{pre}) - segons els resultats de la simulació inicial -

$$t_{pre} = 410\ s$$

Energia despresa durant la fase pre-flashover (E_{pre})

$$E_{pre} = \frac{\alpha}{3} \cdot \left(t_{pre}\right)^3 = \frac{0{,}011}{3} \cdot (410)^3 = 252710\ kJ = 252{,}7\ MJ$$

Durada de la fase post-flashover fins a incendi completament desenvolupat (t_{post})

$$t_{post} = 15\ s$$

Energia despresa durant la fase post-flashover fins a incendi completament desenvolupat (E_{post})

$$E_{post} = \left(HRR_{max} - \alpha \cdot \left(t_{pre}\right)^2\right) \cdot t_{post} \cdot 0{,}5\ + \alpha \cdot \left(t_{pre}\right)^2 \cdot t_{post}$$
$$= (6000 - \ 0{,}011 \cdot 410^2) \cdot 15 \cdot 0{,}5 + \ 0{,}011 \cdot 410^2 \cdot 15 = 58868{,}3\ kJ$$
$$= 58{,}9\ MJ$$

Energia despresa durant la fase de decaïment de l'incendi (E_{deca})

$$E_{deca} = 0{,}3 \cdot E_{total} = 0{,}3 \cdot 18720 = 5616\ MJ$$

Durada de la fase de decaïment de l'incendi (t_{deca})

$$t_{deca} = \frac{E_{deca} \cdot 2}{HRR_{max}} = \frac{5616 \cdot 2}{6} = 1872\ s$$

Energia despresa durant la fase on l'incendi està completament desenvolupat (E_{dese})

$$E_{dese} = 0{,}7 \cdot E_{total} - E_{pre} - E_{post} = 13104 - 252{,}7 - 58{,}9 = 12792{,}4\ MJ$$

Durada de la fase on l'incendi està completament desenvolupat (t_{dese})

$$t_{dese} = \frac{E_{dese}}{HRR_{max}} = \frac{12792{,}4}{6} = 2132{,}1\ s$$

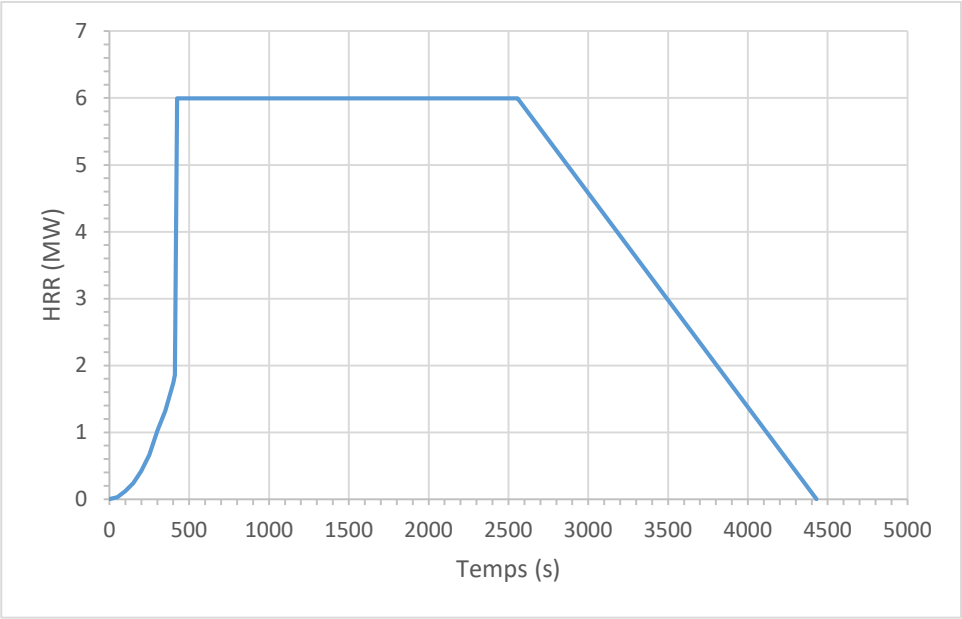


Figura 6. Corba d'incendi per al mòdul individual en el supòsit del Cas 3 de la Taula 2.

3.1.2 *Corba d'incendi per al mòdul doble*

A continuació s'indiquen els càlculs necessaris per dissenyar la corba d'incendi per al mòdul doble. S'han tingut en compte els resultats d'una primera simulació en la que es va poder establir el temps de *flashover* (530 s) i es va determinar que el Cas 3 de la Taula 2 era també aplicable. En aquests càlculs s'ha considerat una superfície de 50 m^2 a l'hora de definir el foc.

Pic màxim de HRR (HRR_{max})

$$HRR_{max} = HRRPUA \cdot A = 250 \cdot 50 = 12500\ kW = 12.5\ MW$$

Energia total disponible en el combustible present a l'habitatge (E_{total})

$$E_{total} = q \cdot A = 780 \cdot 50 = 39000\ MJ$$

Durada de la fase pre-flashover (t_{pre}) - segons els resultats de la simulació inicial -

$$t_{pre} = 530\ s$$

Energia despresa durant la fase pre-flashover (E_{pre})

$$E_{pre} = \frac{\alpha}{3} \cdot \left(t_{pre}\right)^3 = \frac{0{,}011}{3} \cdot (530)^3 = 545.882\ kJ = 546\ MJ$$

Durada de la fase post-flashover fins a incendi completament desenvolupat (t_{post})

$$t_{post} = 15\ s$$

Energia despresa durant la fase post-flashover fins a incendi completament desenvolupat (E_{post})

$$E_{post} = \left(HRR_{max} - \alpha \cdot \left(t_{pre}\right)^2\right) \cdot t_{post} \cdot 0{,}5\ + \alpha \cdot \left(t_{pre}\right)^2 \cdot t_{post}$$
$$= (12500 - \ 0{,}011 \cdot 530^2) \cdot 15 \cdot 0{,}5 + \ 0{,}011 \cdot 530^2 \cdot 15 = 116924\ kJ$$
$$= 117\ MJ$$

Energia despresa durant la fase de decaïment de l'incendi (E_{deca})

$$E_{deca} = 0{,}3 \cdot E_{total} = 0{,}3 \cdot 39000 = 11700\ MJ$$

Durada de la fase de decaïment de l'incendi (t_{deca})

$$t_{deca} = \frac{E_{deca} \cdot 2}{HRR_{max}} = \frac{11700 \cdot 2}{12.5} = 1872\ s$$

Energia despresa durant la fase on l'incendi està completament desenvolupat (E_{dese})

$$E_{dese} = 0{,}7 \cdot E_{total} - E_{pre} - E_{post} = 27300 - 546 - 117 = 26637\ MJ$$

Durada de la fase on l'incendi està completament desenvolupat (t_{dese})

$$t_{dese} = \frac{E_{dese}}{HRR_{max}} = \frac{26637}{12.5} = 2131\ s$$

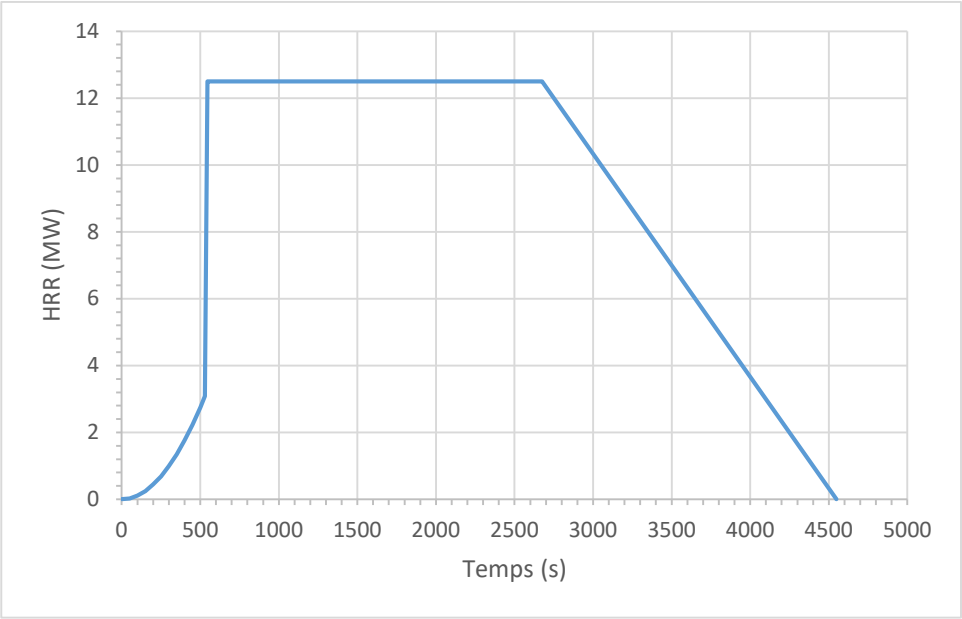


Figura 7. Corba d'incendi per al mòdul doble en el supòsit del Cas 3 de la Taula 2.

3.1.3 *Altres corbes d'incendi*

Corba d'incendi amb càrrega de foc de 948 MJ/m²

El valor de càrrega de foc utilitzat per definir les corbes d'incendi ha estat de 780 KJ/m², tal i com recomana per a habitatges la norma UNE-EN-1991-1-2:2019 [11]. Ara bé, existeix un altre valor de càrrega de foc a la mateixa norma més elevat i que fa referència al percentil 80, i.e. 948 MJ/m². Si es considera aquest valor la durada total de l'incendi augmenta, tal i com es veu a la Figura 8.

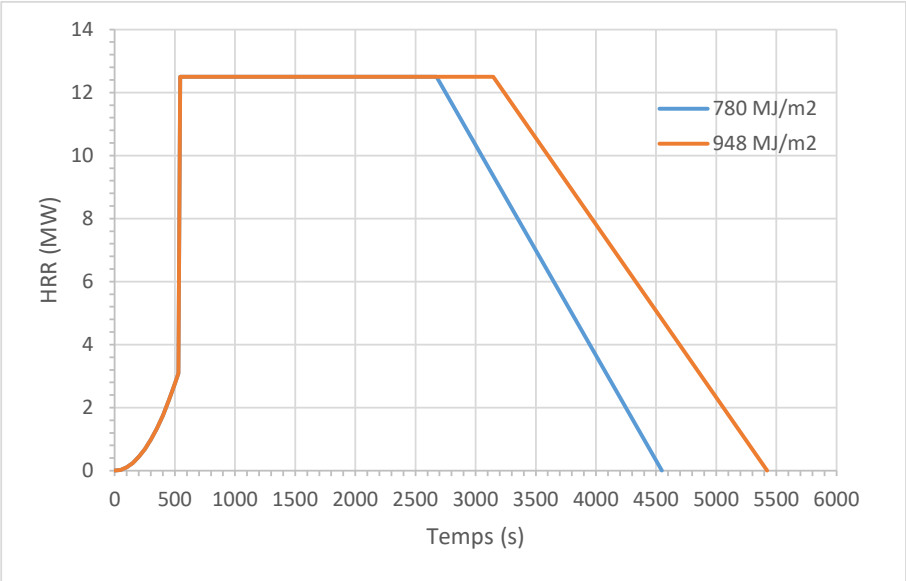


Figura 8. Corbes d'incendi per al mòdul doble definides amb càrrega de foc de 780 MJ/m² i 948 MJ/m².

Corba normalitzada temps-temperatura

La corba normalitzada temps-temperatura està definida per [11], coneguda com a corba ISO834:

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot log_{10}(8 \cdot t + 1)$$

On θ_g és la temperatura del gas (en °C) al sector de l'incendi i t és el temps (en minuts). A la Figura 9 es pot veure representada juntament amb la corba d'incendi definida per al mòdul doble amb una càrrega de foc de 780 MJ/m². La corba normalitzada és una corba creixent en què no es té en compte ni la fase inicial de desenvolupament de l'incendi ni la fase de decaïment.

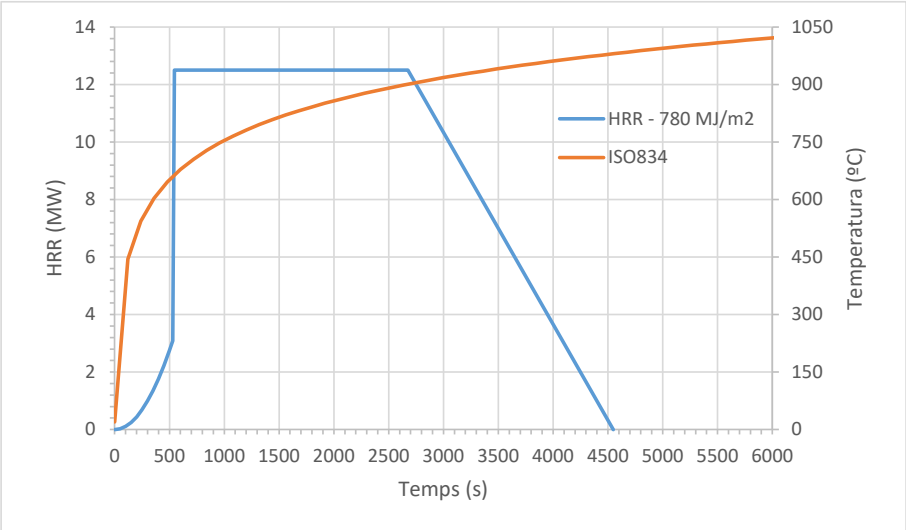


Figura 9. Corba d'incendi per al mòdul doble definida a través del HRR amb una càrrega de foc de 780 MJ/m² (sèrie blava) i corba normalitzada de temps-temperatura (ISO834) (sèrie taronja).

3.2 Escenari d'incendi a través de finestres afectant la façana

Si en les simulacions realitzades els vidres que donen a la passera o al balcó s'acaben trencant, tant les flames com el fum surten a l'exterior afectant la façana. Per tant, per observar quin és l'efecte de l'incendi en la façana i el mòdul superior no és necessari implementar cap escenari específic, ja que les mateixes simulacions permeten observar els dos fenòmens.

4 Definició dels escenaris en FDS

4.1 Programari utilitzat

S'ha utilitzat el simulador d'incendis Fire Dynamics Simulator (FDS) del National Institute of Standards and Technology (NIST). És una eina gratuïta i de codi obert àmpliament utilitzada en la simulació d'incendis en compartiments. El programa Smokeview, de característiques anàlogues a l'FDS, s'ha emprat per a la visualització de resultats. El programa de pagament Pyrosim s'ha emprat per a la definició del model, ja que té una interfase gràfica que facilita la creació de geometries i permet exportar el treball generat a codi FDS.

4.2 Escenaris simulats

A la Taula 3 es mostren tots els escenaris simulats amb FDS. En aquesta secció es descriuen aquests escenaris, així com les raons per les quals s'han volgut simular. Els vídeos (animacions d'Smokeview) de les simulacions realitzades amb FDS es poden descarregar des de l'adreça que apareix a l'Annex.

4.3 Domini i mallat

El domini fixat per a les simulacions inclou el contenidor on es genera el foc, el contenidor de dalt, i els balcons i les passeres situats on hi ha portes de vidre. Per tal de tenir una visió completa del moviment de les flames quan surten a l'exterior, el domini s'estén més enllà del balcó i la passera. Respecte al balcó, el domini s'estén 5 m per al mòdul individual i 3,6 m per al mòdul doble. Respecte a la passera, s'estén 3,3 m més enllà per als dos tipus de mòdul.

En les simulacions #1 i #2 (S_05[0]_E_0P_TT i S_05[-1]_E_0P_TT) el domini del mòdul individual es divideix en 14 malles, 8 de les quals tenen una mida de cel·la de 0,05 m (malles 1-8 segons la Figura 10) i la resta (i.e. aquelles que inclouen el contenidor de dalt i la part del domini que queda més enllà del balcó i la passera del mòdul de l'incendi) tenen una mida de cel·la de 0,1 m (malles 9-12 segons la Figura 10).

En les simulacions #3-5 (S_10[0]_E_0P_TT, S_10[0]_E+D_0P_TT i S_10[0]_D_0P_TT) es defineixen 10 malles, totes amb una mida de cel·la de 0,10 m (Figura 11). El mòdul d'estudi queda inclòs en les malles 1 i 2.

En la simulació #6 (D_10+05[-2]_E_1P_TT), en què se simula el mòdul doble, s'utilitza una mida de cel·la de 0,1 m en tot el domini (Figura 12) excepte en les quatre malles que cobreixen la paret divisòria (malles 5-8), on les cel·les són de 0,05 m.

En les simulacions #7 i #8 (D_10+05[-2]_E+D_1P_ET i D_10+05[-2]_E_1P_ET) també s'utilitza una mida de cel·la de 0,1 m en tot el domini (Figura 13) excepte en les dues malles que cobreixen la paret divisòria (malles 3 i 4), on les cel·les són de 0,05 m.

Taula 3. Escenaris simulats amb FDS.

#	Nom de l'escenari [A]	Tipus de mòdul	Mida de cel·les (m) [B]	Tipus de revestiment [C]	Obertures inicials [D]	Dimensions de les obertures inicials	Parets interiors	Control trencament vidres
1	S_05[0] _E_0P_TT	Simple	0,05	15(D)+15(T)+15(T)+48(L)+2(A)	1; esquerra	0,42 m x 2,2 m	No	Sí
2	S_05[-1] _E_0P_TT	Simple	0,05	15(D)+15(T)+48(L)+2(A)	1; esquerra	0,42 m x 2,2 m	No	Sí
3	S_10[0]_E_0P_TT	Simple	0,10	15(D)+15(T)+15(T)+48(L)+2(A)	1; esquerra	0,42 m x 2,2 m	No	Sí
4	S_10[0]_E+D_0P_TT	Simple	0,10	15(D)+15(T)+15(T)+48(L)+2(A)	2; esquerra i dreta	0,21 m x 2,2 m cadascuna	No	Sí
5	S_10[0]_D_0P_TT	Simple	0,10	15(D)+15(T)+15(T)+48(L)+2(A)	1; dreta	0,42 m x 2,2 m	No	Sí
6	D_10+05[-2]_E_1P_TT	Doble	0,10 i 0,05	15(T)+48(L)+2(A)	1; esquerra	0,42 m x 2,2 m	Sí, només la que divideix el mòdul doble	Sí
7	D_10+05[-2]_E+D_1P_ET	Doble	0,10 i 0,05	15(T)+48(L)+2(A)	2; esquerra i dreta	0,21 m x 2,2 m cadascuna	Sí, només la que divideix el mòdul doble	Només a l'esquerra
8	D_10+05[-2]_E_1P_ET	Doble	0,10 i 0,05	15(T)+48(L)+2(A)	1; esquerra	0,42 m x 2,2 m	Sí, només la que divideix el mòdul doble	Només a l'esquerra

[A] El nom de l'escenari queda codificant així: S/D: Tipus de mòdul (simple o doble, respectivament); 05/10/10+05: Mida de les cel·les al contenidor d'estudi (0,05 mm, 0,10 mm o combinant les dues mides, respectivament); [0]/[-1]/[-2]: Tipus de revestiment (segons la columna de la pròpia taula); E/D/E+D: Posició de l'obertura inicial (a l'esquerra, a la dreta o a ambdues bandes, respectivament); 1P/0P: Paret interior que divideix el mòdul doble considerada o sense parets interiors, respectivament); TT/ET: S'estableix un element controlador per al trencament dels vidres en funció d'una temperatura límit (per a tots els vidres o només per als de la banda esquerra, respectivament).

[B] Al mòdul d'estudi.

[C] Els números indiquen el gruix de la capa en mm; les lletres entre parèntesi es refereixen al tipus de material: D – Diamant; T – Tallafoc; L: Llana de roca; A: acer.

[D] El número indica el nombre d'obertures inicials; esquerra o dreta indica la posició de l'obertura inicial tenint en compte la posició de la passera i del balcó, respectivament.

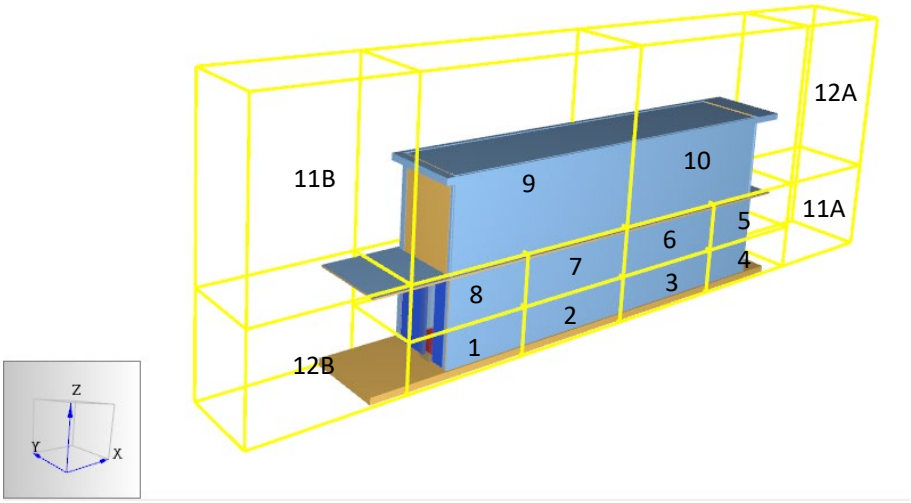


Figura 10. Vista de la geometria considerada en les simulacions del mòdul individual #1-2 (imatge extreta de Pyrosim) i numeració de les malles definides.

