

Treball de Fi de Grau

**GETI**

# **Simulació d'Incendis en Naus Industrials mitjançant Ozone**

**Memòria**

**Autor:** Arnau Molas Peix

**Director/s:** Mario Miguel Valero Pérez i Eulàlia Planas Cuchí

**Convocatòria:** Setembre 2016



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



## RESUM

El projecte que s'exposa a continuació és un treball desenvolupat a conseqüència d'un conjunt d'estudis duts a terme per el cos de Servei Tècnic dels Bombers de la Generalitat de Catalunya i experts en simulació, els quals es van plantejar la idoneïtat del reglament que regeix sobre la seguretat en incendis en naus industrials – Reglament de Seguretat Contra Incendis en Establiments Industrials (RSCIEI) – i, en concret, sobre els establiments categoritzats dins del tipus A horitzontal.

Els tècnics del cos de bombers van observar i concloure que la normativa que s'aplica pel control i seguretat contra incendis en naus industrials (RSCIEI) estipulava condicions dures (tant tècnicament com econòmicament) als propietaris d'establiments que es classificaven com a tipus A horitzontals, doncs es determina que la tipologia d'aquest format d'establiment (que ocupa parcialment un edifici on, a més a més, es realitzen altres activitats) es pot assimilar a un establiment tipus B (edifici d'ús industrial adossat o distància màxima de 3 metres a d'altres) sempre i quan es presenti un estudi de viabilitat. Aquest estudi ha d'estar bastat en una argumentació sòlida basada en càlculs i anàlisis molt detallats, els quals conclouen en alternatives – per exemple, instal·lació de ruixadors automàtics –que suposen costos molt elevats als propietaris dels establiments.

En aquest context, els tècnics proposen una alternativa menys costosa basada en un sistema de ventilació forçada el qual, després de completar aquest estudi, es va concloure que complementat amb protecció estructural, establiments de tipologia A horitzontal podien resistir incendis sense la necessitat d'implementar mesures tant costoses com les exposades anteriorment.

Tanmateix, aquest estudi va utilitzar un format d'establiment industrial concret i, per tant, cal determinar si els resultats obtinguts a partir de les simulacions fetes pels tècnics són estables al variar paràmetres de l'escenari patró (com, per exemple, la variació de les dimensions del edifici) el qual és simulat en condicions d'incendi. Per tant, s'ha procedit a realitzar un estudi de sensibilitat sobre paràmetres que, per experiència dels tècnics del cos de bombers, podien ser més representatius.

Per tal d'aconseguir realitzar aquest estudi de sensibilitat s'ha utilitzat l'eina Ozone, un simulador basat en models de zona (discretització de l'espai confinat en zones diferents entre si, cadascuna de les quals té propietats homogènies en l'espai que ocupen) per tal de caracteritzar les corbes de temperatura que s'assoleixen, tant en el gas del recinte confinat com en l'acer estructural, el qual a partir de certa temperatura comença a perdre el conjunt propietats estructurals que el defineixen.

A partir de les simulacions efectuades, s'ha valorat la influència de cadascun dels factors valorats sobre les corbes de temperatura de l'incendi de la mateixa manera que s'ha determinat si existeix o no risc de col·lapse estructural de l'establiment.

Així doncs, les conclusions més importants d'aquest projecte es basen a corroborar els resultats obtinguts en el projecte anterior (influència destacable dels sistemes de ventilació forçada) i observar, en cadascun dels escenaris, si existeix una estabilitat dels resultats obtinguts del model patró. Per altra banda, determinar si l'escenari de risc més baix – Risc 1 – no representa cap problema per la integritat estructural.

Les principals conclusions obtingudes afirmen que l'escenari de risc 1 amb la protecció estructural R120 no provoca col·lapse estructural en cap de les configuracions simulades. L'escenari de Risc 1 amb protecció R90 no assegura que l'edifici no pateixi col·lapse estructural i, depenent de la configuració dels factors d'estudi, les temperatures del material estructural poden suportar els 550°C (veure apartat 6.2.) i certes comprovacions amb programari addicional serien importants per consolidar els resultats obtinguts.

Per altra banda, s'observa que els escenaris amb ventilació forçada (exutoris) obtenen molts millors resultats, assolint temperatures molt menors que els escenaris sense sistema de ventilació forçada. Es demostra ser un element molt important que permet millorar la situació de l'establiment a la hora d'afrontar les conseqüències d'un incendi.

Finalment, els factors utilitzats en l'anàlisi de sensibilitat que més afecten al desenvolupament de les corbes de temperatura (Tant de la capa calenta com de l'acer estructural) són la mida de la superfície de la nau i l'alçada de l'establiment industrial.