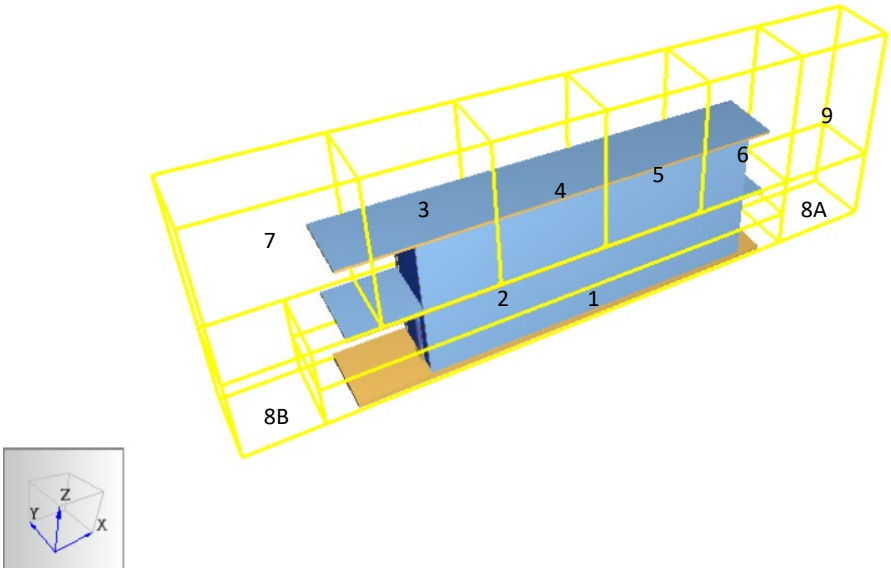


Figura 11. Vista de la geometria considerada en les simulacions #3-5 (imatges extretes de Pyrosim) i numeració de les malles definides.

a) b)

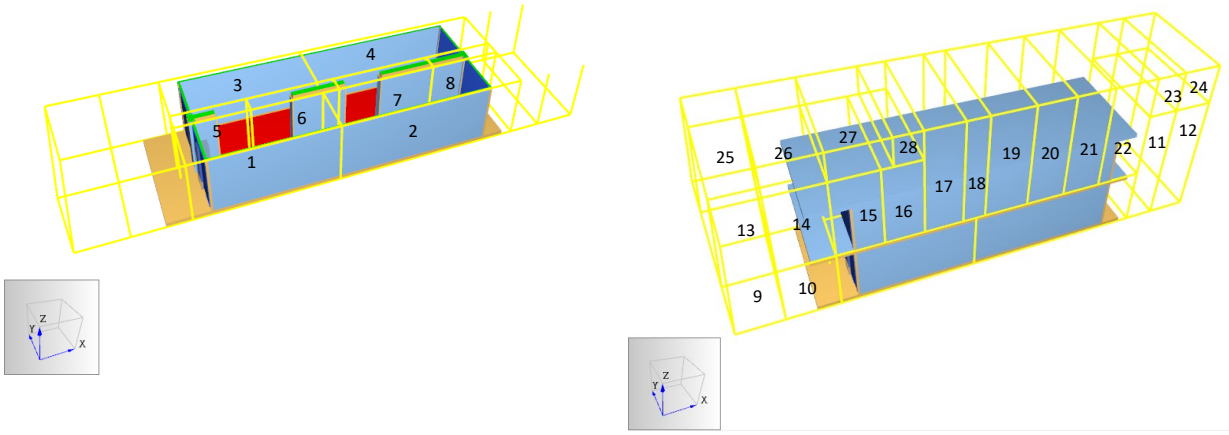
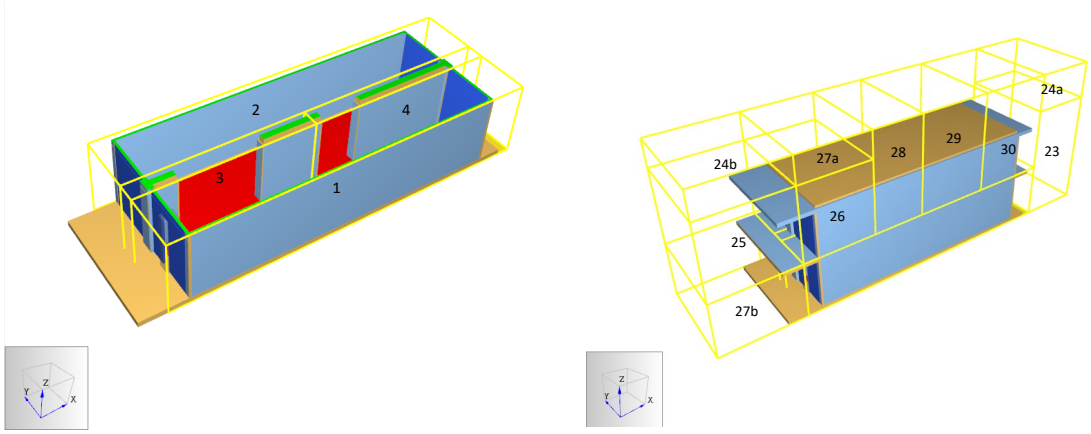


Figura 12. Vista de la geometria considerada en la simulació #6 del mòdul doble (imatges extretes de Pyrosim) i numeració de les malles definides: a) Malles que inclouen el volum ocupat pel mòdul doble d'estudi; b) Malles exteriors al contenidor doble d'estudi.



a) *b)*

Figura 13. Vista de la geometria considerada en les simulacions #7-8 (imatges extretes de Pyrosim) i numeració de les malles definides: a) Malles que inclouen el volum ocupat pel mòdul doble d'estudi (les malles 1 i 2 tenen una mida de cel·la de 0,10 m, i les malles 3 i 4 de 0,05 m); b) Malles exteriors al contenidor doble d'estudi.

S'han fixat mides de cel·la de 0,05 m i 0,1 m tenint en compte el HRR definit per al foc. S'han utilitzat les Eq. 1 i 2 per establir la resolució espacial. $\frac{D^*}{dx}$ s'interpeta com el nombre de cel·les que conté la longitud característica del foc (D^*), que no és necessàriament la longitud física, i s'acostuma a fixar en un valor de 16 per a malles fines. En les zones on el foc s'està desenvolupant

(en aquest cas tot el contenidor) cal utilitzar sempre un mallat fi per a garantir uns resultats fiables.

$$\frac{D^*}{dx} = 16 \qquad \text{Eq. 1}$$

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty \cdot c_p \cdot T_\infty \cdot \sqrt{g}}\right)^{2/5} \qquad \text{Eq. 2}$$

On:

- $\dot{Q}$ és la potència calorífica del foc, fixada en 6000 kW quan el foc està desenvolupat per al mòdul individual i 12000 kW quan el foc està desenvolupat en el contenidor doble.
- D^* és la longitud característica del foc. Pren un valor igual a 2 pel mòdul simple i igual a 2,6 pel mòdul doble.
- $\rho_\infty, c_p, T_\infty$ són la densitat, la calor específica i la temperatura ambient, respectivament (1.2 kg/m^3; 1 kJ/kg K; 298 K, respectivament).
- g és l'acceleració de la gravetat.
- dx és la mida de la cel·la que, segons els valors fixats anteriorment, pren un valor de 0,12 m pel mòdul individual i 0,16 m pel mòdul doble.

Per tant, segons aquestes relacions, amb una mida de cel·la de 0,10 m el flux quedaria ben resolt en totes les simulacions. Ara bé, s'ha optat per una mida de cel·la més petita (0,05 m) en algunes simulacions per tal d'obtenir resultats amb una millor resolució.

4.4 Parets dels mòduls

4.4.1 *Parets interiors*

Les parets interiors dels contenidors (envans i parets) no es tenen en compte a l'hora de fer les simulacions del mòdul individual (#1 a #5). Partim de la hipòtesi que no tenen una incidència rellevant en el desenvolupament de l'incendi i, a més, s'ha observat que poden provocar inestabilitats numèriques a llarg termini.

En el cas del mòdul doble es realitzen tres simulacions en què hi ha la paret divisòria (simulacions #6, #7 i #8). Cal tenir en compte que en aquests tres casos l'espai buit que quedava definit a la paret divisòria (entre les dues xapes grecades dels contenidors) s'ha omplert amb un obstacle (vegeu el color verd de la paret divisòria a la Figura 13, p.ex.). Altrament, es generaven inestabilitats numèriques durant les simulacions.

4.4.2 *Acabat de les parets*

El parament de les parets exteriors dels mòduls originals consisteix en un trasdossat de 78 mm de gruix format per una placa Knauf diamant d'alta duresa i hidròfuga de 15 mm, dues plaques tallafoc DF de 15 mm (15 mm + 15 mm) i una subestructura d'alumini de 48 mm i aïllant de llana de roca. Aquest sistema garanteix una resistència al foc RF90 [4].

Es fan tres simplificacions a l'hora de definir aquest parament en el programa de simulació FDS:

1) Les barres metàl·liques de la subestructura d'alumini no se simulen;
2) La xapa d'acer es considera llisa, no grecada;
3) La càmera d'aire entre la xapa grecada del contenidor i l'aïllant de llana de roca tampoc se simula.

Així doncs, amb la segona simplificació estem considerant una aproximació conservadora i la transferència de calor per conducció es calcula directament des de l'aïllant de llana de roca cap a l'acer (que té un gruix de 2 mm).

Es realitzen simulacions considerant diferents tipus d'aïllament. En quatre d'elles (simulacions #1, #3, #4 i #5 segons la Taula 3) les parets del mòdul simple tenen el revestiment original d'acabat interior.

La simulació #2 té menys aïllament. El parament de les parets és igual que en les simulacions del contenidor original excepte en el fet que una placa tallafoc DF s'elimina, per tant, el gruix total d'aquestes parets simulades és de 78 mm + 2 mm d'acer.

En el cas del contenidor doble (simulacions #6, #7 i #8 segons la Taula 3) el parament de les parets només té una placa tallafoc DF (s'elimina la placa Diamant i una placa tallafoc DF), per tant, el gruix total d'aquestes parets simulades és de 63 mm + 2 mm d'acer.

Les propietats tèrmiques dels diferents materials es poden veure a la Taula 1, juntament amb les propietats del vidre que constitueix les parets de les façanes del contenidor i que se simula considerant un gruix de 10 mm.

4.5 Obertures

Per tal d'evitar inestabilitats numèriques associades a un compartiment totalment hermètic, durant una simulació preliminar es definiren dues obertures permanents en el contenidor individual. Se situaren a la part inferior de les portes de vidre del menjador i de l'habitació, i ocupaven una superfície de 0,1 m^2 (0,5 m de llargada x 0,2 m d'altura). Es va veure que amb aquestes obertures l'evolució de l'incendi era subventilat. Per tant, es donava una situació molt menys conservadora, ja que donaria lloc a un incendi de més curta durada on l'efecte de la temperatura sobre l'estructura metàl·lica tindria un menor impacte.

Tenint en compte el resultat anterior, es decideix substituir les dues obertures preliminars per una obertura inicial més gran, i així l'incendi és capaç de seguir la corba desitjada de HRR. Així, se simulen tres situacions:

- Els habitants del mòdul deixen la porta del menjador (passera) parcialment oberta (0,42 m x 2,2 m). Això es considera a les simulacions #1, #2, #3, #6 i #8 (Figura 14). La porta de vidre de l'habitació (balcó) es deixa tancada.
- Els habitants del mòdul deixen la porta de l'habitació (balcó) parcialment oberta (0,42 m x 2,2 m). Això es considera a la simulació #5. La porta de vidre del menjador (passera) es deixa tancada.
- Els habitants del mòdul deixen les portes de l'habitació (balcó) i del menjador (passera) parcialment obertes (0,21 m x 2,2 m). Això es considera a les simulacions #4 i #7.

La ventilació de l'incendi també està relacionada amb el trencament dels vidres que constitueixen les façanes dels mòduls. En totes les simulacions s'ha fixat un valor límit per al trencament del vidre de 500°C. En les simulacions #7-8, però, aquest control del trencament del vidre només s'ha fixat a la façana de la passera (esquerra), per tant, en aquests casos se suposa que la façana de la dreta (balcons) no es trenca durant l'evolució de l'incendi. Això s'ha fet així perquè suposa un cas més conservador que els altres, ja que l'incendi seguirà controlat pel combustible però hi haurà menys entrada d'aire i per tant les temperatures dins el contenidor seran majors.

4.6 Condicions ambientals

En aquest treball no s'ha avaluat l'efecte que les condicions meteorològiques poden tenir sobre el desenvolupament de l'incendi. Per tant, s'han utilitzat les condicions ambientals per defecte d'FDS, on la temperatura inicial és de 20˚C i no hi ha vent.

4.7 Definició de les variables de sortida en FDS

4.7.1 *Dispositius per controlar el trencament de les finestres*

Es col·loquen dispositius a les portes de vidre, tant al vidre de la passera d'entrada (menjador) com al del balcó (habitació), per mesurar la temperatura que s'assoleix en aquestes superfícies. Amb aquests dispositius es controla l'obertura d'aquestes portes per trencament del vidre. Es fixa una temperatura màxima de 500˚C. Aquests dispositius se situen a una altura de 2 m i a la superfície interior del vidre. Si s'assoleix el valor màxim fixat, l'obstacle que representa la porta de vidre desapareix.

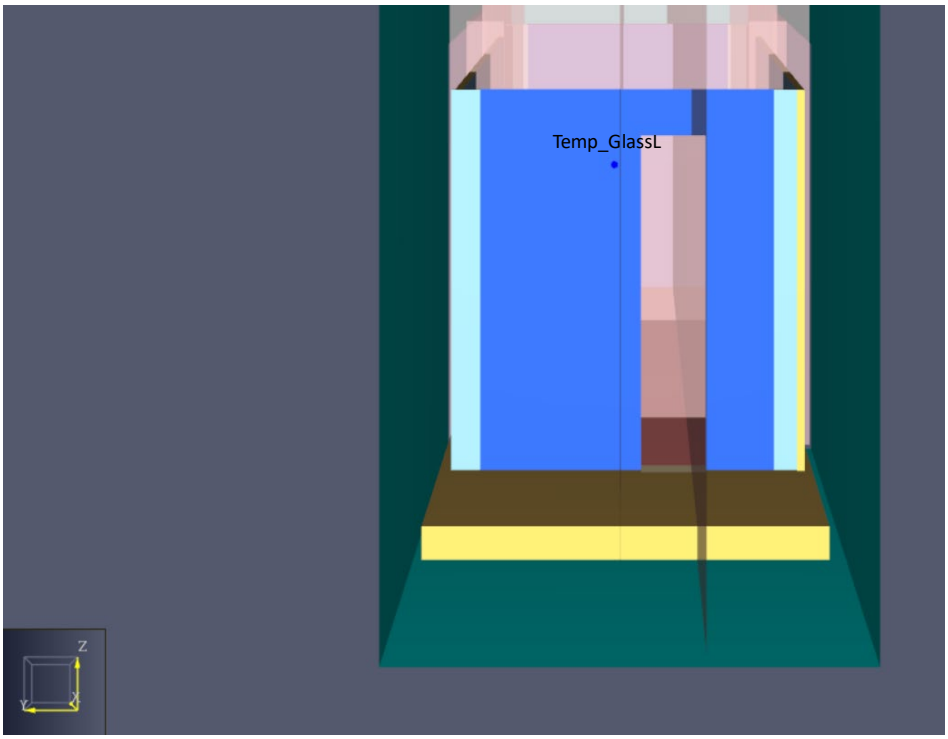


Figura 14. Posició del dispositiu de temperatura (Temp_GlassL) definit per controlar la desaparició del vidre (de color blau). S'observa també la ubicació de l'obertura inicial, de dimensions 0,42 m x 2,2 m per a les simulacions #1-3, #6 i #8).

4.7.2 *Dispositius per enregistrar temperatures a través de les parets*

La variable de sortida anomenada PROF en FDS s'utilitza per enregistrar temperatures a través de les parets en funció del temps. Aquests dispositius es col·loquen a les quatre cantonades del mòdul individual a cinc altures diferents (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,4 m) (Figura 15a) i també a les parets del mòdul separats 10 cm (costat esquerre) o 4 cm (costat dret) dels anteriors (Figura 15b) i a les mateixes altures. També se situen quatre dispositius al sostre (a 2,5 m d'altura) a les cantonades (Figura 15c). La posició d'aquests dispositius en el mòdul doble es pot veure a la Figura 16 i a la Figura 17.

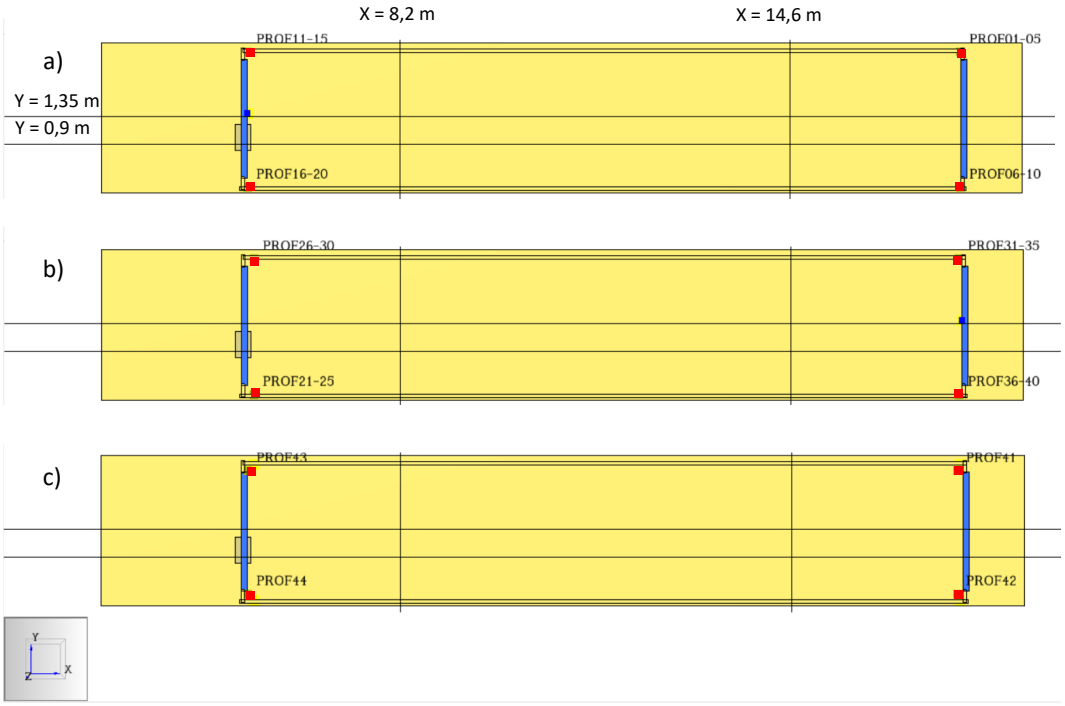


Figura 15. a) Sensors de temperatura interior (PROF) situats a les cantonades del mòdul; b) Sensors PROF situats a una certa distància en la direcció x respecte als sensors PROF situats a les cantonades (distància de separació en els sensors PROF de l'esquerra: 0,1 m; distància de separació en els sensors PROF de la dreta: 0,04 m; c) Sensors PROF situats al sostre del mòdul (altura = 2,5 m). En les figures a) i b) els sensors PROF se situen a cinc altures diferents (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,4 m segons l'ordre creixent dels números). Les línies verticals i horitzontals negres representen els plans de tall 2D establerts per enregistrar la temperatura.

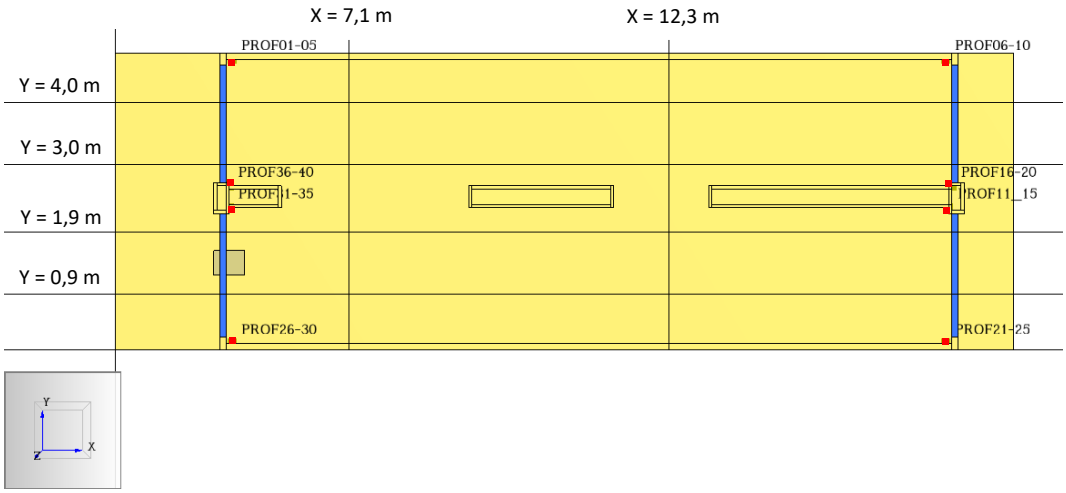


Figura 16. Localització i numeració de dispositius PROF situats al mòdul doble (cada grup de dispositius conté 5 dispositius situats a les següents altures (m): 2,4; 2,0; 1,5; 1,0; 0,5). Les línies verticals i horitzontals negres representen els plans de tall 2D establerts per enregistrar la temperatura.

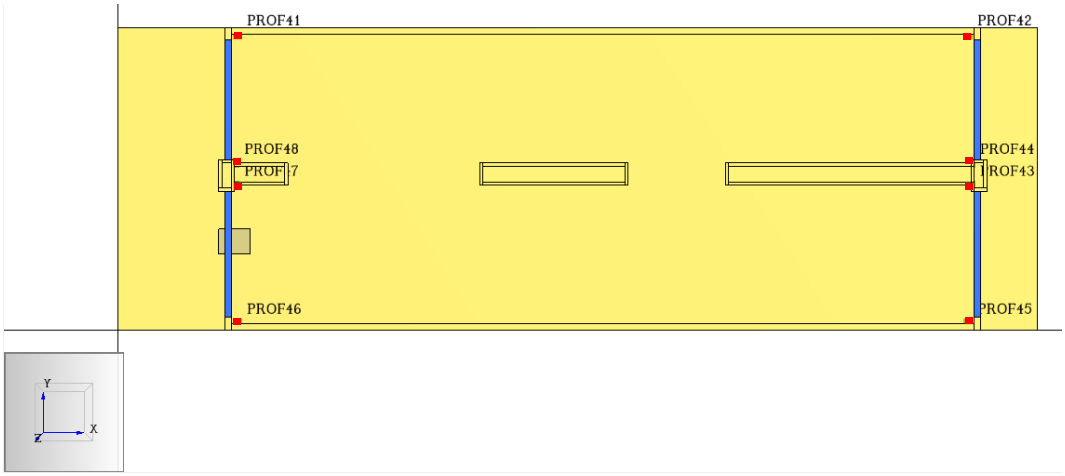


Figura 17. Localització i numeració dels dispositius PROF situats al sostre del mòdul doble; cada dispositiu està situat a una altura de 2,5 m.

4.7.3 *Arxius de tall 2D*

Se situen arxius de tall (*slice file*) 2D de temperatura tal i com es veu a la Figura 18 per al mòdul individual. Els arxius de tall del mòdul doble es mostren a l'anterior Figura 16.

En el cas del mòdul individual, els arxius de tall 2D de temperatura posicionats en el pla *x* se situen aproximadament a la meitat del menjador i a la meitat de l'habitació. Els situats en el pla *y* se situen a la meitat del contenidor i dividint la meitat sud del contenidor en dues parts, de manera que travessa l'obertura definida inicialment a l'esquerra.

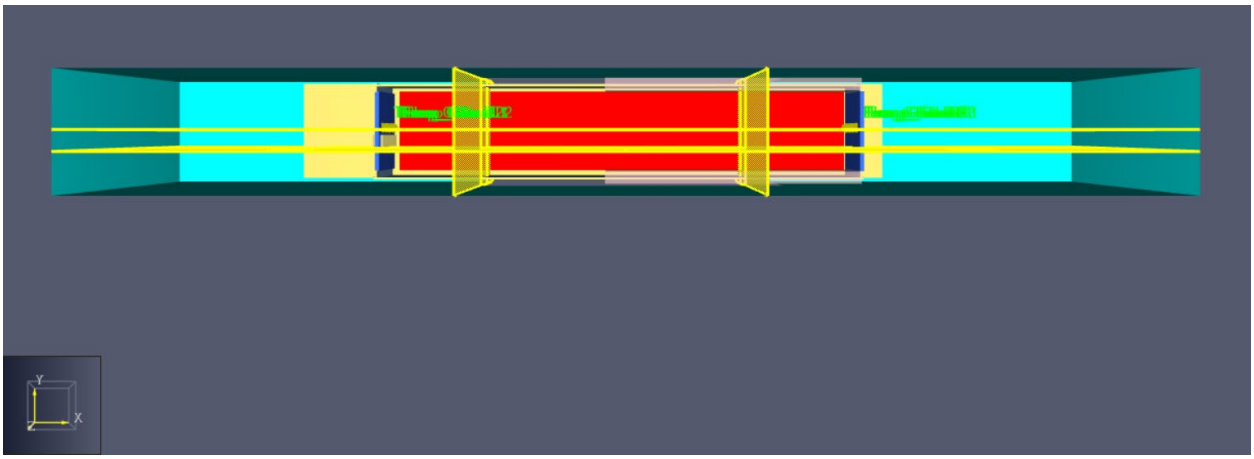


Figura 18. Arxius de tall 2D de temperatura (plans grocs) per al mòdul individual: 2 talls en el pla x i 2 talls en el pla y.

4.7.4 *Arxius de contorn*

Els arxius de contorn registren variables de superfície a totes les obstruccions sòlides. Tant en el cas del contenidor individual com en el doble, s'enregistren arxius de contorn per mesurar la temperatura del gas, la temperatura de les parets i el flux de calor incident.

5 Resultats

A continuació es descriuen els resultats obtinguts per a les simulacions realitzades amb FDS. A la Taula 4 s'indica el temps de còmput requerit, les característiques de l'equip utilitzat i el nombre de cel·les. Per millorar el rendiment de les simulacions s'ha fet ús del protocol MPI (interfase de pas de missatges), així que també s'indica quants processos (MPIs) s'han definit.

Taula 4. Escenaris simulats amb FDS i recursos computacionals usats.

#	Nom de l'escenari	Temps de còmput	MPIs	Característiques processador	Nombre total de cel·les
1	S_05[0]_E_0P_TT	40 dies	12	14 nuclis, 28 processadors	1295866
2	S_05[-1]_E_0P_ TT	40 dies	12	14 nuclis, 28 processadors	1295866
3	S_10[0]_E_0P_ TT	5 dies	9	14 nuclis, 28 processadors	498888
4	S_10[0]_E+D_0P_ TT	9 dies	9	28 nuclis, 28 processadors	498888
5	S_10[0]_D_0P_ TT	5 dies	9	28 nuclis, 28 processadors	498888
6	D_10+05[-2]_E_1P_ TT	9 dies	28	28 nuclis, 28 processadors	1085961
7	D_10+05[-2]_E+D_1P_ET	18 dies	13	8 nuclis, 16 processadors	1085961
8	D_10+05[-2]_E_1P_ET	12 dies	13	28 nuclis, 28 processadors	1085961

5.1 Comportament de l'incendi

El comportament de l'incendi és similar per als dos mòduls, individual i doble, quan es defineix una obertura única situada a l'esquerra i s'especifica el possible trencament dels vidres. A continuació es detalla el comportament en el mòdul individual (S_05[0]_E_0P_TT) i es complementa la descripció amb imatges de la simulació.

Inicialment l'incendi es manté situat a la malla 7 (Figura 19a), amb flames altes però que no sobrepassen l'obertura abans del trencament del vidre esquerre. Un cop aquest vidre es trenca hi ha més aportació d'oxigen i les flames es fan encara més grans, sortint per l'obertura, que ara és més gran (Figura 19b). El foc es manté així durant una bona estona (Figura 19c), abans no es trenca el vidre de la dreta. Llavors, el foc es desplaça i queda situat al centre del contenidor, entre les malles 6 i 7 (Figura 19d). Les flames són força altes mentre l'incendi està desenvolupat (Figura 19e). Quan arriba l'etapa de decaïment les flames es fan cada cop més petites (Figura 19f).

L'obertura definida al contenidor i, a la vegada, el temps de trencament dels vidres (Taula 5), determinen el comportament de l'incendi.

Taula 5. Temps de trencament dels vidres dels mòduls per a les simulacions realitzades. Al contenidor doble s'indiquen 2 temps perquè la part central és d'un altre material i això fa que no tota la façana es trenqui a la vegada.

#	Nom de l'escenari	Trencament del vidre esquerre	Trencament del vidre dret
1	S_05[0] _E_0P_TT	383,1 s	1353,3 s
2	S_05[-1] _E_0P_ TT	392,8 s	1331,0 s
3	S_10[0]_E_0P_ TT	428,7 s	1278,7 s
4	S_10[0]_E+D_0P_ TT	740,2 s	503,0 s
5	S_10[0]_D_0P_ TT	1221,0 s	423,1 s
6	D_10+05[-2]_E_1P_ TT	456,9+541,7 s	883,6+897,1 s
7	D_10+05[-2]_E+D_1P_ET	483,8+492,1 s	-
8	D_10+05[-2]_E_1P_ET	427,9+541,3 s	-

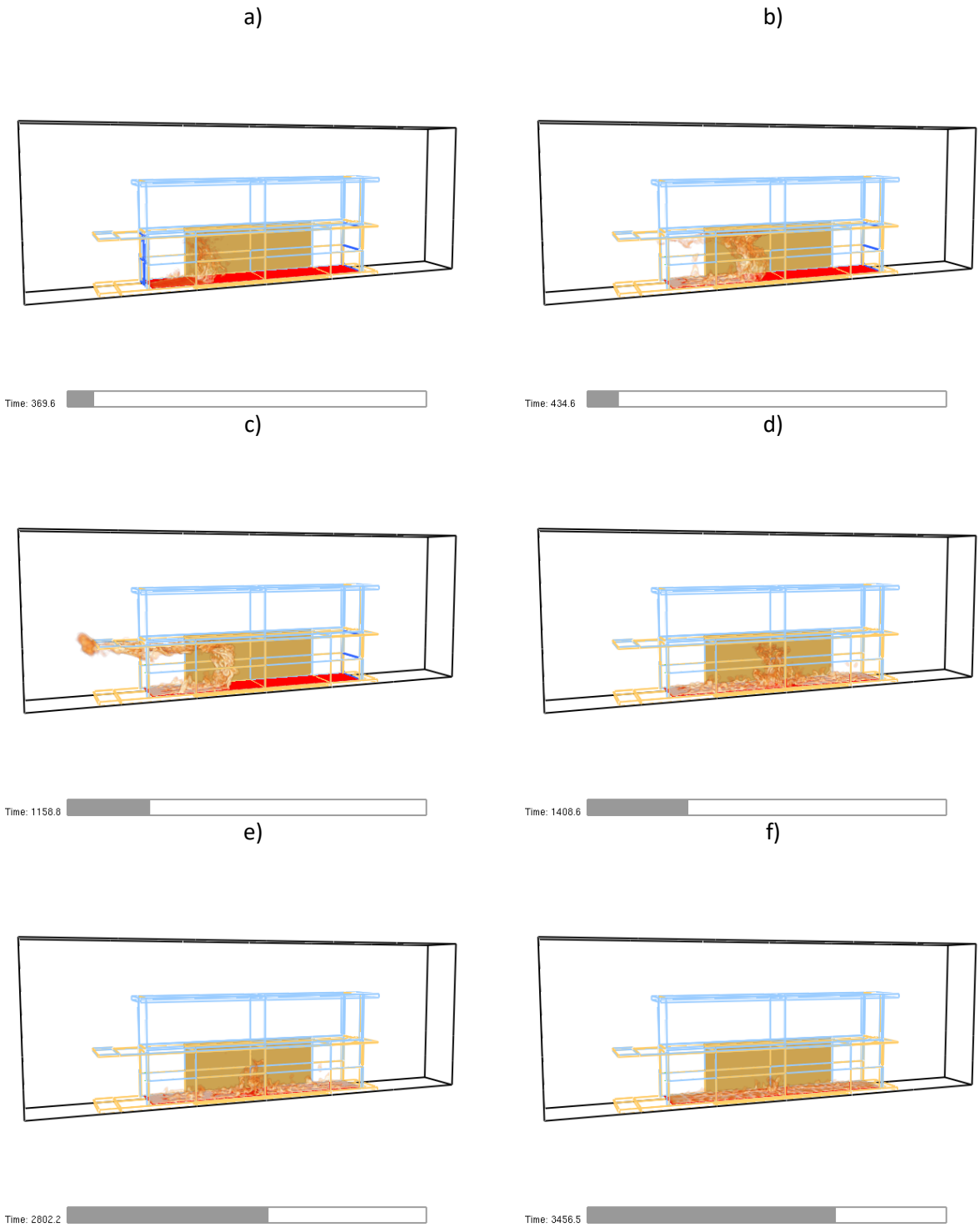


Figura 19. Comportament de l'incendi. La simulació S_05[0]_E0P_TT (#1) s'ha utilitzat com a exemple.

5.2 Temperatura del gas i de les parets dels contenidors

En aquest apartat es presenten resultats dels escenaris #1, #2 i #6 únicament. Aquests són els escenaris bàsics, en tant que l'aïllament tèrmic és la característica principal que varia per a cada escenari. La resta d'escenaris simulats es comenten a la següent secció 5.3, on es descriu l'efecte de les obertures.

5.2.1 *Escenari S_05[0]_E_OP_TT (#1)*

A les següents figures es pot veure l'evolució de la temperatura del gas proper al sostre (Figura 20) i de la temperatura del sostre (Figura 21). La forma de les corbes és similar en els dos casos. Ara bé, una diferència important entre les corbes de temperatura del gas i del sostre és que la temperatura del gas presenta més fluctuacions i és sempre lleugerament superior a la temperatura de la superfície.

S'observen diferències importants segons la malla, és a dir, segons la posició on es mira la temperatura, però són raonables si es té en compte el comportament de l'incendi explicat en l'anterior apartat.

Els perfils de temperatura associats a la zona de les malles 5 i 6 presenten un increment de temperatura a partir del moment en què es trenca el vidre situat a la dreta (a la malla 5). Els valors màxims de temperatura del gas assolits al sostre després d'aquest trencament i abans de la fase de decaïment són d'aproximadament 630°C per a la malla 5 i 860°C per a la malla 6.

Per contra, les malles 7 i 8 presenten un comportament contrari, és a dir, la temperatura disminueix a partir del trencament del vidre situat a la dreta. Els valors màxims de temperatura del gas assolits al sostre després d'aquest trencament i abans de la fase de decaïment són d'aproximadament 860°C per a la malla 7 i 690°C per a la malla 8.

D'altra banda, abans de l'inici de la fase de decaïment les malles que cobreixen la part central del mòdul (malles 6 i 7) tenen temperatures més altes que les registrades en les altres dues malles (malles 5 i 8), que són les que estan més properes a les obertures (vidres trencats).

Els valors màxims de temperatura s'assoleixen a les malles 7 i 8, abans del trencament del vidre de la dreta i després del trencament del vidre esquerre. Els valors de temperatura es queden per sota dels 1000°C la major part del temps (només se supera aquest llindar de temperatura puntualment).

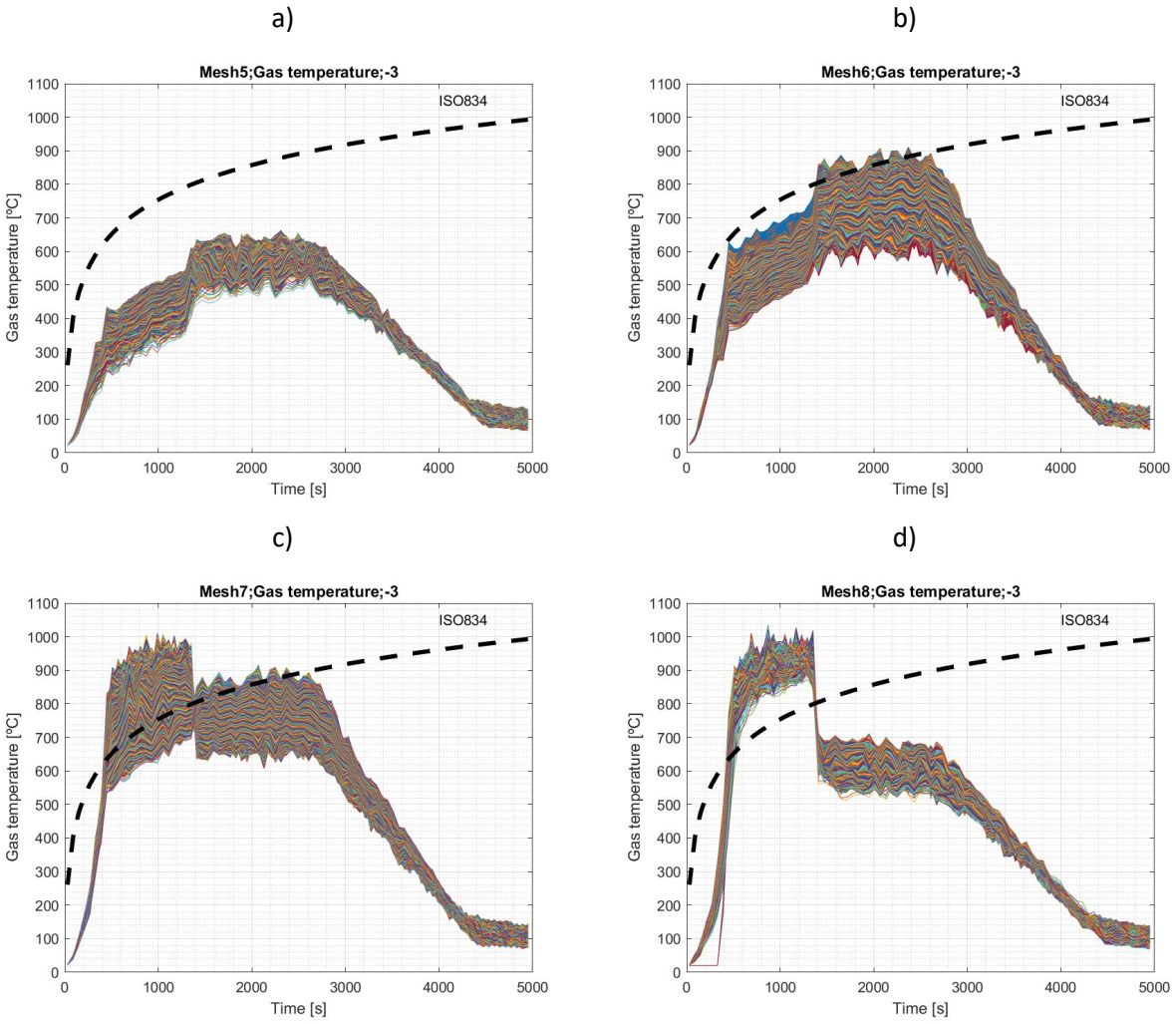


Figura 20. Evolució de la temperatura del gas a prop del sostre (el número -3 indica que s'està mirant la temperatura del gas associada a la superfície que té un vector normal que apunta en la direcció –z) en funció de la malla per a l'escenari de simulació S_05[0]_E_0P_TT (#1): a) malla 5; b) malla 6; c) malla 7; d) malla 8.

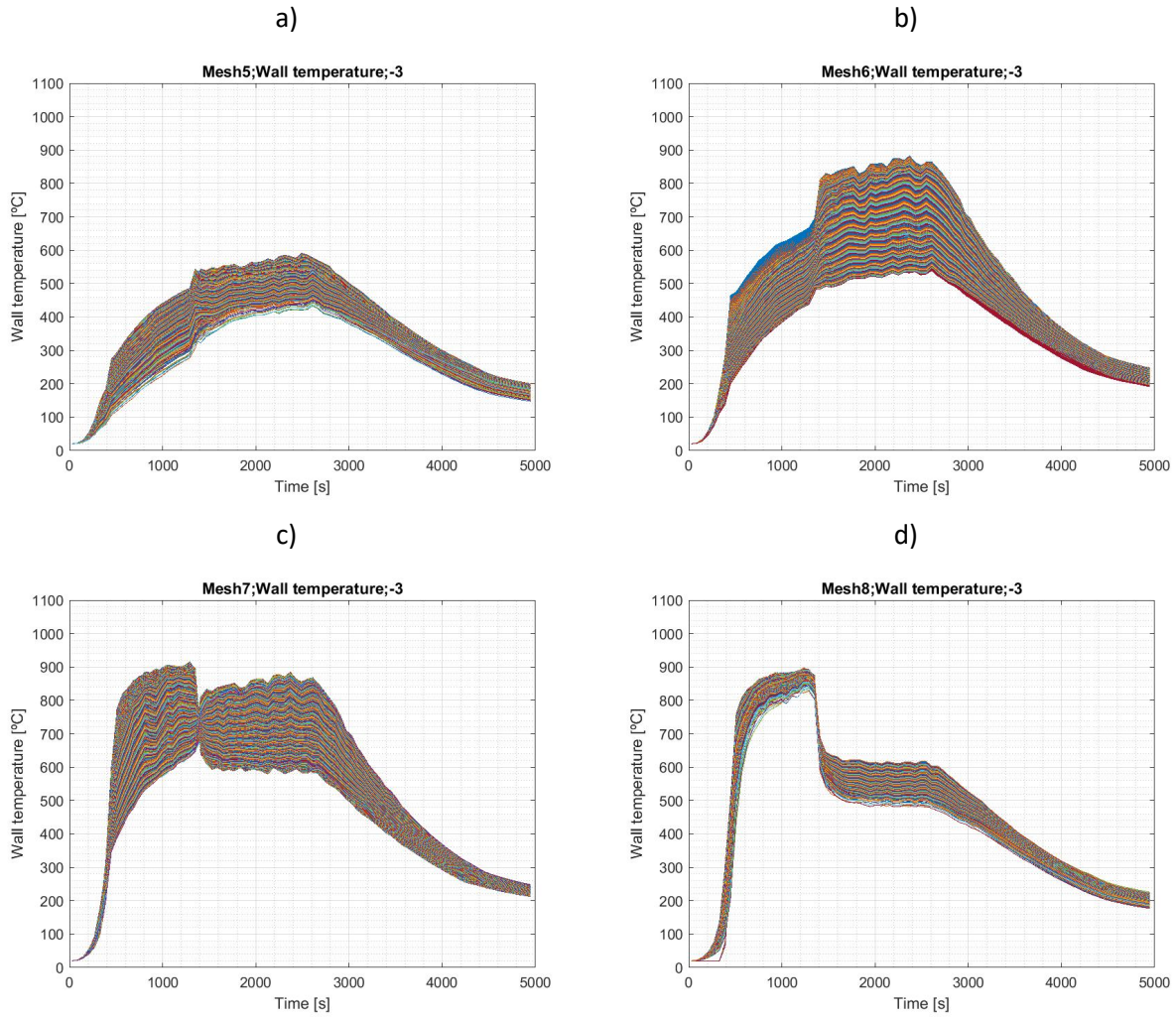


Figura 21. Evolució de la temperatura a la superfície del sostre (el número -3 indica que s'està mirant la temperatura de la superfície que té un vector normal que apunta en la direcció –z) en funció de la malla per a l'escenari de simulació S_05[0]_E_0P_TT (#1): a) malla 5; b) malla 6; c) malla 7; d) malla 8.

5.2.2 *Escenari S_05[-1]_E_0P_TT (#2)*

A les següents figures es pot veure l'evolució de la temperatura del gas proper al sostre (Figura 22) i de la temperatura del sostre (Figura 23) per a l'escenari S_05[-1]_E_0P_TT (#2). La forma de les corbes és similar a les de la simulació S_05[0]_E_0P_TT (#1) i els valors assolits en aquest cas, en què s'ha eliminat una capa d'aïllant, també. Els valors màxims mitjans de temperatura del gas a prop del sostre després del trencament del vidre de la dreta són, segons la malla, de 650°C (malla 5), 870°C (malla 6), 880°C (malla 7), 695°C (malla 8) aproximadament.

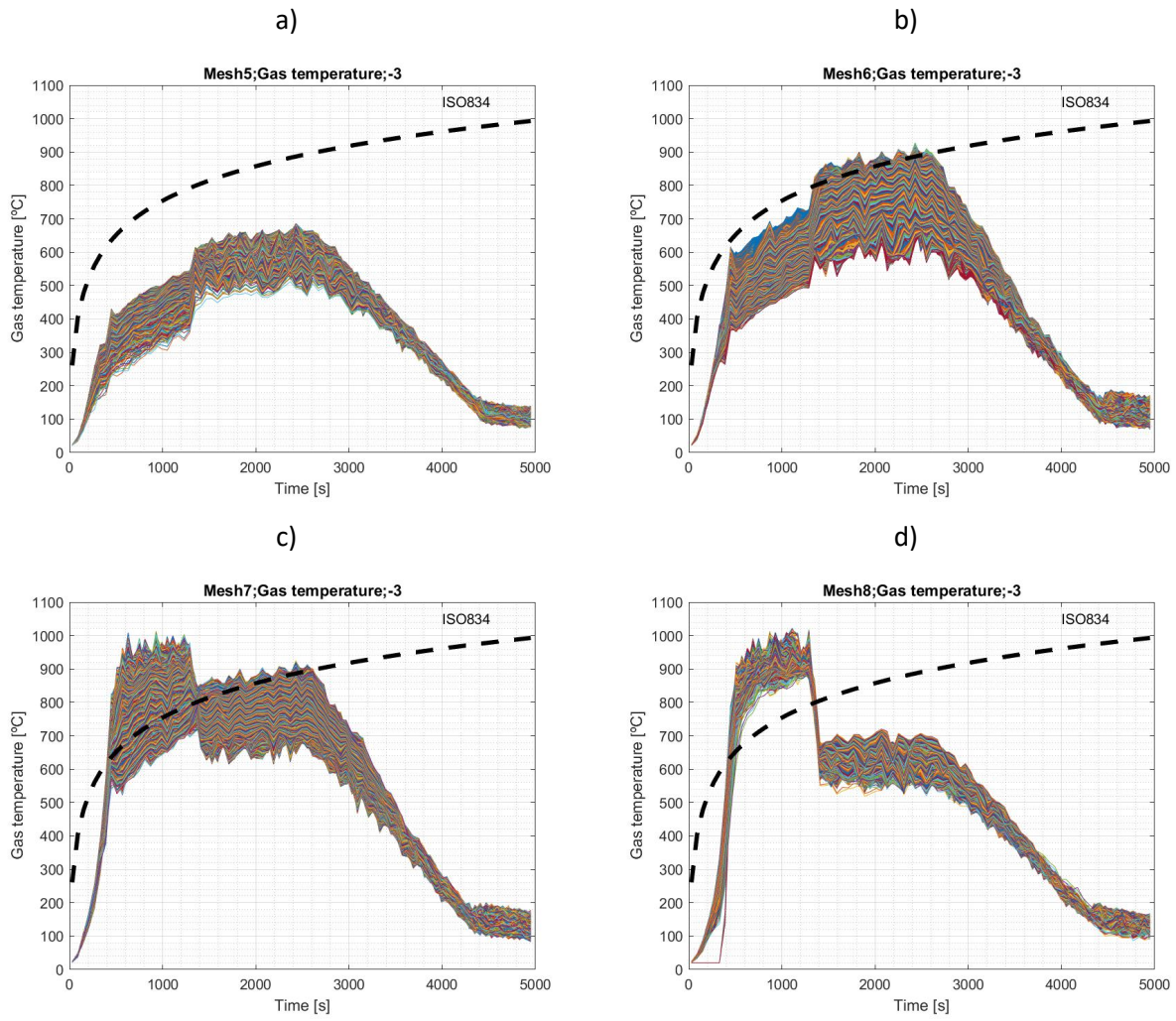


Figura 22. Evolució de la temperatura del gas a prop del sostre (el número -3 indica que s'està mirant la temperatura del gas associada a la superfície que té un vector normal que apunta en la direcció –z) en funció de la malla per a l'escenari de simulació S_05[-1]_E_0P_TT (#2): a) malla 5; b) malla 6; c) malla 7; d) malla 8.