## SUMMARY

The project presented below is developed as a complement and due to previous studies elaborated by the Catalan fire service technicians – Servei Tècnic dels Bombers de la Generalitat de Catalunya – aided by simulation experts who discussed from the very beginning the suitability of fire code regulations governing on industrial plants and facilities – Reglament de Seguretat Contra Incendis en Establiments Industrials – and, in particular, governing over type A and horizontal facilities.

Those technicians observed and concluded that the regulation that applies over fire control and security in industrial facilities stipulates very strict conditions (both technically and economically) to the owners of the A and horizontal type facilities because it is determined that this kind of facility typology (which occupies partially the building where, besides this establishment, there are other establishments dedicated to different activities) could be equated to a B type of industrial facility ( building attached to others or separated by a maximum distance of 3 meters) as long as the owner presents a feasibility study. That feasibility research must be done with solid arguments always based on very detailed calculations and analysis which conclude on presenting very expensive alternatives (one example could be an automatic sprinkler system) that cannot be afforded by the facility owner.

Against this background, the technicians present a cheaper alternative based on a forced ventilation system complemented with structural protection in A and horizontal type of buildings. That option could resist fires without the need of expensive and technically advanced alternatives, difficult to implement for the owners.

However, that study used a very specific facility format, so there is the need to prove if those results obtained by simulating this scenario are steady while changing other scenario parameters (for instance, changing dimensions of the building) on fire conditions. Consequently, this project has conducted a sensitivity analysis over parameters which, from technicians and expert's experience, could be more representative.

In order to achieve completing this project, Ozone simulation tool has been used. This tool is based on zone models criteria (a discretization of the confined space in different zones, so each of them has homogenous properties throughout the space occupied) and has been used to describe and define the temperature characteristic curves of the gas temperature of the confined zone and of the structural steel which supports the building. That material loses structural properties from a certain temperature.

From the simulations taken, it has been evaluated the influence of each factors over the temperature characteristic curves of the upper layer in the same form has been evaluated over structural steel temperature which establishes the risk of structural collapse.

Therefore, the most important conclusions of this project are based on the confirmations of the previous results taken from the previous study (the remarkable influence of the forced ventilation system) and observe, in each one of the created scenarios, if exists a stability of the results obtained comparing with the pattern scenario. On the other hand, determinate if the lower risk scenario (Risk 1) do not represent a problem for the structural integrity.

The most important conclusions corroborate that all the "risk 1" scenarios that have R120 protection over the structural steel do not are unable to reach the threshold number which

determinates that the scenario do not reach the structural collapse. The scenario constructed with R90 protection does not ensure the non-collapse of the structure depending of the configuration, reaching 550°C (see the headland 6.2.) in some cases.

On the other hand, scenarios with ventilation assistance obtain better results than the ones which do not have any sort of ventilation assistance. It is a very important aid which is demonstrated to improve the status of the establishment while resisting a fire.

Finally, the most important factors taken from the analysis done are the size of the basis of the establishment and the height of the establishment. Both should be considered while taking conclusions over the status of an A horizontal industrial building.

## ÍNDEX

<b>RESUM</b> .....	1
<b>SUMMARY</b> .....	3
1. PREFACI .....	8
1.1. ORIGEN DEL PROJECTE.....	8
1.2. MOTIVACIÓ .....	9
2. INTRODUCCIÓ.....	10
2.1. OBJECTIUS DEL PROJECTE .....	10
2.2. ABAST DEL PROJECTE .....	10
3. LA NORMATIVA RSCIEI .....	12
3.1. TIPUS D'ESTABLIMENTS.....	12
3.1.1. ESTABLIMENTS INDUSTRIALS EN UN EDIFICI .....	12
3.1.2. ESTABLIMENTS INDUSTRIALS EN ESPAIS OBERTS .....	13
3.2. CÀLCUL DEL NIVELL DE RISC INTRÍNSEC I CÀRREGA DE FOC.....	14
3.3. SECTORITZACIÓ DELS ESTABLIMENTS INDUSTRIALS.....	16
3.4. ESTABILITAT AL FOC DELS ELEMENTS CONSTRUCTIUS PORTANTS.....	17
4. TEORIA SOBRE ELS INCENDIS CONFINATS.....	19
4.1. PRINCIPALS COMPONENTS D'UN INCENDI .....	19
4.2. LA COMBUSTIÓ I EL FOC.....	19
4.3. LA PIRÒLISI .....	20
4.4. DESENVOLUPAMENT D'INCENDIS EN NAUS CONFINADES .....	21
4.4.1. IGNICIÓ .....	21
4.4.2. CREIXEMENT.....	21
4.4.3. FLASHOVER.....	22
4.4.4. INCENDI TOTALMENT DESENVOLUPAT .....	22
4.4.5. DECREIXEMENT .....	23
4.5. LA IMPORTÀNCIA ESTRUCTURAL EN UN INCENDI .....	24
4.6. INTRODUCCIÓ A LES MESURES DE PREVENCIÓ I PROTECCIÓ D'INCENDIS .....	24
4.7. INTRODUCCIÓ AL CONCEPTE DE COL·LAPSE ESTRUCTURAL.....	25
4.8. INTRODUCCIÓ ALS MODELS DE SIMULACIÓ D'INCENDIS .....	25
5. EL PROGRAMARI I LA BASE TEÒRICA EN QUÈ ES FONAMENTA.....	27
5.1. MODEL DE DUES ZONES.....	27
5.2. MODELS D' UNA ZONA.....	30
5.3. LES PARTICIONS.....	31
5.3.1. SISTEMA D'ELEMENTS FINITS QUE ACTÚA SOBRE LES PARTICIONS .....	32
5.4. CONDICIONS DE CONTORN ESTABLERTES PEL PROGRAMARI OZONE.....	34

5.5.	EL CANVI DE MODEL DURANT LA SIMULACIÓ .....	35
5.6.	MODELITZACIÓ DE LES VENTILACIONS .....	37
5.6.1.	INTERCANVIS CONVECTIUS .....	38
5.6.2.	INTERCANVIS RADIANTS.....	39
5.7.	LA MODELITZACIÓ DEL FOC EN OZONE .....	39
5.7.1.	LA QUÍMICA UTILITZADA PER OZONE .....	40
5.7.2.	EL MODEL DE COMBUSTIÓ.....	41
5.8.	LA MODELITZACIÓ DE LES MESURES DE PROTECCIÓ PER OZONE .....	41
6.	MODEL DEL ESCENARI SIMULAT PER OZONE.....	43
6.1.	DEFINICIÓ DE L'ESCENARI.....	43
6.1.1.	GEOMETRIA.....	44
6.1.2.	MATERIALS .....	44
6.1.3.	OBERTURES .....	45
6.1.4.	DEFINICIÓ DE LA CÀRREGA DE FOC DE L'INCENDI .....	46
6.1.5.	MESURES DE PROTECCIÓ UTILITZADES.....	47
6.1.6.	ELEMENT ESTRUCTURAL UTILITZAT .....	48
6.2.	VALORS D'ESTUDI ESCOLLITS I CRITERIS EMPRATS.....	49
6.3.	RESULTATS DE L'ESCENARI BASE.....	50
6.4.	INTRODUCCIÓ A L'ESTUDI DE SENSIBILITAT.....	51
7.	ANÀLISI DE SENSIBILITAT: CASOS I RESULTATS.....	53
7.1.	RESULTATS PER A RISC 1 .....	54
7.1.1.	TEMPERATURES DE L'ACER ESTRUCTURAL AMB PROTECCIÓ R120.....	54
7.1.2.	TEMPERATURES DE L'ACER ESTRUCTURAL AMB PROTECCIÓ R90.....	55
7.1.3.	TEMPERATURES DE LA CAPA CALENTA.....	58
7.2.	RESULTATS PER A RISC 2 .....	62
7.2.1.	TEMPERATURES DE L'ACER ESTRUCTURAL AMB PROTECCIÓ R120 i R90.....	62
7.2.2.	TEMPERATURES DE LA CAPA CALENTA.....	66
7.3.	RESULTATS PER A RISC 3 .....	69
7.3.1.	TEMPERATURES DE L'ACER ESTRUCTURAL AMB PROTECCIÓ R120 I R90.....	70
7.3.2.	TEMPERATURES DE LA CAPA CALENTA.....	74
8.	IMPACTE AMBIENTAL I SOCIAL DEL PROJECTE .....	78
8.1.	IMPACTE AMBIENTAL.....	78
8.2.	IMPACTE SOCIAL .....	79
9.	COSTOS DEL PROJECTE.....	80
10.	CONCLUSIONS.....	81
11.	AGRAÏMENTS.....	83

12. BIBLIOGRAFIA ..... 84



## 1. PREFACI

### 1.1. ORIGEN DEL PROJECTE

Aquest projecte està desenvolupat a partir d'un estudi realitzat pel Servei de Prevenció i el cos de bombers, els quals van començar a analitzar possibles alternatives que podrien afavorir un canvi en la normativa que regeix sobre la seguretat dels establiments industrials enfront a incendis (RSCIEI) en naus de tipus A horitzontal.