Anàlogament al què succeïa en el cas anterior, les temperatures a la superfície del sostre fluctuen menys que les temperatures del gas en la zona propera al sostre i són també lleugerament inferiors.

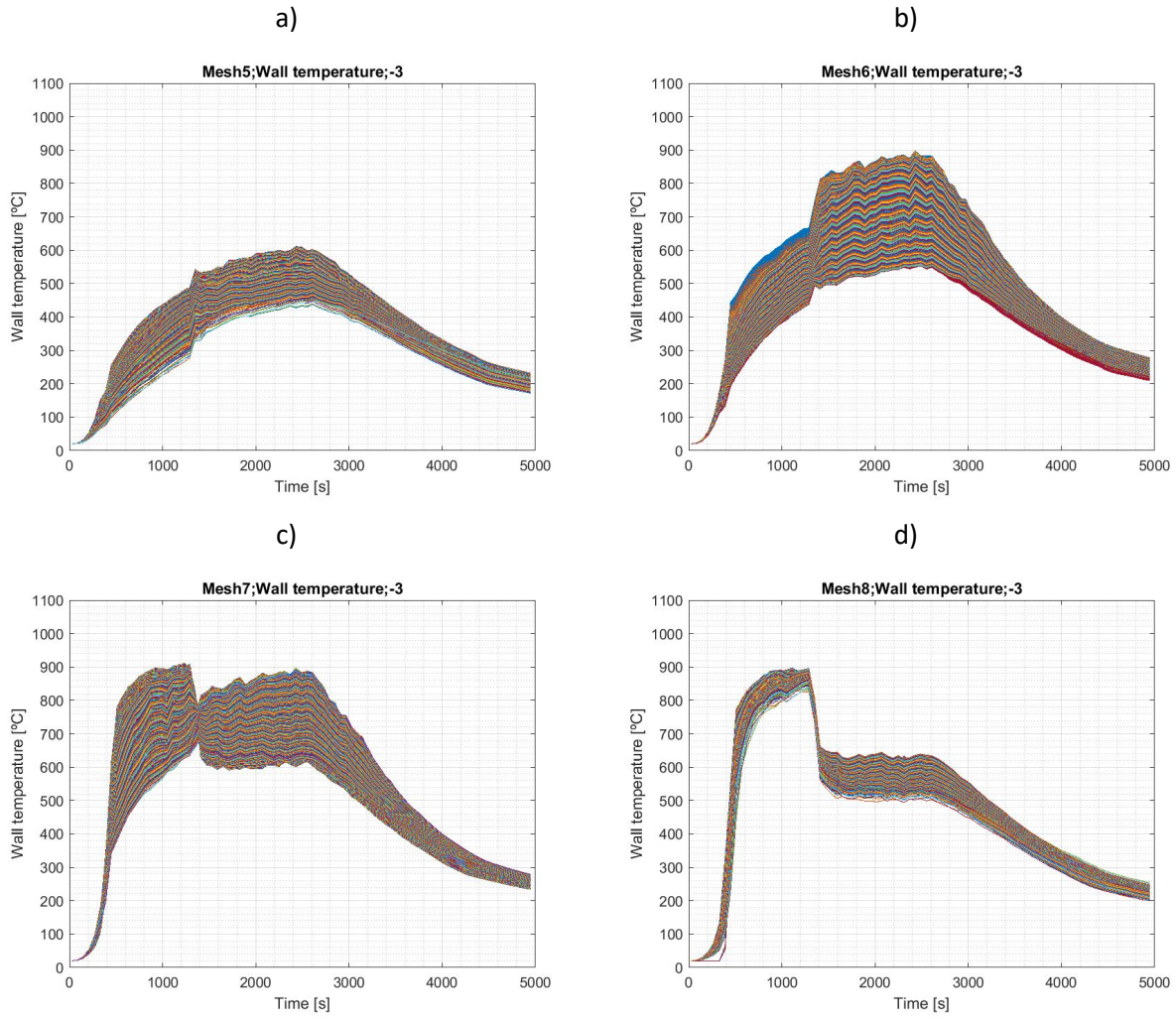


Figura 23. Evolució de la temperatura a la superfície del sostre (el número -3 indica que s'està mirant la temperatura de la superfície que té un vector normal que apunta en la direcció –z) en funció de la malla per a l'escenari de simulació S_05[-1]_E_0P_TT (#2): a) malla 5; b) malla 6; c) malla 7; d) malla 8.

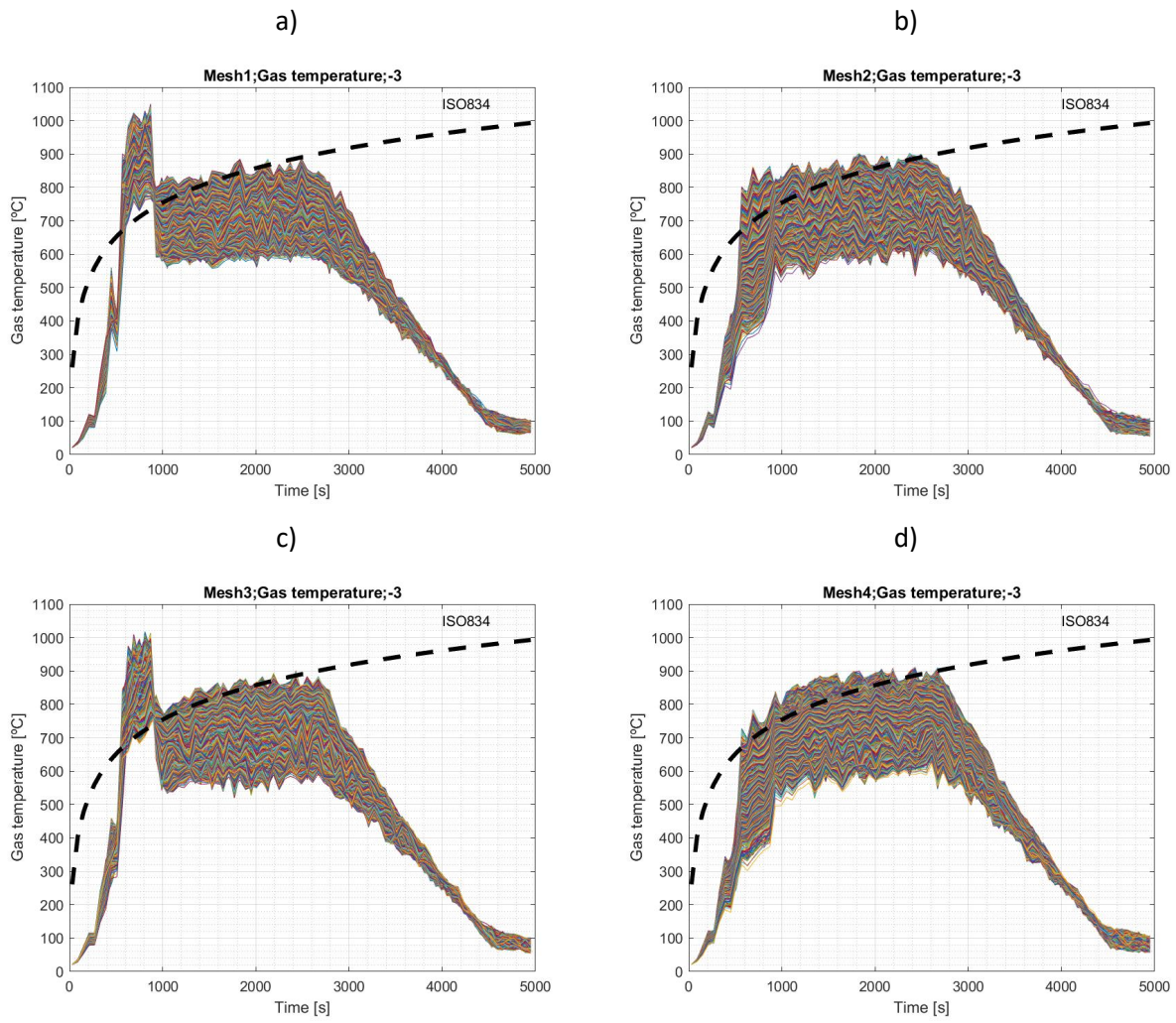
5.2.3 *Escenari D_10+05[-2]_E_1P_TT (#6)*

A les següents figures es pot veure l'evolució de la temperatura del gas proper al sostre (Figura 24) per a l'escenari D_10+05[-2]_E_1P_TT (#6). S'hi inclou també la corba normalitzada de temps-temperatura (ISO 834). No es mostra aquí la temperatura de la superfície del sostre perquè segueix la mateixa tendència que s'ha observat en els dos casos anteriors.

La forma de les corbes és similar per a les malles 2, 4, 7 i 8, que segons la Figura 12a cobreixen la regió del mòdul doble que quedaria aproximadament a la meitat dreta del mòdul, és a dir, a la

meitat on no hi ha cap obertura inicialment. Aquestes quatre figures (Figura 24b,d,g,h) mostren un creixement gradual de la temperatura del gas fins al moment en què comença la fase de decaïment de l'incendi. Les temperatures màximes mitjanes que s'assoleixen en aquesta fase són diferents segons la malla: ~900°C per a les malles 2, 4 i 7; ~700°C per a la malla 8. Es pot comprovar que les temperatures més baixes s'assoleixen a la malla 8, situada completament a tocar del vidre que es trenca passats 880-890 s.

Les malles que queden a la meitat esquerra del mòdul (malles 1, 3, 5 i 6) tenen un comportament similar al descrit anteriorment a partir dels 1000 s. Abans dels 1000 s presenten un creixement pronunciat de la temperatura que assoleix els 1000°C però, com el trencament del vidre de la dreta es dona aproximadament als 880-890 s, posteriorment la temperatura baixa de cop al augmentar la ventilació en el mòdul.



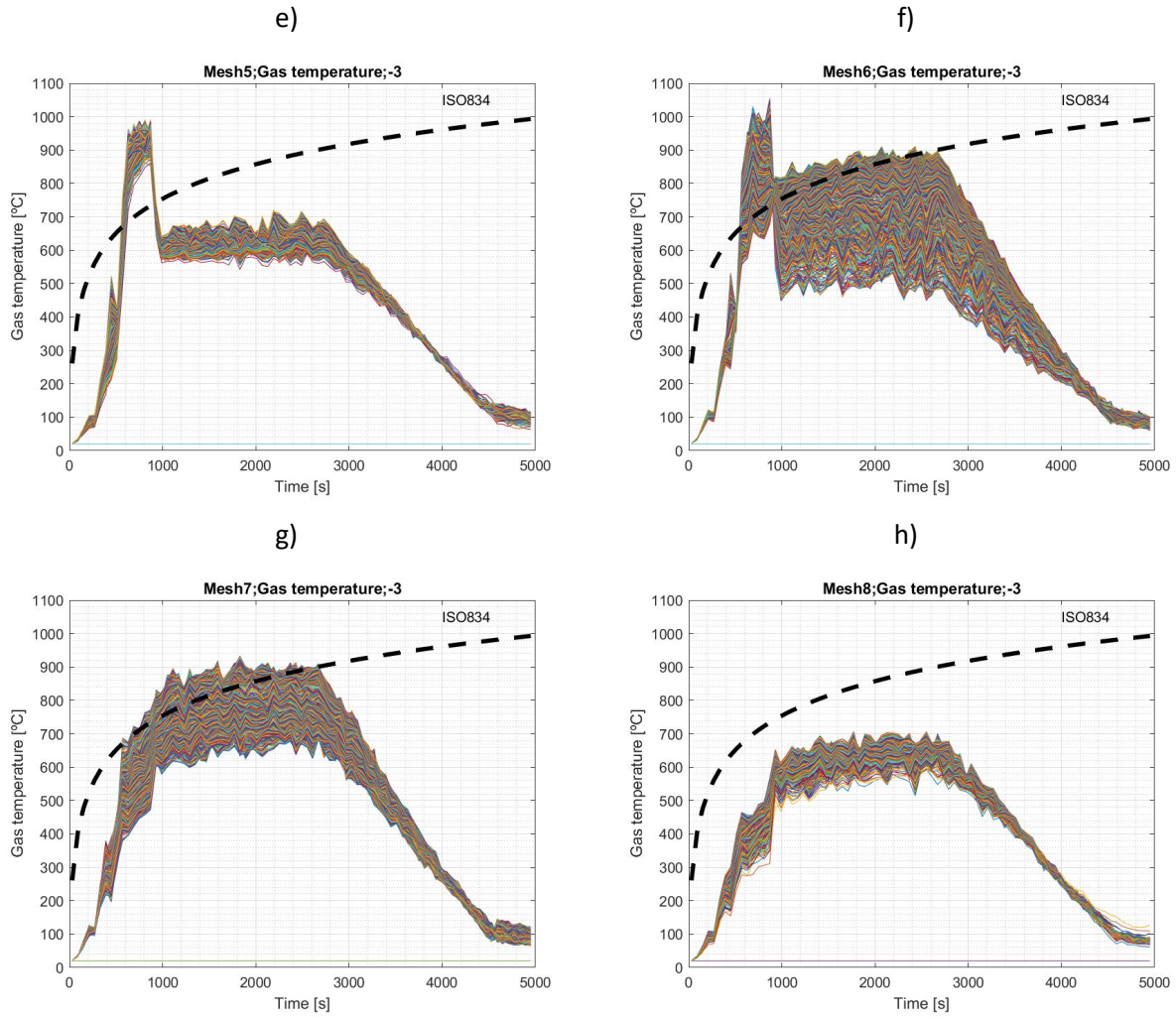


Figura 24. Evolució de la temperatura del gas a prop del sostre (el número -3 indica que s'està mirant la temperatura del gas associada a la superfície que té un vector normal que apunta en la direcció –z) en funció de la malla per a l'escenari de simulació D_10+05[-2]_E_1P_TT (#6): a) malla 1; b) malla 2; c) malla 3; d) malla 4; e) malla 5; f) malla 6; g) malla 7; h) malla 8.

Si comparem la Figura 24a amb la Figura 20d, ja que totes dues contenen dades de l'evolució de la temperatura a la zona del sostre més propera a l'obertura inicial, podem destacar un comportament diferenciat pel que fa a les temperatures abans del moment del trencament del vidre de la dreta. En el cas del mòdul individual la temperatura creix i assoleix valors >900°C durant 800 s tot i el trencament del vidre de l'esquerra als 384,2 s. En el mòdul doble no s'assoleixen temperatures tan altes durant tanta estona.

5.3 Efecte de la posició de les obertures

En aquesta secció s'analitzen els escenaris #3-5, i #7-8. En aquests escenaris s'han efectuat canvis en les obertures respecte als escenaris bàsics (#1 i #6) per veure l'efecte de la ventilació en les temperatures del gas.

5.3.1 *Mòdul individual*

A continuació es presenten els resultats obtinguts per als 3 escenaris simulats amb una mida de cel·la de 0,1 m per estudiar l'efecte de la posició de les obertures inicials (simulacions #3-5).

Tal i com es veu a la Taula 5 els escenaris S_10[0]_E_0P_TT (#3) i S_10[0]_D_0P_TT (#5) presenten temps de trencament dels vidres similars entre ells, tot i que en el primer escenari l'obertura està a l'esquerra i en el segon a la dreta.

El comportament del foc és similar al de l'escenari S_05[0]_E_0P_TT (#1), segons la seqüència d'imatges visualitzada amb Smokeview. D'altra banda, els temps de trencament també són semblants als obtinguts amb una mida de cel·la de 0,05 m (vegeu a la Taula 5 els temps de l'escenari S_05[0]_E_0P_TT (#1)); el temps de trencament del vidre on hi ha l'obertura és només lleugerament més elevat, i el comportament contrari s'observa per al vidre on no hi ha l'obertura. Per tant, els resultats obtinguts amb una mida de cel·la de 0,1 m són totalment comparables als obtinguts amb una mida de cel·la de 0,05 m.

L'escenari S_05[0]_E_0P_TT (#1) i l'escenari S_10[0]_E_0P_TT (#3) tenen el mateix tipus de revestiment i l'obertura està situada a la mateixa posició. A la Figura 25a es pot veure que l'evolució de la temperatura del gas al sostre en l'escenari S_10[0]_E_0P_TT (#3) segueix un perfil similar a l'obtingut utilitzant una mida de cel·la de 0,05 m (vegeu la Figura 20d) si ens fixem en una mateixa zona del mòdul. Les temperatures màximes només superen puntualment els 1000°C i les temperatures registrades després del trencament del vidre de la dreta són properes als 700°C.

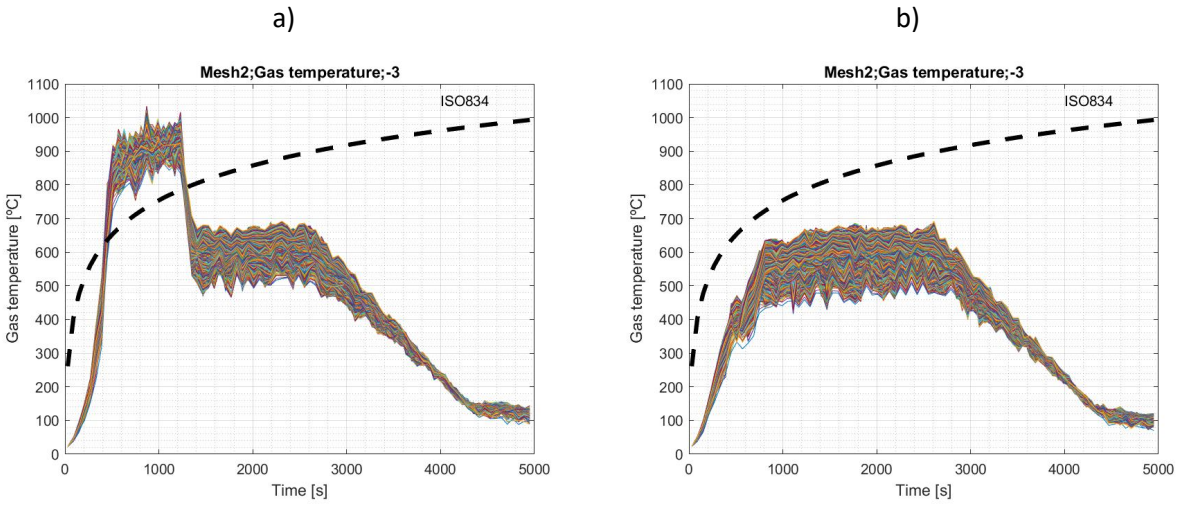


Figura 25. Evolució de la temperatura del gas a prop del sostre (el número -3 indica que s'està mirant la temperatura del gas associada a la superfície que té un vector normal que apunta en la direcció –z) per a l'escenari: a) S_10[0]_E_0P_TT (#3); b) S_10[0]_E+D_0P_TT (#4). S'inclouen només les cel·les que en l'escenari S_05[0]_E_0P_TT (#1) quedaven incloses a la malla 8.

En el cas de tenir 2 obertures (S_10[0]_E+D_0P_TT; #4), el comportament de l'incendi és diferent respecte al que s'ha descrit a l'apartat 5.1. i les temperatures que es registren al sostre també. Es pot comprovar aquesta diferència observant l'evolució de la temperatura del gas al sostre de la Figura 25a i b. Al haver-hi dues obertures no s'assoleixen temperatures tan altes a la zona del mòdul en què anteriorment se superaven els 900°C (malla 8 de l'escenari S_05[0]_E_0P_TT (#1)). Ara no se superen els 700°C. Això és així perquè al tenir dues obertures l'energia que s'allibera en funció del temps, que ve donada per la corba d'incendi fixada, es reparteix per tota la superfície del mòdul, ja que hi ha suficient oxigen tant a la banda dreta com a l'esquerra.

5.3.2 *Mòdul doble*

A continuació es presenten els resultats obtinguts en els 3 escenaris simulats per estudiar l'efecte de la posició de les obertures inicials quan la paret divisòria està inclosa en el mòdul doble.

Si ens fixem primerament en els escenaris simulats suposant que la paret de vidre de la dreta no es trenca (simulacions D_10+05[-2]_E_1P_ET (#8) i D_10+05[-2]_E+D_1P_ET (#7)), tal i com es veu a la Taula 5 els escenaris presenten diferències en els temps de trencament dels vidres. En la simulació D_10+05[-2]_E+D_1P_ET (#7) els dos vidres de l'esquerra es trenquen amb una diferència de 8,3 s només. Per contra, en la simulació D_10+05[-2]_E_1P_ET (#8) la diferència de temps és major, de 113,4 s. A més, quan només hi ha una obertura a l'esquerra, la primera part del vidre es trenca abans que quan n'hi ha dues. Això indica que quan hi ha dues obertures, hi ha una millor ventilació i la temperatura límit s'assoleix més tard, però quan ho fa, com que la distribució de temperatures és força uniforme en tot el mòdul, la segona part del vidre es trenca abans.

En les simulacions D_10+05[-2]_E_1P_ET (#8) i D_10+05[-2]_E+D_1P_ET (#7), al no trencar-se el vidre de la dreta del mòdul doble, les temperatures màximes assolides es mantenen durant aproximadament tot el període en què el foc està desenvolupat i superen lleugerament els 1000°C (Figura 26 i Figura 27). Aquestes corbes indiquen que aquesta situació és molt més desfavorable que els escenaris simulats anteriorment.

Una diferència a destacar entre aquestes dues simulacions s'observa en les dades registrades a la malla 4 (reviseu la Figura 13 per veure la posició de la malla). La temperatura del gas en aquesta zona del mòdul s'incrementa més ràpidament quan hi ha una segona obertura inicial a la banda dreta (Figura 26d vs. Figura 27d). Això es així perquè l'obertura situada a la dreta afavoreix la reacció de combustió i, per tant, dona lloc a un augment de la temperatura en aquella zona. Aquesta diferència no es pot observar a la malla 2 (reviseu la Figura 13 per veure la posició de la malla) perquè aquesta malla ocupa tota la llargària del mòdul i, per tant, les sèries que s'hi observen també inclouen la meitat esquerra del mòdul.

D'altra banda, el comportament de la temperatura del gas en aquestes dues simulacions divergeix força del comportament associat a la corba normalitzada de temps-temperatura (ISO 834) (vegeu la Figura 27; s'hi ha inclòs la corba normalitzada). En els escenaris simulats la temperatura assoleix valors més alts, l'increment de temperatura és menor en els primers instants de temps i la fase de decaïment està considerada.

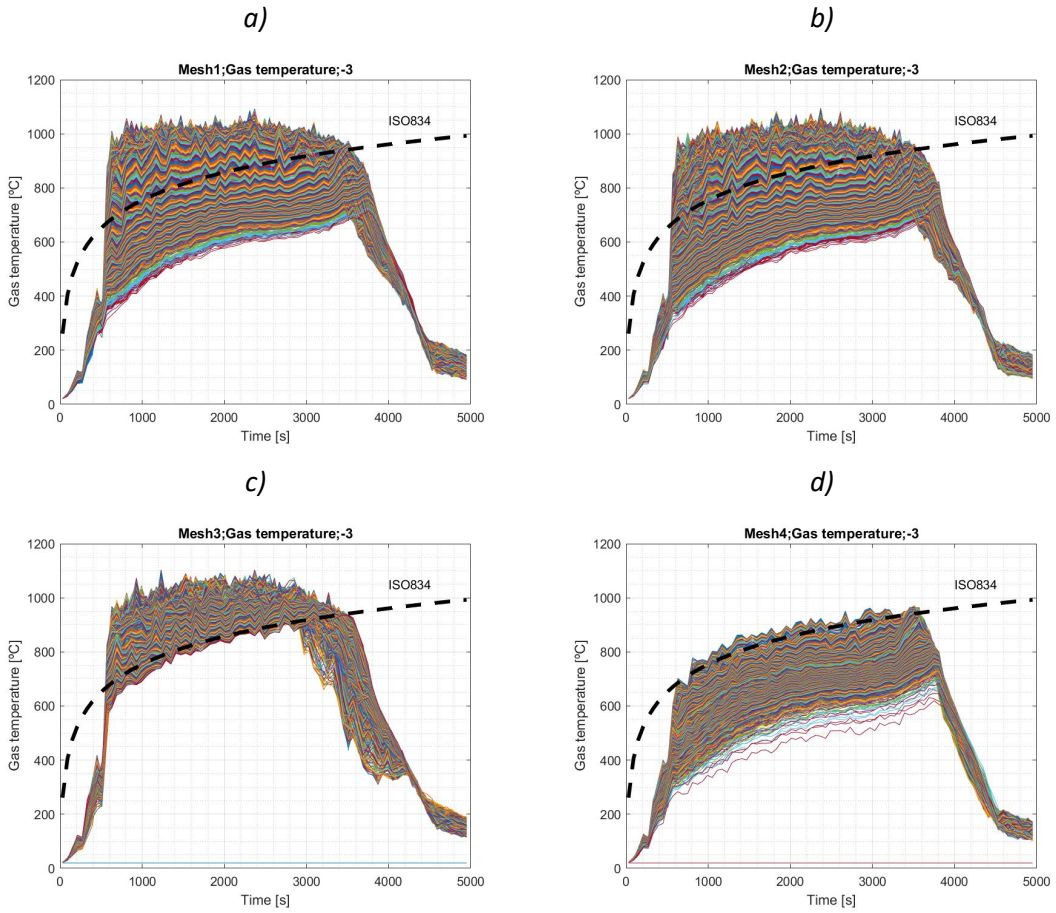


Figura 26. Evolució de la temperatura del gas a prop del sostre (el número -3 indica que s'està mirant la temperatura del gas associada a la superfície que té un vector normal que apunta en la direcció –z) en funció de la malla per a l'escenari de simulació D_10+05[-2]_E_1P_ET (#8): a) malla 1; b) malla 2; c) malla 3; d) malla 4.

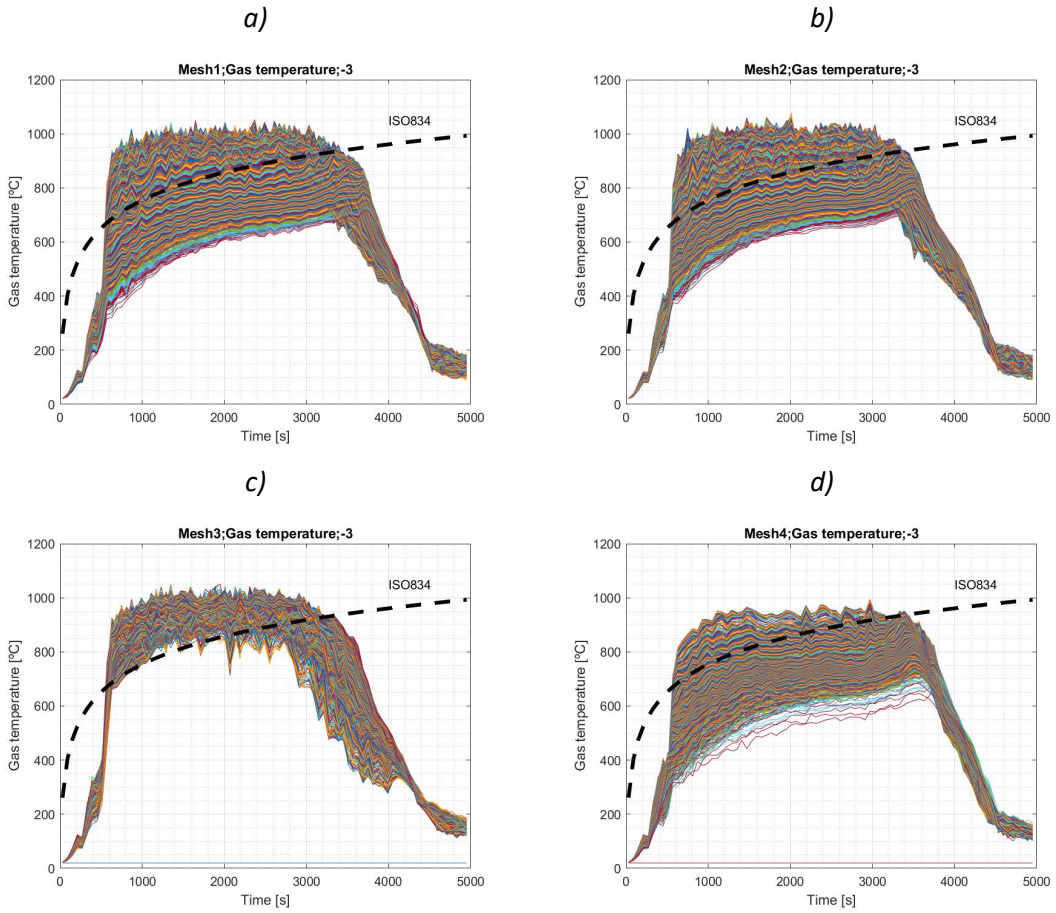


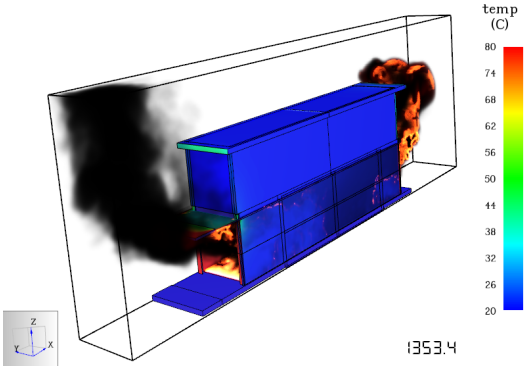
Figura 27. Evolució de la temperatura del gas a prop del sostre (el número -3 indica que s'està mirant la temperatura del gas associada a la superfície que té un vector normal que apunta en la direcció –z) en funció de la malla per a l'escenari de simulació D_10+05[-2]_E+D_1P_ET (#7): a) malla 1; b) malla 2; c) malla 3; d) malla 4.

5.4 Efecte del foc i el fum sobre els mòduls superiors

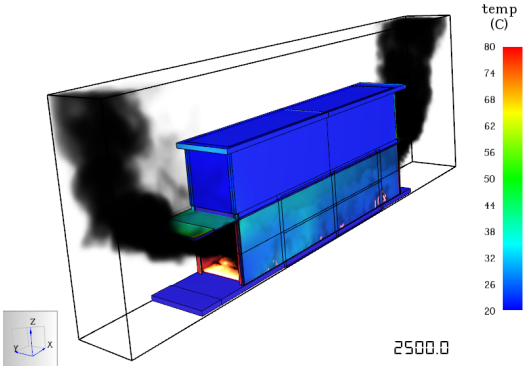
A partir dels resultats de la simulació S_05[0]_E_0P_TT (#1) s'ha analitzat si les flames que es generen durant l'incendi i que surten per les obertures del mòdul (obertura inicial i obertures creades a partir del trencament dels vidres) afecten la façana de vidre del mòdul superior. Això s'ha fet observant directament els resultats dels arxius de contorn de la simulació amb el programa Pyrosim®.

Segons aquestes visualitzacions (Figura 28), les temperatures que es registren als vidres són inferiors als 80°C i, per tant, les flames que es generen no provocarien el trencament del vidre del mòdul superior, ja que això passaria només si se superessin temperatures de 400°C.

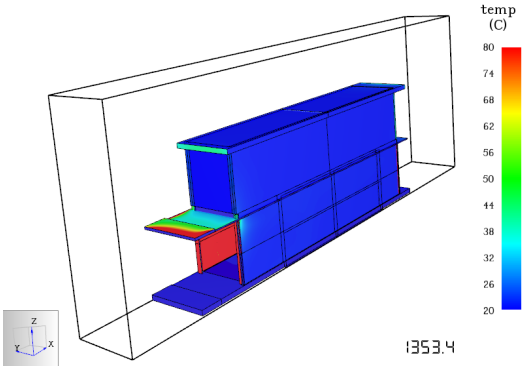
a)


temp
(C)
80
74
68
62
56
50
44
38
32
26
20
1353.4

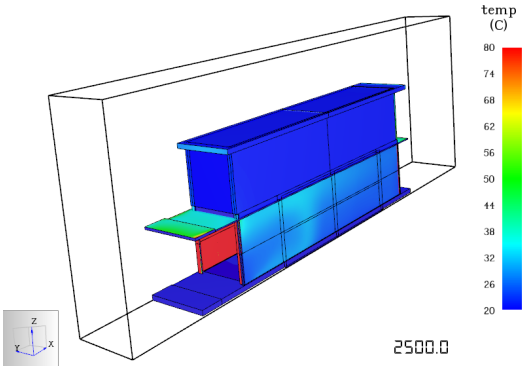
b)


temp
(C)
80
74
68
62
56
50
44
38
32
26
20
2500.0

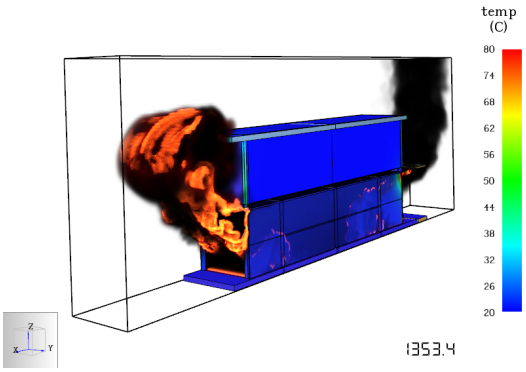
c)


temp
(C)
80
74
68
62
56
50
44
38
32
26
20
1353.4

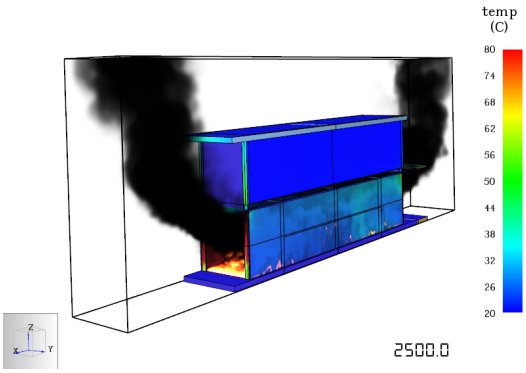
d)


temp
(C)
80
74
68
62
56
50
44
38
32
26
20
2500.0

e)


temp
(C)
80
74
68
62
56
50
44
38
32
26
20
1353.4

f)


temp
(C)
80
74
68
62
56
50
44
38
32
26
20
2500.0

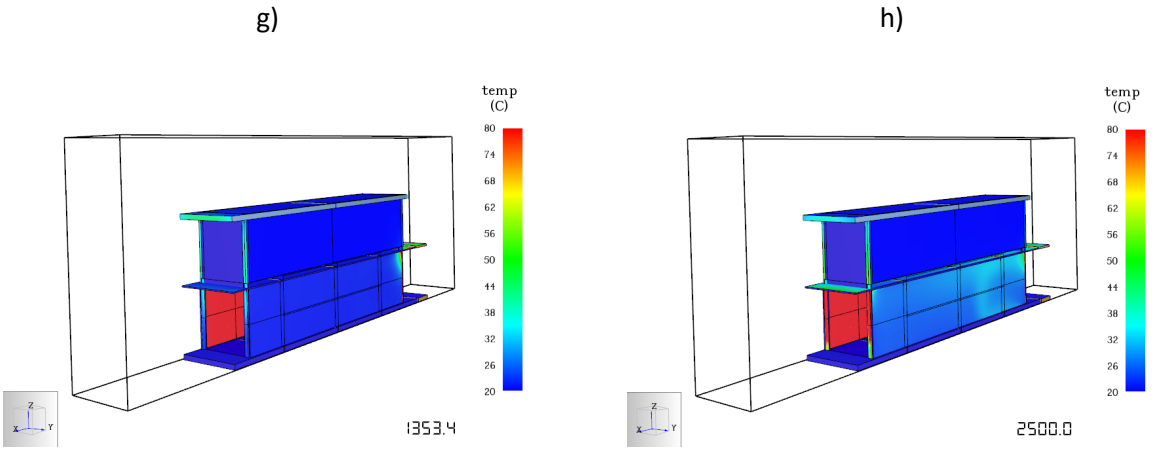


Figura 28. Per a la simulació S_05[0]_E_0P_TT (#1), temperatura a les parets (TempParets) i foc simulat (Foc) just després del moment en què es trenca el vidre de la dreta (1353.4 s) i just abans d'iniciar-se l'etapa de decaïment de l'incendi (2500 s) amb una perspectiva del mòdul que permet veure els vidres de l'esquerra (passera) (E) i els de la dreta (balcó) (D): a) Foc+1353.4 s+E; b) Foc+2500 s+E; c) TempParets+1353.4 s+E; d) TempParets+2500 s+E; e) Foc+1353.4 s+D; f) Foc+2500 s+D; g) TempParets+1353.4 s+D; h) TempParets+2500 s+D.

5.5 Evolució de la temperatura a l'interior de les parets i efecte sobre la resistència estructural

L'efecte de la temperatura sobre la resistència estructural del contenidor s'analitza en detall a l'apartat 6. Nogensmenys, aquí s'aprofita la capacitat del simulador FDS per proporcionar l'evolució de la temperatura a l'interior de les parets per tenir una primera aproximació del que es pot esperar que succeeixi en l'anàlisi detallada (FDS no és un programari pensat per a l'anàlisi estructural i per tant els resultats que se'n deriven respecte el detall de la temperatura a l'interior de les parets són només orientatius).

L'evolució de la temperatura a través de la paret del mòdul simple es presenta a la Figura 29 per a dues simulacions realitzades amb el mòdul individual (S_05[0]_E_0P_TT (#1) i S_05[-1]_E_0P_TT (#2)) i per a una simulació realitzada amb el mòdul doble (S_10+05[-2]_E_1P_TT (#6)). Es presenten els resultats obtinguts per als dispositius PROF 44 i PROF 46, respectivament. Aquests dispositius estan situats en una cantonada, al sostre (vegeu la Figura 15 i la Figura 17, respectivament).

Es pot observar que la temperatura a la superfície de la paret en contacte amb el foc assoleix temperatures elevades, tal i com ja s'havia vist a les figures de la temperatura de la paret. Ara bé, la temperatura que s'assoleix a la cara contrària, on el material definit és l'acer, no supera els 100°C en cap cas; és a dir, les parets d'acer del mòdul no assolirien temperatures per sobre dels 400°C, que és quan les estructures metàl·liques perden propietats [12].

Si es comparen les figures a i b de la Figura 29, s'observa que l'evolució de la temperatura en un punt situat just després de la primera capa de material aïllant (Diamant) és diferent en funció de

si l'escenari té a continuació un gruix de material Tallafoc DF de 30 mm (Figura 29a) o de 15 mm (Figura 29b). Quan hi ha menys material aïllant la temperatura interior tarda més en disminuir i assoleix valors màxims superiors.

D'altra banda, a la Figura 29c es pot veure que la temperatura en un punt situat just després de la primera i única capa Tallafoc DF assoleix valors més elevats que en el cas de tenir més capes de material aïllant. Tanmateix, la temperatura a l'extrem oposat (on hi ha l'acer) tampoc supera els 100°C.

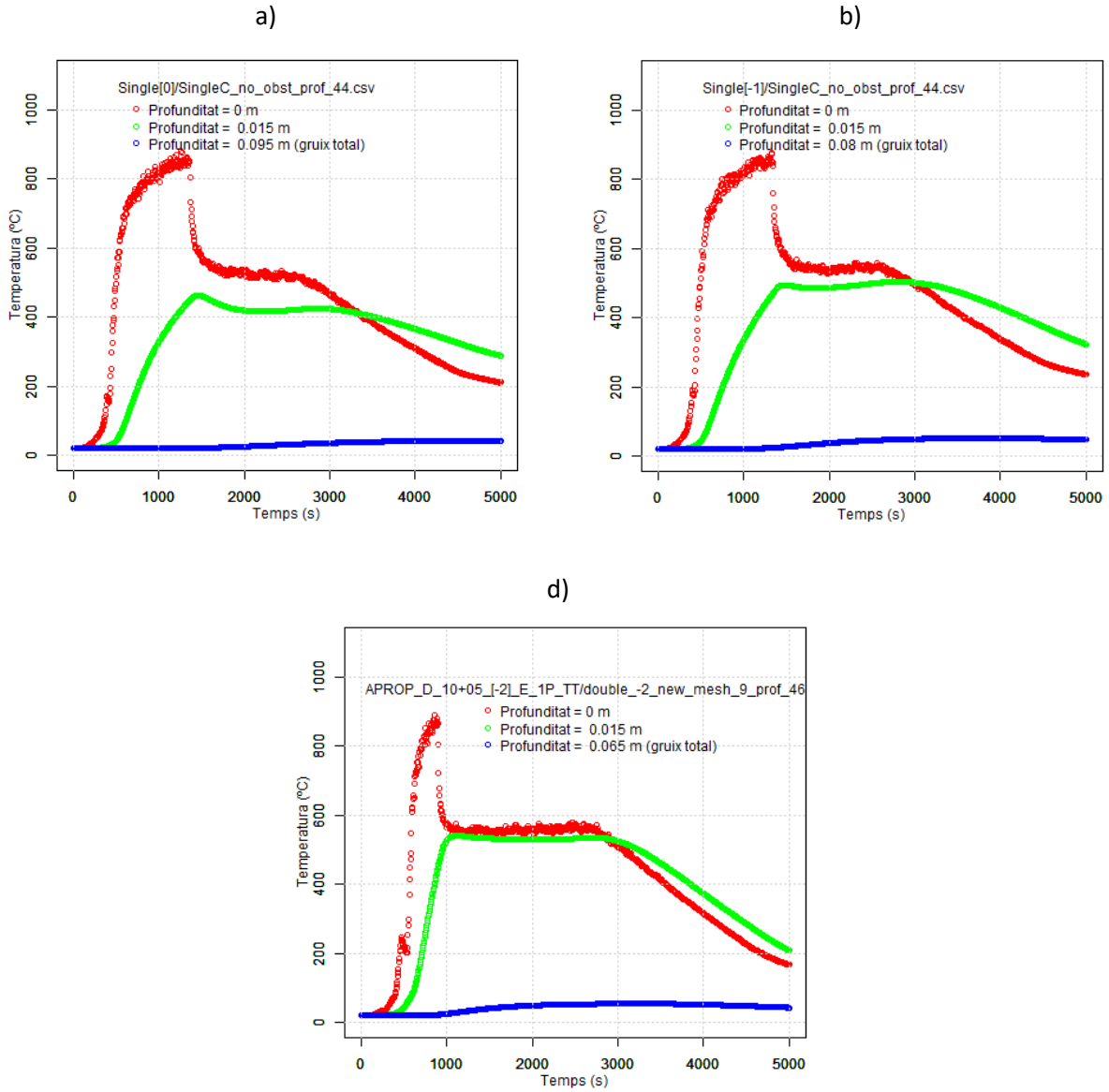


Figura 29. Evolució de la temperatura a través de la paret (sostre) per als dispositius PROF44 (mòdul simple) i PROF46 (mòdul doble): a) Escenari S_05[0]_E_0P_TT (#1); b) S_05[-1]_E_0P_TT (#2); c) D_10+05[-2]_E_0P_TT (#6).

5.6 Efecte de la càrrega de foc

Si es tenen en compte les gràfiques de l'evolució de la temperatura, es pot interpretar que una càrrega de foc de 948 MJ/m^2 no suposaria un increment de la temperatura del gas, ja que el gas té una temperatura estable al final de la fase d'incendi desenvolupat (vegeu les Figures 20, 22, 24 i 25). Pel que fa a les temperatures registrades a les parets/sostre, que són els elements que es van escalfant en funció del temps, a les Figures 21 i 23 s'observa que la temperatura, al final de la fase d'incendi desenvolupat, està seguint una tendència creixent en algunes zones del mòdul (Figura 21 a, b i c; Figura 23 a, b i c). Ara bé, el pendent creixent que s'observa és només de 0,04-0,08°C/s, per la qual cosa, si tenim en compte la diferència de temps entre el final de la fase d'incendi desenvolupat per a les corbes d'incendi de la Figura 8 (Δt = 470 s), el fet d'incrementar lleugerament la càrrega de foc (de 790 a 948 MJ/m^2) implicaria un canvi de menys de 40°C en l'increment de temperatura a la paret. Ara bé, això repercutiria sobre les temperatures de l'acer. Tal i com es pot veure als resultats de l'apartat 6.3.10, en aquest cas es podrien arribar a assolir temperatures màximes de 318°C als 83 min.

6 Estudi termomecànic de la protecció amb plaques Pladur FOC 15+15 mm de la xapa nervada d'acer

La protecció estructural del contenidor enfront de l'acció de l'incendi es basa amb el sistema Pladur FOC, composat de dues plaques de guix laminat reforçat amb fibres de vidre i que és un producte especialment adequat per a la protecció al foc. El gruix nominal de cadascuna de les plaques és de 15 mm i segueix l'esquema de muntatge que mostra la Figura 30 [13]. L'empresa Pladur Gypsum S.A.U és el fabricant d'aquest sistema. Aquest sistema té disponibles els assaigs a foc ISO834 segons normatives europees [14] [15] i que seran utilitzats al present estudi.

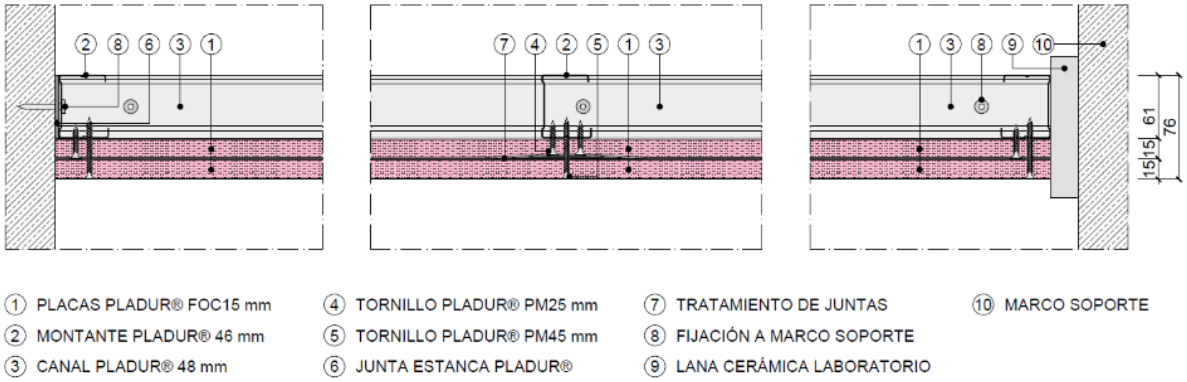


Figura 30. La protecció tèrmica escollida es basa amb els sistema Pladur FOC 15+15 mm Cal remarcar el muntatge de les plaques al portell o decalades per evitar la coincidència dels extrems de les dues plaques.

A més, el sistema es complementarà amb unes làmines de llana de roca estàndard, amb un gruix aproximat de 50 mm i densitat 80 g/m^3, que estaran ubicades entre la xapa nervada i les plaques aprofitant l'espai ocupat pels perfils metàl·lics de muntatge. L'estudi contempla la possibilitat desfavorable que aquesta llana de roca no existeixi localment, per exemple per estar ocupat aquest espai per les instal·lacions. També és la situació d'alguns perfils estructurals del contenidor que per raons de muntatge només estiguin recoberts exclusivament per les dues plaques de Pladur FOC.

6.1 El sistema estructural i les accions mecàniques en situació d'incendi

Un contenidor marítim està dissenyat originalment pel transport estandarditzat de productes de tipus indeterminat. Un cop carregats els productes al seu interior, el contenidor queda tancat fermament i és comporta com una caixa compacta sense obertures durant el transport.

Aquest contenidor estructural d'acer està compost d'un esquelet ortogonal de barres i d'uns tancaments perimetrals de xapa nervada que proporcionen una rigidització no menystenible enfront de la distorsió angular de l'entramat ortogonal de barres.

Des del punt de vista estructural, hi ha dos tipus d'elements bàsics a considerar:

1) Element barra de directriu recta i secció constant. A la pràctica, són tubs d'acer laminats en fred o calent, i perfils oberts obtinguts mitjançant plegadora. A destacar els 4 puntals de cantonada, veure Figura 31, i els seus extrems de connexió (corner fitting)
2) Element placa ortòtropa. On la xapa nervada té una rigidesa important en la direcció longitudinal dels nervis però a la direcció perpendicular quasi es comporta com una simple xapa plana de petit gruix. Són elements importants per assegurar el monolitisme del contenidor

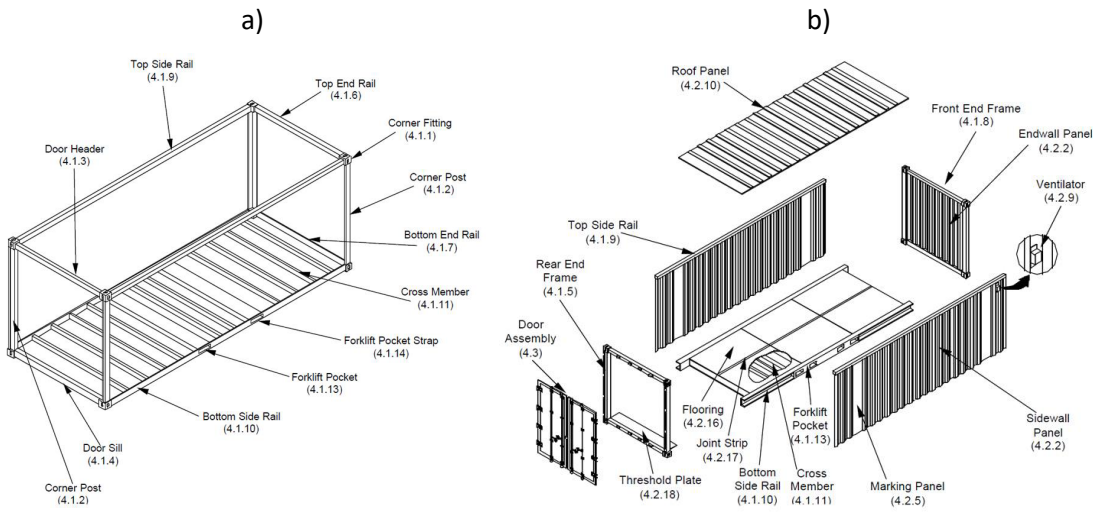


Figura 31. Contenidor marítim estàndard a) Element barra de directriu recta b) Element placa ortòtropa.

Durant el seu ús habitual, el contenidor marítim està sotmès a unes càrregues estàtiques i dinàmiques importants, segons els requisits normatius definits a la norma ISO 1496-1:2013 *Series 1 freight containers -- Specification and testing -- Part 1: General cargo containers for general purposes* [16].

Pel cas dels contenidors estàndards de 40´ de longitud, aproximadament 12 metres, emprats al projecte APROP, les característiques més habituals s'indiquen a la Taula 6 però poden variar segons el fabricant

Taula 6. Característiques dels contenidors estàndard de 40'.

Tara	3.750 kg
Càrrega màxima	29.000 kg (segons model)
Mides internes:	
Llargada	12.032 mm
Amplada	2.352 mm
Altura	2.393 mm

Així, en primera instància, un contenidor podria suportar una sobrecàrrega màxima d'aproximadament 10,00 kN/m^2, valor força superior al que es demanaria normativament per a la seva reutilització com a un habitatge convencional. Ara bé, les característiques intrínseques del projecte APROP demanen una anàlisi estructural específica que es comenta a continuació.

6.1.1 *Anàlisi estructural del projecte APROP a temperatura ambient*

Una anàlisi exacta del comportament estructural d'un conjunt apilat de contenidors comportaria l'ús d'un modelat tridimensional amb elements finits làmina o, alternativament, mitjançant una combinació de models de barra i làmina ortòtropa equivalent.

És una feina complexa, on el col·lapse dels elements làmina és per abonyegament local, i en el cas de les barres és per plastificació o vinclament. En definitiva, una anàlisi geomètricament no lineal. A més, cal indicar que l'aplicació simple d'una normativa convencional no seria trivial.

Aquesta reutilització dels contenidors com habitatge implica unes sobrecàrregues d'ús més reduïdes que les originals (veure 6.1.2) però obliga a considerar l'efecte negatiu d'obertura de forats al contenidor i l'eliminació de la porta d'accés. Hi ha una pèrdua de monolitisme i rigidesa que cal avaluar convenientment.

L'anàlisi estructural del projecte APROP a temperatura ambient ha estat efectuat per Romà Crespiera i Eduard Simó de l'oficina Crespiera Simó Diagonal Arquitectura SLP (Barcelona) [17].

De forma pragmàtica, aquests consultors d'estructures decideixen que les xapes laterals s'han de modelitzar triangulant amb barres per simular la funció estructural que tenen. És a dir, la xapa nervada dels contenidors és substituïda per un tirants formant una tipologia estructural de creus de sant Andreu, com mostra la Figura 32.

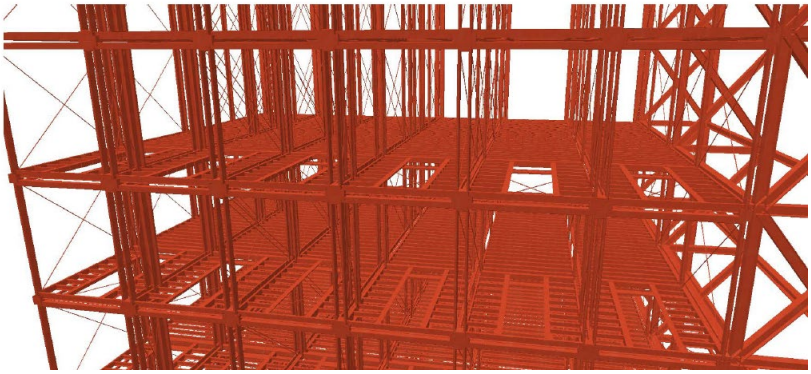


Figura 32. Modelització estructural i verificació a temperatura ambient per part de Crespiera Simó Diagonal Arquitectura SLP [17]. La xapa nervada dels contenidors és substituïda per un tirants formant una tipologia estructural en creus de sant Andreu.

A conseqüència dels resultats de l'anàlisi estructural els consultors també van decidir reforçar alguns perfils [17], ja que no complien la verificació a vinclament de la normativa CTE-DB_SE A [18].

Queda fora d'aquest informe UPC la validació dels càlculs efectuats per Crespiera Simó Diagonal Arquitectura SLP a temperatura ambient [17]. Se suposarà que són correctes i adaptats a la normativa espanyola CTE DB-SE A [18] que els consultors han considerat escaient d'aplicació en aquest cas.

6.1.2 *Afectació de les propietats mecàniques de l'acer degut a l'increment de temperatura*

Se suposarà que el càlcul estructural en situació ordinària (temperatura ambient) està correctament realitzat [17]. Sortint d'aquesta premissa bàsica s'estudia la situació accidental d'incendi a l'estructura.

Així, el present estudi no té com a objectiu una anàlisi estructural específica ni la determinació de l'evolució front d'una situació accidental d'incendi fins arribar al col·lapse de l'estructura dels contenidors. El que farà és avaluar convenientment l'afectació del material acer degut a l'augment de la temperatura durant l'incendi obtinguda mitjançant una simulació tèrmica del problema en règim transitori.

De forma conservadora, en el present treball es comprovarà detalladament que l'afectació de la temperatura sobre l'acer és molt baixa, arribant a la conclusió que no altera significativament les seves propietats mecàniques bàsiques des del punt de vista estructural:

1) La tensió de límit elàstic de material; f_y [N/mm^2]. Necessària per a les verificacions resistents de les barres i xapes
2) El mòdul d'elasticitat longitudinal; E [N/mm^2]. Necessari per a les verificacions de les inestabilitats dels elements. Concretament, la verificació del fenomen del vinclament de les barres i de l'abonyegament de les plaques

L'acer emprat a la fabricació dels contenidors d'APROP no estarà sempre perfectament definit però habitualment són acers de bona qualitat, d'alt límit elàstic i en alguns casos del tipus corten. Per exemple, és un acer ASTM A572 amb tensió de fluència f_y= 47.000 psi (324 N/mm^2) i que es podria assimilar aproximadament a l'acer normalitzat europeu S355 respecte a l'afectació de les propietats termomecàniques en funció de la temperatura.

No és un aspecte crític, ja que les variacions percentuals d'aquestes propietats són bastant insensibles a l'aliatge pel cas d'un acer al carboni. Així, altres acers com el SCW480, tindrien un comportament similar.

La normativa Eurocodi 3, a la seva part 1.3 UNE-EN 1993-1-2 [19], avalua la pèrdua de les propietats mecàniques de l'acer en funció de la temperatura (taula 3.1 de [19]) segons mostra la Figura 33.

Observant les dades, sembla raonable que fins una temperatura de **300 °C** no hi haurà una afectació significativa sobre les propietats mecàniques de l'acer. Concretament, una disminució pràcticament nul·la de la tensió de límit elàstica efectiva, ja que $K_{y,\theta}$ = 1,0. Per contra, el mòdul d'elasticitat longitudinal queda reduït pel factor $K_{E,\theta}$ = 0,8.

Tabla 3.1 – Coeficientes de reducción para la relación tensión-deformación del acero al carbono a temperaturas elevadas

Temperatura del acero θ_a	Coeficientes de reducción a temperatura θ_a respecto al valor de f_y o E_a a 20 °C		
	Coeficiente de reducción (respecto a f_y) para el límite elástico eficaz $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Coeficiente de reducción (respecto a f_y) para el límite de proporcionalidad $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Coeficiente de reducción (respecto a E_a) para la pendiente de la región elástica lineal $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1 000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1 100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1 200 °C	0,000	0,0000	0,0000
NOTA Puede emplearse una interpolación lineal para valores intermedios de temperatura del acero.			

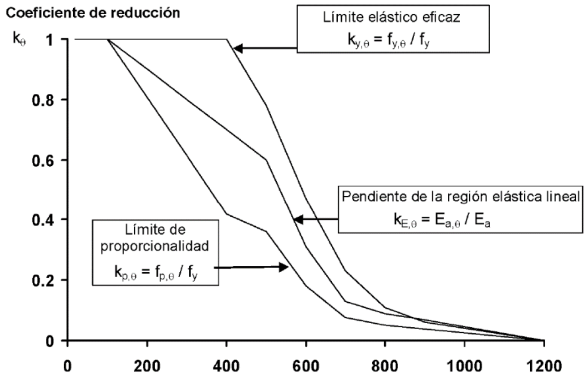


Figura 33. Afectació de les propietats mecàniques de l'acer degut a l'augment de temperatura durant un incendi.

Ara bé, en una situació accidental d'incendi els coeficients de majoració de les càrregues, γ, i els coeficients de simultaneïtat, ψ, tenen uns valors reduïts respecte als emprats a temperatura ambient.

Per exemple, si es consideren exclusivament les càrregues gravitatòries i s'utilitzen els valors definits per Crespiera Simó Diagonal Arquitectura SLP [17], l'anomenat coeficient de reducció de càrregues sobre l'estructura en situació d'incendi, η_{fi}, segons l'apartat 2.4.2 (3) d'Eurocodi 3 UNE-EN 1993-1-2 [19] (vegeu també la Figura 34), es pot avaluar de la forma següent:

- Pes propi del contenidor: 37,60 kN, és a dir equivalent a 1,25 kN/m2
- Sobrecàrrega d'ús: 2,00 kN/m^2
- Envans i paviments: 1,50 kN/m^2

Tabla 4.2 Coeficientes de simultaneidad (ψ)

	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecarga superficial de uso (Categorías según DB-SE-AE)			
• Zonas residenciales (Categoría A)	0,7	0,5	0,3
• Zonas administrativas(Categoría B)	0,7	0,5	0,3
• Zonas destinadas al público (Categoría C)	0,7	0,7	0,6
• Zonas comerciales (Categoría D)	0,7	0,7	0,6
• Zonas de tráfico y de aparcamiento de vehículos ligeros con un peso total inferior a 30 kN (Categoría F)	0,7	0,7	0,6
• Cubiertas transitables (Categoría G)		(1)	
• Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento (Categoría H)	0	0	0
Nieve			
• para altitudes > 1000 m	0,7	0,5	0,2
• para altitudes ≤ 1000 m	0,5	0,2	0
Viento	0,6	0,5	0
Temperatura	0,6	0,5	0
Acciones variables del terreno	0,7	0,7	0,7

Figura 34. Coeficients de simultaneïtat (segons Taula 4.2 de l'apartat 2.4.2 (3) d'Eurocodi 3 UNE-EN 1993-1-2 [19])

Així, el coeficient de reducció de càrregues sobre l'estructura en situació d'incendi:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} \cdot Q_k}{\gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k} = \frac{(1{,}25 + 1{,}50)\frac{kN}{m^2} + 0{,}5 \cdot 2{,}00\frac{kN}{m^2}}{1{,}35 \cdot (1{,}25 + 1{,}50)\frac{kN}{m^2} + 1{,}5 \cdot 2{,}00\frac{kN}{m^2}} = \mathbf{0{,}56}$$

Això significa que en situació d'incendi la combinació de càrregues permanents i sobrecàrrega d'ús estarà reduïda al 56% del valor de càlcul en situació ordinària.

Al mateix resultat s'arriba utilitzant el nomograma de la Fig. 2.1 disponible al mateix apartat 2.4.2 (3) d'Eurocodi 3 Part 1-2 [19] (vegeu la Figura 35), on Q_k /G_k = 2,00/(1,25/1,50) = 0,73 i dóna també η_{fi}= 0,56.

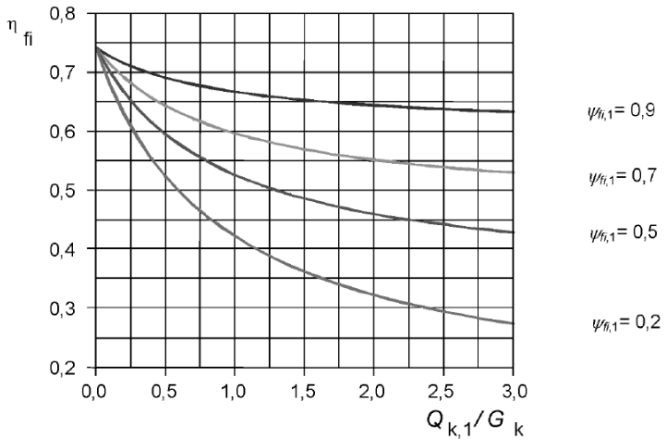


Figura 2.1 – Variación del coeficiente de reducción η_{fi} con la relación de carga $Q_{k,1}/G_k$

Figura 35. Nomograma pel càlcul del coeficient de reducció de càrregues sobre l'estructura (corresponent a la Fig 2.1 de l'apartat 2.4.2 (3) d'Eurocodi 3 Part 1-2 [19]).

Finalment, una altra referència rellevant es troba al mateix Eurocodi 3 Part 1-2 [19], respecte al cas dels perfils prims, anomenades també seccions Classe 4, que majoritàriament són els elements estructurals del contenidor ja que tenen un gruix entre els 1,5 a 4 mm, per exemple els tubs rectangulars, els perfils conformats i la xapa nervada. Així, al seu apartat, 4.2.3.6, es contempla que per sota d'una temperatura de **350 °C** es compleix la verificació resistent de l'element, sense més consideracions (vegeu la Figura 36).

EN 1993-1-2:2005 - 40 - AENOR

4.2.3.6 Elementos con secciones transversales de clase 4

(1) Para elementos con secciones transversales de clase 4 que no sean elementos sometidos a tracción, puede considerarse que el punto (1) del apartado 4.2.1 se cumple si, en el instante t, la temperatura del acero θ_a en todas las secciones transversales no supera la temperatura θ_{crit}.

NOTA 1 Para más información, véase el anexo E.

NOTA 2 El límite θ_{crit} puede seleccionarse en el anexo nacional. Se recomienda el valor θ_{crit} = 350 °C.

Figura 36. Referència als perfils prims que es pot trobar a l'Eurocodi 3.

Altrament, l'apartat 4.2.1 és justament la verificació general resistent de l'Eurocodi (Figura 37).

4.2 Modelos de cálculo simplificados

4.2.1 Generalidades

(1)P Se debe suponer que la función portante de un elemento de acero se mantiene en una situación de incendio determinada después de un instante t si:

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t} \quad (4.1)$$

donde

$E_{fi,d}$ es el valor de cálculo del efecto de las acciones para el dimensionamiento en la situación de incendio, de acuerdo con la Norma EN 1991-1-2;

$R_{fi,d,t}$ es el valor de cálculo de la resistencia correspondiente del elemento de acero, para el dimensionamiento en la situación de incendio en el instante t.

Figura 37. Verificació general resistent que es pot trobar a l'Eurocodi 3.

En conclusió, si la temperatura de l'acer està per sota d'aproximadament 300-350°C durant l'evolució de l'incendi (ISO834 i foc natural), la correcta verificació a temperatura ambient continuarà essent vàlida a la situació accidental d'incendi.

6.2 Accions tèrmiques en situació d'incendi

S'ha modelat la geometria corresponent a la xapa nervada d'acer del contenidor corresponent al cas de la paret simple i també de la paret doble, anomenades Divisió TIPUS 1 i 2, vegeu la Figura 38.

Per efectuar les simulacions tèrmiques s'ha utilitzat el programa de càlcul estructural Diamonds versió 2020 [2].

S'han considerat totes les possibilitats: existència de només plaques Pladur FOC, cas de plaques Pladur Foc i llana de roca, i en combinació amb l'exposició al foc normalitzat ISO834 (Figura 39) i, a més, la corba de foc més desfavorable procedent de l'estudi amb FDS dels apartats anteriors.

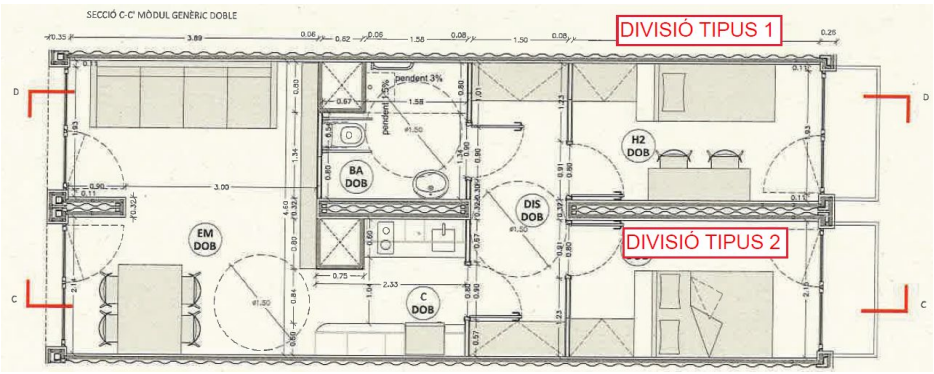


Figura 38. a) Paret simple TIPUS 1 b) Paret doble TIPUS 2

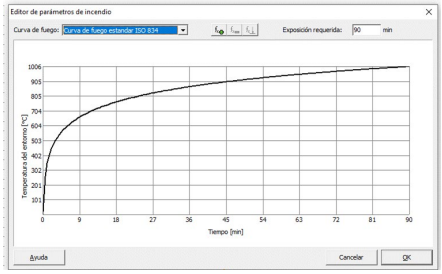


Figura 39. Corba de foc estàndard ISO834 fins els 90 minuts requerits per a la verificació del criteri R90.

Dins el ventall de corbes obtingudes a l'estudi amb FDS se selecciona la més desfavorable (Figura 40), que correspon a l'escenari D_10+05[-2]_E_1P_ET (escenari #8).

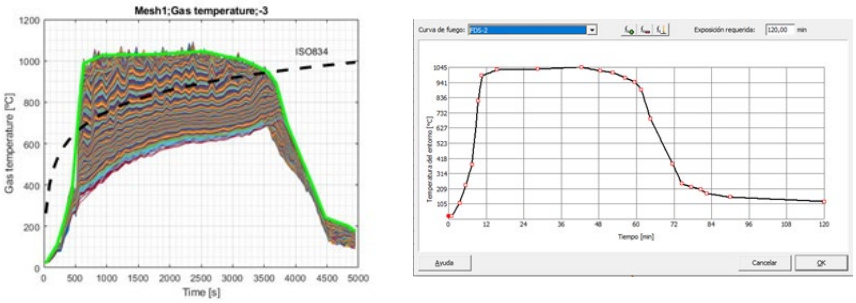


Figura 40. Corba de foc més desfavorable procedent de l'estudi amb FDS.

6.3 Simulació tèrmica de l'evolució de la temperatura sobre la xapa nervada i els aïllaments emprats

Les propietats tèrmiques per l'aïllament de llana de roca són obtingudes de la bibliografia i corresponen a un producte estàndard de baixa densitat de 80 kg/m^3, sense uns requisits especials. La Figura 41 representa la variació de la conductivitat tèrmica [W·m^{-1}·°C^{-1}] i la calor específica [J·kg^{-1}·°C^{-1}] en funció de la temperatura.

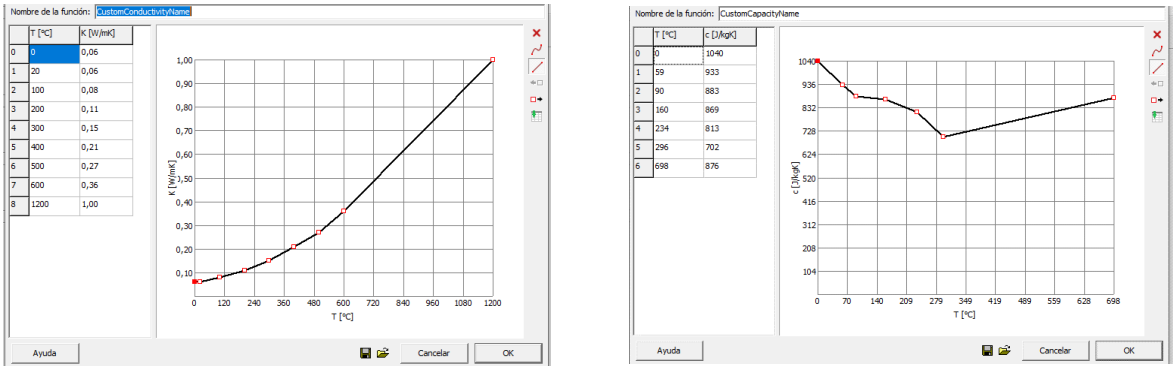


Figura 41. Variació de la conductivitat tèrmica [W·m^{-1}·°C^{-1})] i la calor específica [J·kg^{-1}·°C^{-1}] en funció de la temperatura per un material de llana de roca de densitat 80 kg/m^3

La Figura 42 mostra la ubicació d'aquesta llana de roca entre la xapa nervada d'acer i les plaques de Pladur FOC.

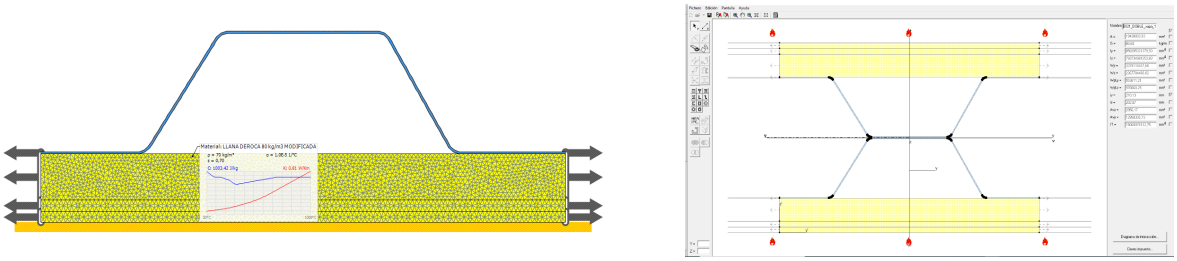


Figura 42. Geometries analitzades en el cas de paret simple i doble. Les línies de simetria són a la vegada línies adiabàtiques definides com a condicions de contorn del problema tèrmic

6.3.1 *Validació inicial de les propietats del material Pladur FOC de 15+15 mm segons els resultats obtinguts en un assaig de laboratori de referència*

L'empresa Paldur Gymsum, fabricant de les plaques de guix laminat i reforçat amb fibres de vidre Pladur FOC, ha subministrat les lectures dels termoparells instal·lats a la cara freda del seu sistema 15+15 mm sotmès a un assaig amb la corba de foc ISO834 [11]. Aquestes dades han permès fer una correcta correlació inicial entre la simulació numèrica i els resultats obtinguts al laboratori, tot permetent la validació de la variació de la conductivitat tèrmica i la calor específica en funció de la temperatura. S'ha comprovat que els resultats obtinguts són similars als disponibles a la bibliografia [20] (vegeu les Figures 43 a 46). Per l'emissivitat es considera un valor de ε = 0,8, tal com apareix recollit a la tesi [20]. Per últim, la densitat del material s'ha considerat de 800 kg/m^3 segons el document tècnic del fabricant.

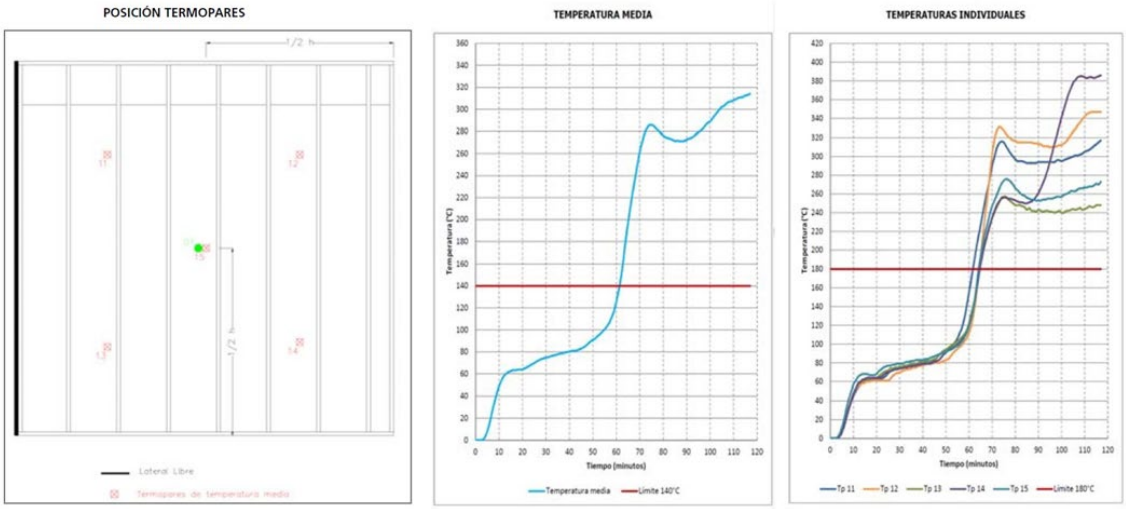


Figura 43. Lectures dels termoparells del sistema Pladur FOC 15+15 mm. Ubicació dels termoparells, les lectures individuals i el valor mig [13]. Són increments de temperatura respecte al valor de referència 20 °C.

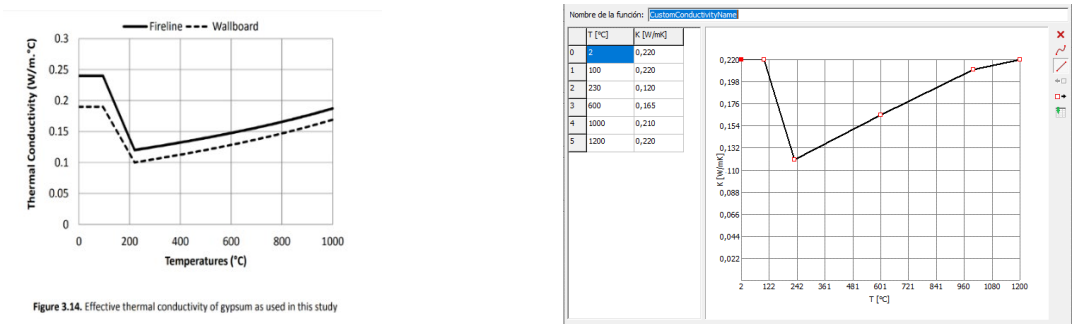


Figura 44. Conductivitat tèrmica [W/(m°C] en funció de la temperatura. Dades de la bibliografia [20] i les utilitzades a la simulació de l'assaig experimental [13]

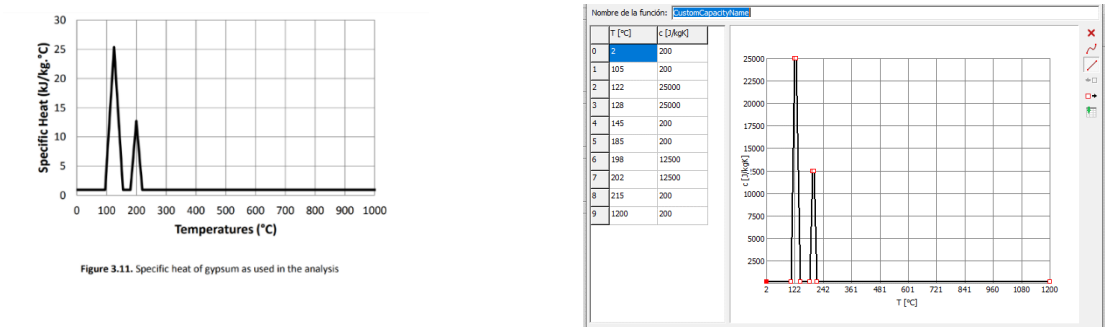


Figura 45. Calor específica [J/(kg°C)] en funció de la temperatura. Dades de la bibliografia [20] i les utilitzades a la simulació de l'assaig experimental [13].

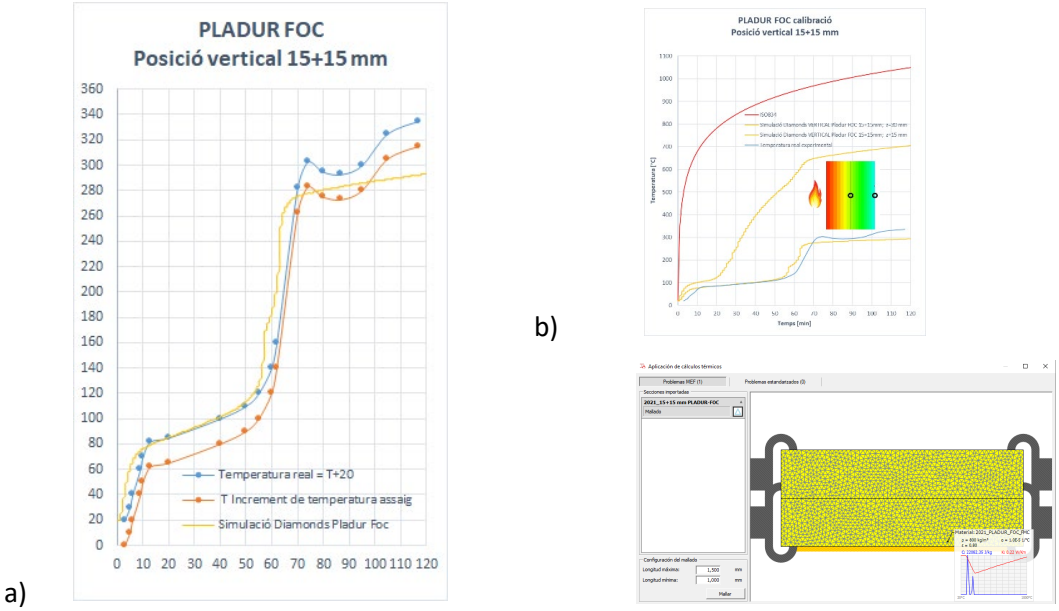


Figura 46. a) Resultat experimental versus el resultat de la simulació, tot incorporant la correcció a temperatura absoluta (+20°C). b) Detall de la malla d'elements finits, mida màxima 1,5 mm de l'element.

6.3.2 *CAS 1. Exposició ISO834 i 2 plaques 15+15 mm*

La Figura 47 mostra els resultats obtinguts pel CAS 1.

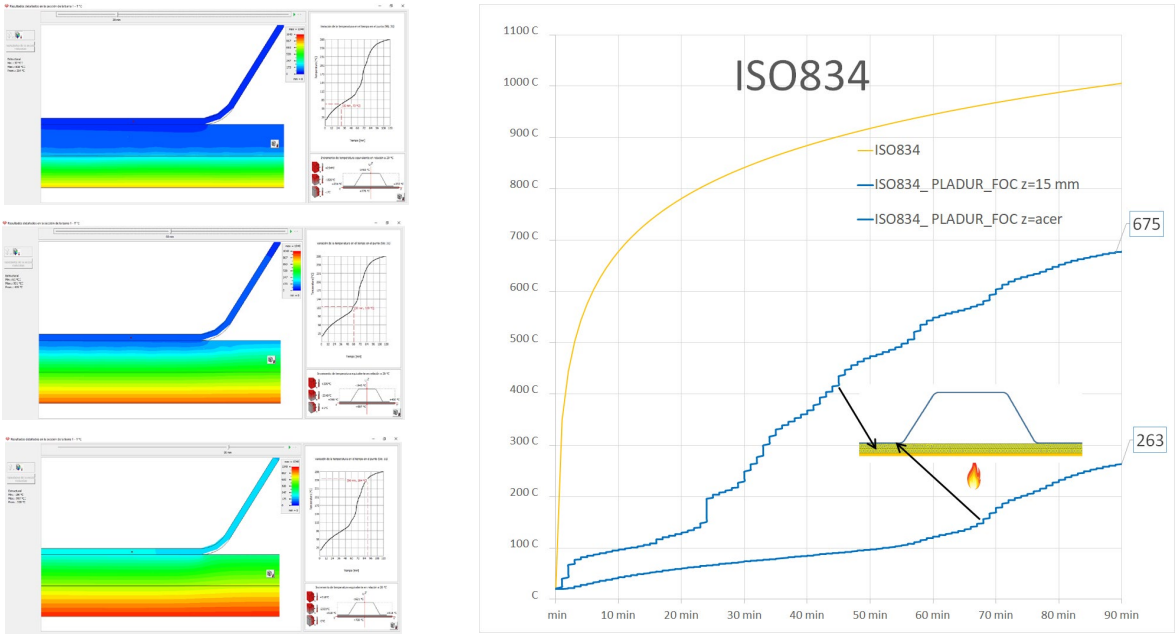


Figura 47. CAS 1. Isotermes a 30, 60 i 90 minuts. Valors concrets a la xapa d'acer i a la interfase entre les dues plaques de Pladur FOC.

6.3.3 *CAS 2. Exposició ISO834, 2 plaques 15+15 mm i llana de roca 80 kg/m³*

La Figura 48 mostra els resultats obtinguts pel CAS 2.

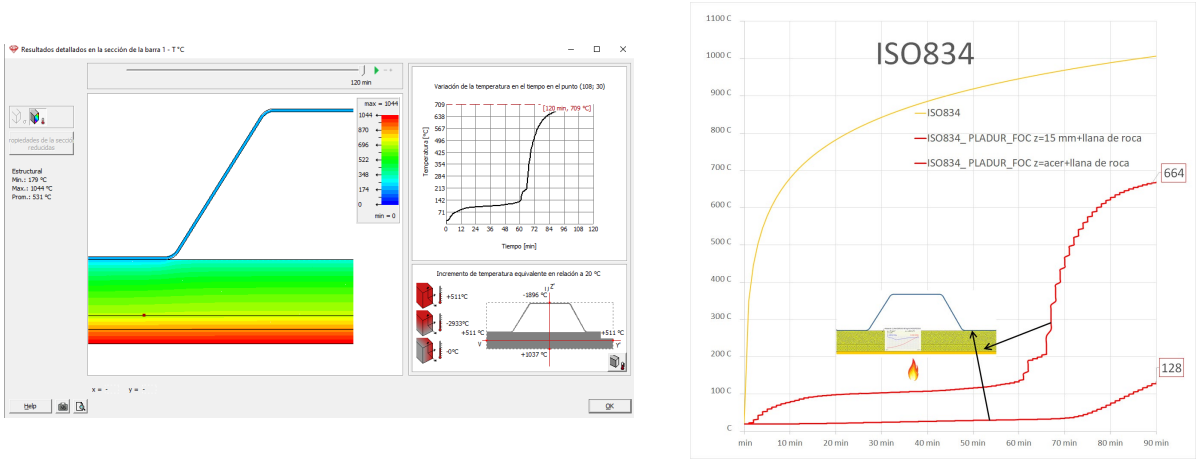


Figura 48. CAS 2. Valors concrets a la xapa d'acer i a la interfase entre les dues plaques de Pladur FOC.

6.3.4 *CAS 3. Exposició foc natural i 2 plaques 15+15 mm*

La Figura 49 mostra els resultats obtinguts pel CAS 3.

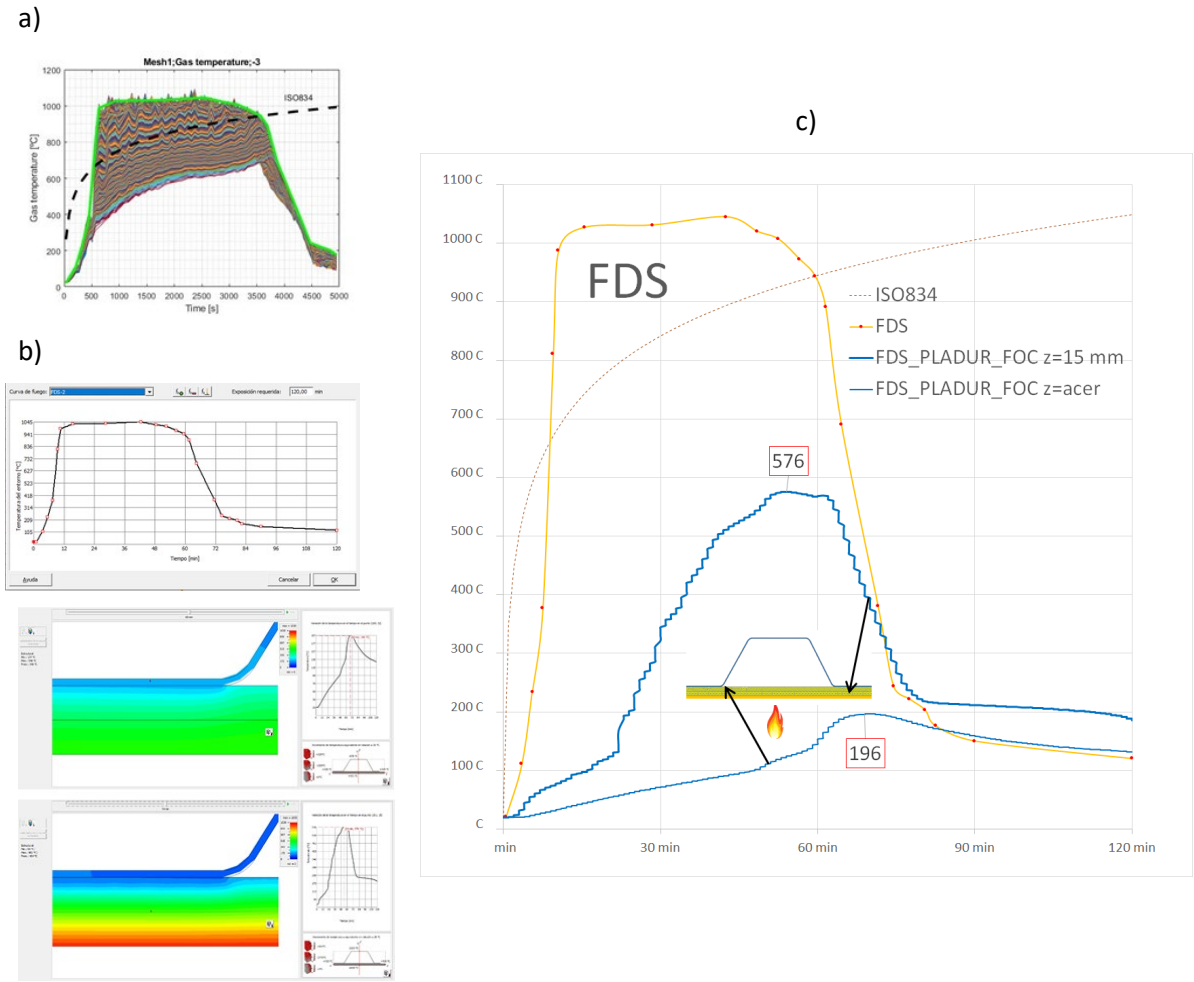


Figura 49. CAS 3. a) Corbes de foc procedents de FDS, b) Corba de foc introduïda a Diamonds, c) Evolució de les isotermes i valors per a dos punts: z=0 (xapa d'acer) z=15mm (interfase entre les plaques).

6.3.5 *CAS 4. Exposició foc natural, 2 plaques 15+15 mm i llana de roca 80 kg/m³*

La Figura 50 mostra els resultats obtinguts pel CAS 4.

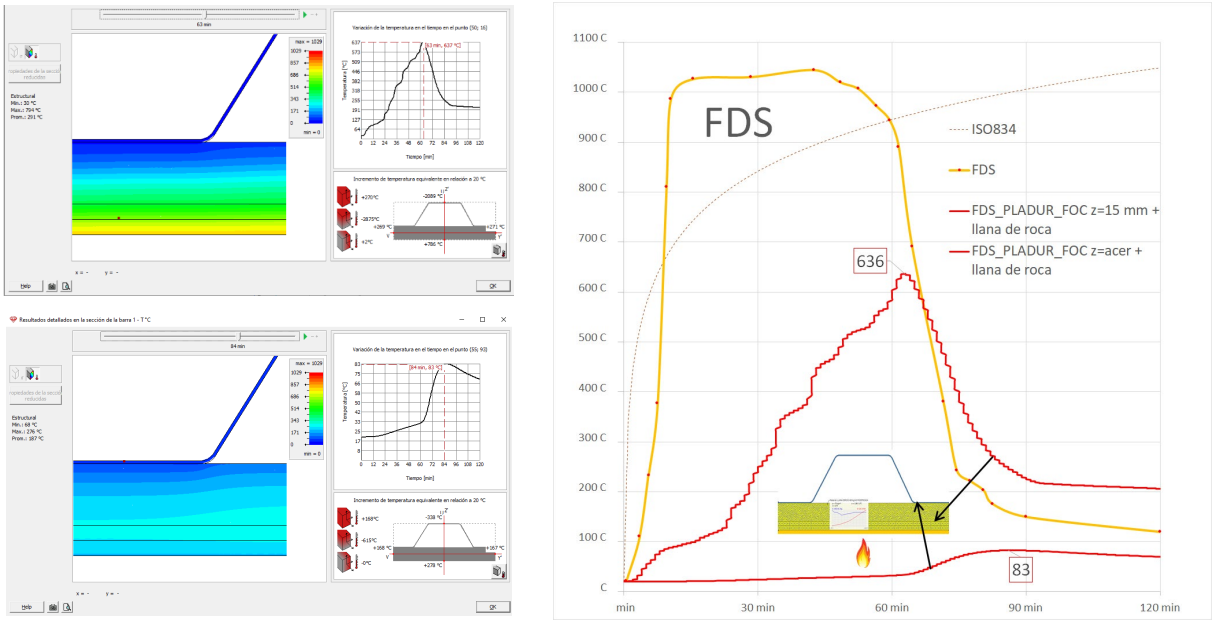


Figura 50. CAS 4. Evolució de les isotermes i valors per a dos punts:. z=0 (xapa d'acer) z=15mm (interfase entre les plaques).

6.3.6 *CAS 5. Mòdul doble. Exposició ISO834 i 2 plaques 15+15 mm*

La Figura 51 mostra els resultats obtinguts pel CAS 5.

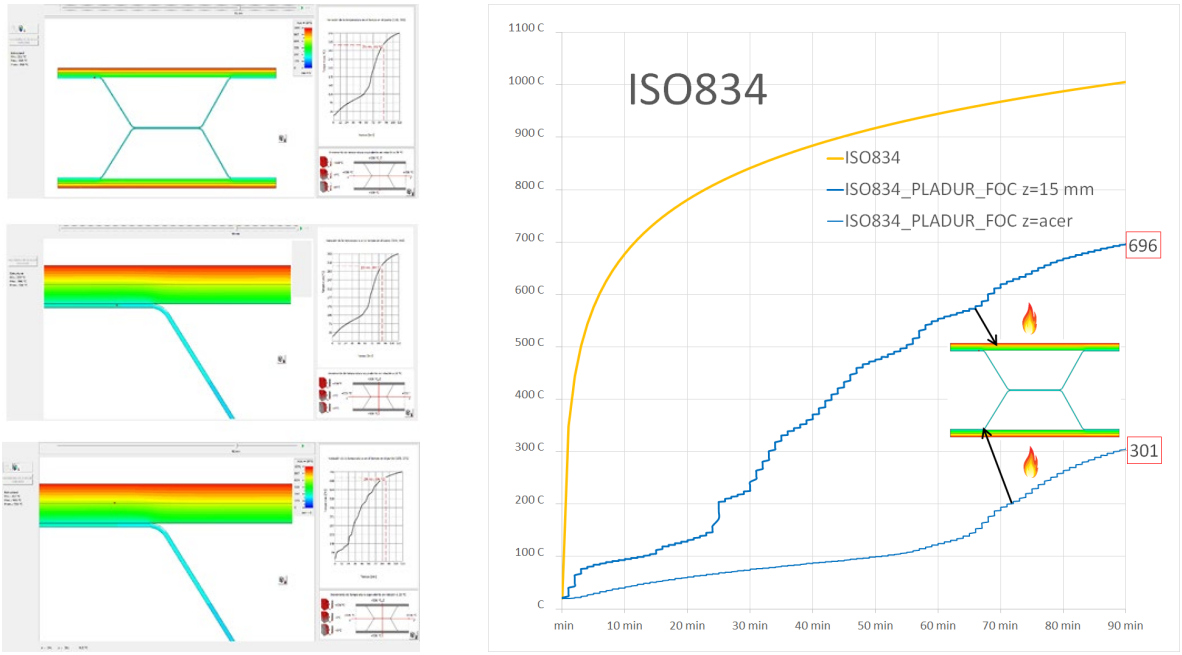


Figura 51. CAS 5. Valor màxim de la temperatura per a l'acer és 301°C als 90 minuts d'exposició ISO834.

6.3.7 *CAS 6. Mòdul doble. Exposició ISO834, 2 plaques 15+15 mm i llana de roca 80 kg/m³*

La Figura 52 mostra els resultats obtinguts en el CAS 6

.

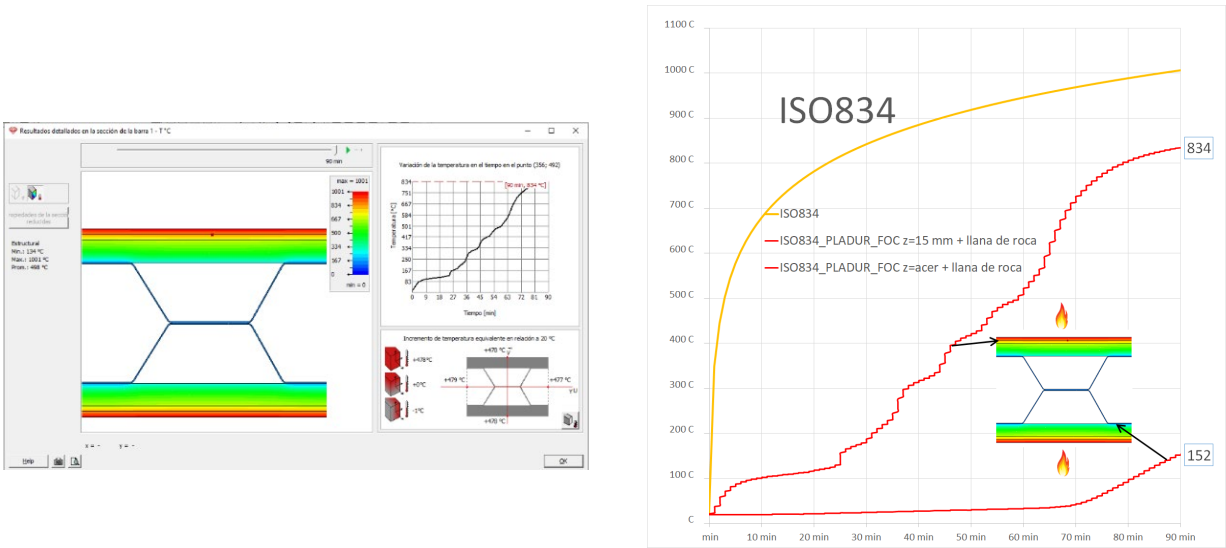


Figura 52. CAS 6. Valors concrets a la xapa d'acer i a la interfase entre les dues plaques de Pladur FOC.

6.3.8 *CAS 7. Mòdul doble. Exposició foc natural i 2 plaques 15+15 mm*

La Figura 53 mostra els resultats obtinguts pel CAS 7.

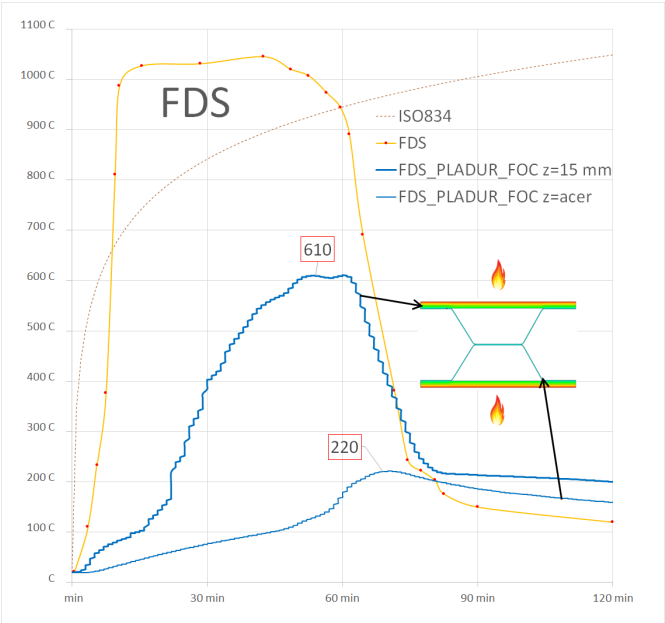


Figura 53. CAS 7. Valors concrets a la xapa d'acer i a la interfase entre les dues plaques de Pladur FOC.

6.3.9 *CAS 8. Mòdul doble. Exposició foc natural, 2 plaques 15+15 mm i llana de roca 80 kg/m³*

La Figura 54 mostra els resultats obtinguts en el CAS 8.

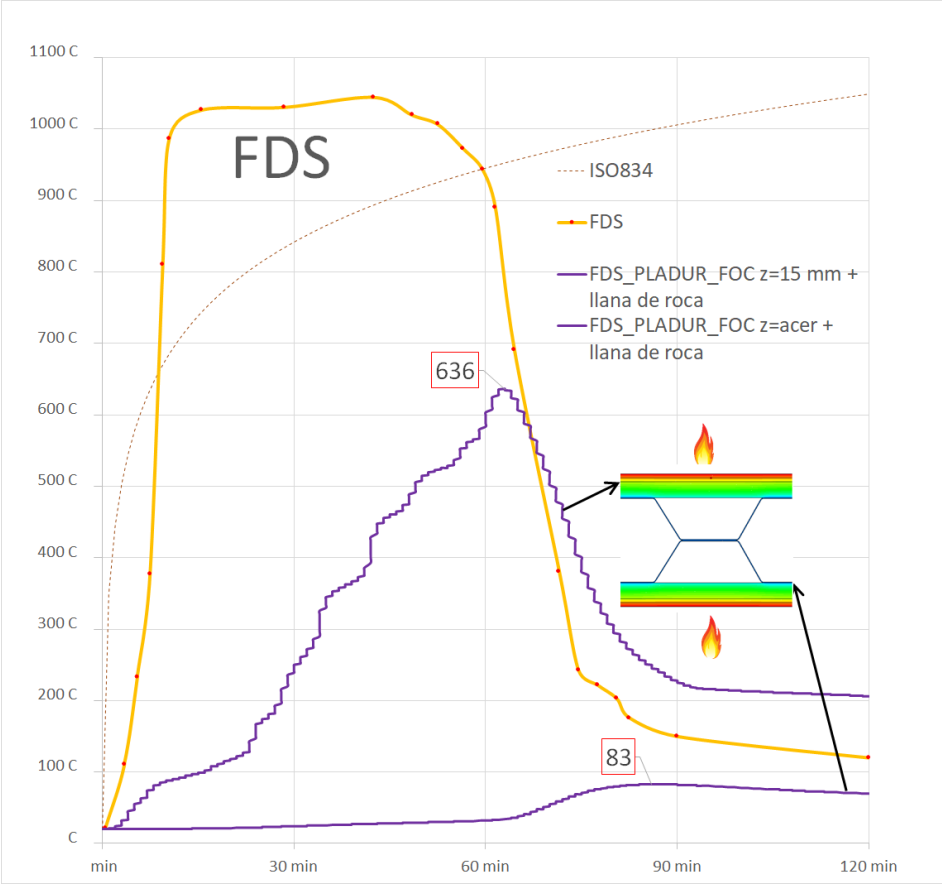


Figura 54. CAS 8. Valors concrets a la xapa d'acer i a la interfase entre les dues plaques de Pladur FOC.

6.3.10 *CAS 9. Mòdul doble. Exposició foc natural amb càrrega de foc 948 MJ/m², 2 plaques 15+15 mm*

La Figura 55 mostra els resultats obtinguts en el CAS 9. Constitueix un cas extrem amb una càrrega de foc força elevada de valor 948 MJ/m². A més es suposa que no existeix l'aïllament de la llana de roca.

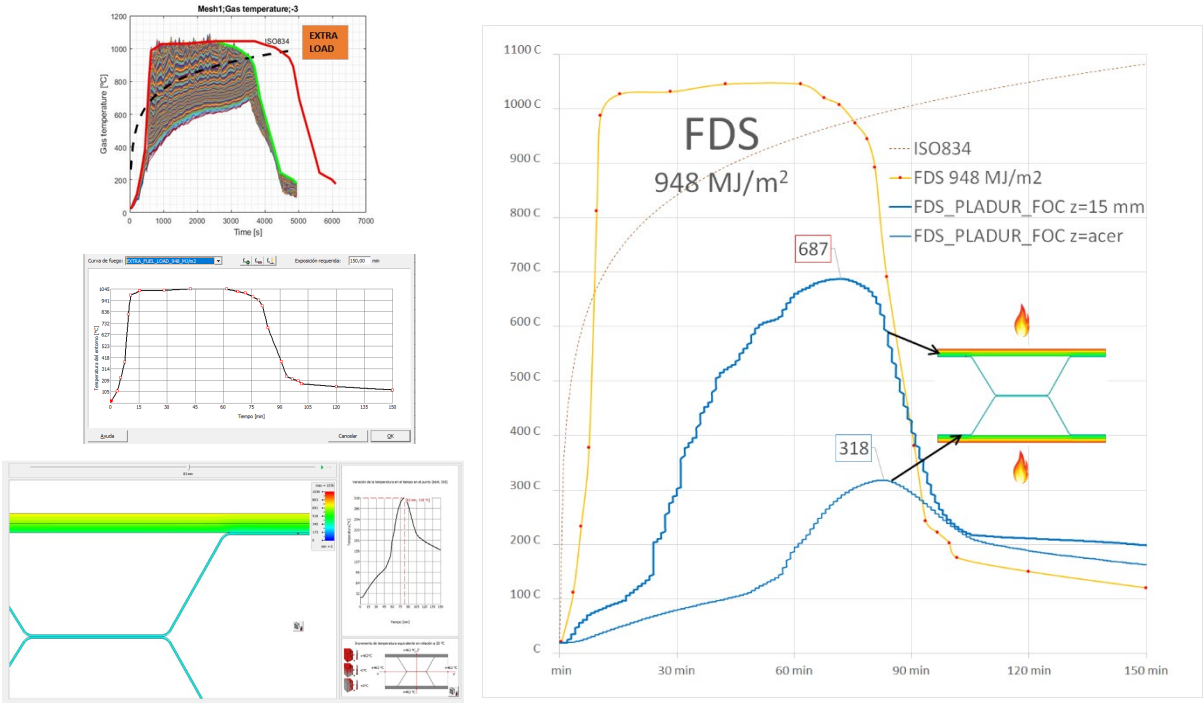


Figura 55. CAS 9. Valors concrets a la xapa d'acer i a la interfase entre les dues plaques de Pladur FOC.

6.4 Resultats finals de l'estudi termomecànic

A la Taula 7 s'exposen els resultats obtinguts als apartats precedents.

Taula 7. Resultats finals obtinguts en l'estudi termomecànic pels diferents casos analitzats.

CAS	Geometria	Corba de foc	Temperatura màx. a l'acer
CAS 1	Paret simple, Pladur 15+15 mm	ISO834	263°C
CAS 2	Paret simple, Pladur 15+15 mm, llana de roca	ISO834	128°C
CAS 3	Paret simple, Pladur 15+15 mm	FDS	196°C
CAS 4	Paret simple, Pladur 15+15 mm, llana de roca	FDS	83°C
CAS 5	Paret doble, Pladur 15+15 mm	ISO834	**301°C**
CAS 6	Paret doble, Pladur 15+15 mm, llana de roca	ISO834	152°C
CAS 7	Paret doble, Pladur 15+15 mm	FDS	220°C
CAS 8	Paret doble, Pladur 15+15 mm, llana de roca	FDS	83°C
CAS 9	Carrega de foc 948 MJ/m^2 Paret doble, Pladur 15+15 mm	FDS 948 MJ/m^2	318°C

El valor màxim obtingut de 301°C per a la xapa d'acer correspon al CAS 5: paret doble i Pladur 15+15 mm (sense considerar la llana de roca) i una exposició a ISO834.

Consideració especial és el CAS 9 amb una càrrega de foc molt elevada de 948 MJ/m^2 i on s'arriba a la temperatura de 318°C a la xapa d'acer, amb paret doble i Pladur 15+15 mm (sense considerar la llana de roca). Es tractaria d'una hipòtesi extrema i altament desfavorable, tant de geometria com de càrrega de foc.

7 Conclusions

Segons els resultats obtinguts a partir de les simulacions realitzades amb FDS, el comportament de l'incendi al contenidor ve marcat per les característiques de l'escenari definit. Així, la distribució de les obertures inicials (només a una banda o a les dues) i la prescripció de que els vidres es puguin trencar o no, determinen la durada de l'etapa d'incendi desenvolupat a temperatura màxima. De tots els escenaris simulats, el més desfavorable a nivell tèrmic ha estat aquell que s'ha definit bloquejant el trencament de la finestra oposada a la banda del mòdul que té l'obertura inicial (D_10+05[-2]_E_1P_ET; #8).

A més, a partir dels resultats d'una de les simulacions realitzades amb FDS (S_05[0]_E_0P_TT; #1) s'ha observat que les flames que es generarien durant l'incendi i que sortirien per les obertures del mòdul (obertura inicial i obertures creades a partir del trencament dels vidres) no provocarien el trencament del vidre del mòdul superior. **És a dir, podem assegurar que en l'escenari plantejat les flames generades en el contenidor incendiat no provocarien el trencament dels vidres del mòdul superior**.

L'anàlisi feta de les temperatures a l'acer a partir del simulador FDS, són coherents amb els resultats obtinguts posteriorment en l'estudi termomecànic, malgrat que la geometria de la paret modelada a FDS ha estat lleugerament simplificada. En aquest sentit, tots els escenaris simulats indiquen que les temperatures màximes assolides per l'acer estarien clarament per sota dels 300 °C, durant 90 min.

Respecte a l'estudi termomecànic desenvolupat a l'apartat 6 pel cas de la xapa nervada, es conclou que l'afectació de les propietats de l'acer són mínimes ja que les temperatures estan per sota dels 300-350 °C. Dins aquest rang de temperatures es redueix mínimament la tensió de límit elàstic, f_y, i el mòdul d'elasticitat de l'acer, E (vegeu l'apartat 6.3).

Els casos més desfavorables són el CAS 1 i especialment els CASOS 5 i 7. Aquests dos darrers casos corresponen a una paret doble de xapa nervada amb només les plaques de Pladur FOC, sense considerar l'existència de l'aïllament de llana de roca, i exposades al foc a ambdues cares. Aquesta situació tan desfavorable contemplaria la possibilitat real que la llana de roca no existeixi localment, per exemple per estar ocupat aquest espai per les instal·lacions. També és la situació d'alguns perfils estructurals del contenidor que per raons de muntatge només estiguin recoberts exclusivament per les dues plaques de Pladur FOC.

- CAS 5. Per a l'exposició a la corba normalitzada ISO834 durant 90 minuts, s'arriba a una temperatura màxima de 301°C. **És a dir, podem assegurar el compliment del requisit R90 normatiu demanat al projecte APROP de Glòries**
- CAS 7. Per a l'exposició a la corba de foc procedent de l'estudi amb FDS, la temperatura màxima no supera 220 °C en el moment més àlgid, que correspon als 70 minuts de desenvolupament de l'incendi. **És la temperatura màxima assolida durant tota la duració de l'incendi natural fins el seu decaïment**

Als altres casos estudiats, amb la llana de roca realment instal·lada al sistema, sota l'exposició a ISO834 i també a les corbes FDS, donen temperatures més baixes que les esmentades (vegeu el resum complet a l'apartat 6.4).

Altrament, tots els resultats obtinguts amb FDS s'han dut a terme per a una càrrega de foc de 790 MJ/m^2. S'ha fet una estimació de com canviarien les temperatures màximes a la paret si la càrrega de foc s'incrementés fins a 948 MJ/m^2 i com aquest increment podria repercutir en les temperatures a l'acer. En aquest cas s'ha estimat que pel CAS 9 es podria arribar a temperatures màximes d'aproximadament 318 °C als 83 min (vegeu l'apartat 5.6). **És a dir fins i tot en un cas d'hipòtesi extrema i altament desfavorable, tant de geometria com de càrrega de foc es compliria el requisit R90 normatiu demanat**.

Aquests resultats són vàlids sempre que el sistema real s'ajusti a les consideracions de disseny plantejades en els escenaris avaluats. No es recomana fer extrapolacions d'aquests resultats a altres situacions amb geometries, materials i càrregues de foc diferents de les considerades en aquest estudi.

8 Referències bibliogràfiques

[1] NIST. Fire Dynamics Simulator (FDS). https://pages.nist.gov/fds-smv/

[2] Diamonds (versió 2020). Buildsoft company. Hundelgemsesteenweg 244/1B-9820 Merelbeke. https://www.buildsoft.eu/en

[3] Hurley, M.J. and Rosenbaum, E.R. *Performance-Based Fire Safety Design*. CRC Press, Taylor & Francis Group LLC, 2015.

[4] Ajuntament de Barcelona i Bestraten Hormias arquitectura SLP. *Annex del projecte bàsic de 42 allotjaments de proximitat temporal APROP GLÒRIES*. Febrer 2019.

[5] UTE CONSTÈCNIA 3 + EUROCATALANA. *As built de les obres del projecte executiu allotjaments APROP al carrer Nou de Sant Francesc*. Desembre 2019

[6] Garcia-Primi, F. Knauf Insulation. Comunicació personal. Desembre 2019

[7] greenspec. *Insulation materials and their thermal properties. Glass mineral wool (available in: batts, rolls)* https://www.greenspec.co.uk/building-design/insulation-materials-thermal-properties/. Última visita: 07/09/2020

[8] Thunderhead Engineering. *Pyrosim v3.3.0.* Propietats per defecte incloses al programa per a diferents materials. 2002-2020.

[9] Saint Gobain. *Glass properties*. https://www.saint-gobain-sekurit.com/glossary/glass-properties. Última visita: 07/09/2020

[10] Ministry of Business, Innovation & Employment. *C/VM2 Verification Method: Framework for Fire Safety Design. For New Zealand Building Code Clauses C1-C6 Protection from Fire*. Building Code, 2013.

[11] AENOR. *Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-2: Acciones generales. Acciones en estructuras expuestas al fuego.* UNE-EN 1991-1-2:2019. Madrid: AENOR, 2019

[12] Milke, J.A. *53. Analytical Methods for Determining Fire Resistance of Steel Members*. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 5th Edition. Hurley, M. (Editor-in-chief). Springer, 2016

[13] Comunicación interna sobre las curvas de calentamiento del sistema Pladur de trasdosado y techo obtenidas en el laboratorio de ensayos. Pladur 76/400 (46) 2F y T-45/400 2x15F. Febrer 2020. PLADUR GYPSUM, S.A.U, Valdemoro (Madrid)

[14] UNE-EN 1364-1:2019. Ensayos de resistencia al fuego de elementos no portantes. Parte 1: Paredes/EN 1364-1:2015. Fire resistance tests for non-load bearing elements. Part 1: walls.

[15] UNE-EN 1364-2:2019. Resistencia al fuego de elementos no portantes. Parte 2: Techos/ EN

1364-2:2018. Fire resistance tests for non-loadbearing elements - Part 2: Ceilings

[16] ISO 1496-1:2013. *Series 1 freight containers -- Specification and testing -- Part 1: General cargo containers for general purposes*. Correccions i afegits addicionals *ISO 1496-1:2013/Amd 1:2016.* Comitè *ISO/TC 104/SC 1 - General purpose containers*

[17] *Informe estructural per a la comprovació i càlcul dels contenidors tipus STEEL DRY CARGO CONTAINER, per a la seva utilització com a habitatge amb apilament de fins a 7 alçades*. Romà Crespiera i Eduard Simó. Crespiera Simó Diagonal Arquitectura SLP. Barcelona (2018)

[18] Código Técnico de Edificación. Documento Básico DB-SE Acero. Ministerio de la Vivienda. Madrid (2006)

[19] AENOR. *Eurocódigo 3: Proyecto de estructures de acero. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego.* UNE-EN 1993-1-2:2011. Madrid: AENOR, 2011

[20] Rahmanian I. *Thermal and mechanical properties of gypsum boards and their influences on fire resistance of gypsum board based Systems.* Manchester University. https://www.escholar.manchester.ac.uk/api/datastream?publicationPid=uk-ac-man-scw:137521&datastreamId=FULL-TEXT.PDF

Annex

A la següent direcció web es poden trobar els vídeos (animacions d'Smokeview) de les simulacions realitzades amb FDS:

https://certec.upc.edu/ca/shared/documents/eulalia/aprop/videos_mp4_withlogo.rar/view