Anteriorment a aquest estudi ja s'havien produït incendis en Naus de tipus A horitzontals a Catalunya (un clar exemple n'és el succeït a Gavà l'any 2010). Aquest cas en concret, posat en exemple en tal estudi, portà a un conjunt de conclusions les quals indicaven que tals establiments requerien de mesures complementàries a les que disposava tals com [1]:

- Millor resistència estructural (l'estructura prefabricada no era prou resistent)
- Millor sistema de ventilació de fums
- Mètodes d'extinció dins la nau (com, per exemple, ruixadors automàtics) o sectorització d l'establiment.
- Millor resolució tècnica de la coberta.

Per altra banda, també s'arribà a la conclusió que les mesures preventives que garantien el no col·lapse estructural eren (actualment, són) molt costoses tan tècnicament com econòmicament i eren inviables d'executar per als propietaris de tals establiments [1].

D'aquest conjunt de conclusions van sorgir primeres valoracions per part dels experts que exposaven que hi havia paràmetres i alternatives els quals podien influenciar notablement sobre el possible no col·lapse de l'estructura. Aquests podien ser el nivell de risc de l'activitat industrial, el material que compona l'estructura, la decisió operativa d'instal·lar sistemes de ventilació forçada o les característiques dimensionals de la nau.

A partir de tals valoracions, es va realitzar l'estudi desenvolupat pels bombers i tècnics en la matèria [1], amb el qual es va voler demostrar que existien casos els quals no complien tots els requisits imposats per la normativa establerta i que podien afrontar i resistir un incendi sense que repercutís estructuralment sobre els establiments veïns, sempre i quan vinguessin complementades de mesures molt menys costoses, com podria ser la inserció d'un sistema de ventilació forçada, amb la ferma voluntat d'aportar solucions més accessibles als propietaris dels establiments de tipus A horitzontal.

Per a completar aquest estudi es van realitzar simulacions amb models de zona (veure apartat 6.3.) els quals són el principal origen del projecte desenvolupat, que pretén complementar la informació aportada en un inici.

## 1.2. MOTIVACIÓ

El foc és un recurs molt utilitzat per l'ésser humà, indispensable per al desenvolupament de moltes tasques quotidianes que es realitzen diàriament. Tot i així, el foc també pot ser un recurs molt perillós si aquest no és controlat, provocant nombrosos desperfectes en l'espai on estigui contingut (tant en un recinte confinat com en la intempèrie) desembocant en pèrdues materials, econòmiques, la mort d'éssers vius o atacs agressius sobre el medi ambient.

De fet, segons les estadístiques aportades pels Bombers de la Generalitat [2], durant l'any 2014 es van realitzar més de 60000 intervencions, de les quals els incendis urbans (dins de recintes confinats, com pot ser un pis, una oficina o dins de naus industrials) van ser el 19% de les intervencions totals. Majoritàriament, els incendis que es desenvolupen en naus industrials són no provocats i són deguts al mal estat d'instal·lacions, sobrecàrregues de tensió, curtcircuits o mal tractament de substàncies perilloses necessàries per a la realització de l'activitat industrial [3].

El cas que desenvolupa aquest projecte pretén aportar solucions alternatives que permetin evitar qualsevol dels desperfectes valorats en l'anterior paràgraf (argumentades científicament i suportades pels càlculs pertinents), doncs els incendis ocasionats en naus industrials poden ser un potencial focus de tals danys.

La majoria de naus industrials de tipus A horitzontal es van construir sense basar-se en la disposició exigida per la normativa vigent (elaborada durant l'any 2003 [5] i de completa aplicació des de 2005) i són exemptes d'aplicar-la fins que canviïn o modifiquin la seva activitat o s'executi una reforma de les instal·lacions (les quals hauran de complir amb el nou reglament, tot i que l'òrgan competent de la Generalitat es guarda el dret de demanar un compliment parcial o total) [4].

Aquests establiments doncs presenten evidents carències enfront a un possible incendi i, a més a més, aquest format de naus industrials representa un conjunt molt ampli dins del parc industrial de Catalunya, per la qual cosa s'observa un perill potencial en el nostre territori. Tot i així, la normativa vigent és de caràcter genèric, provocant que els plans de viabilitat alternatius que demanden els propietaris de tals establiments hagin d'incloure, com s'ha introduït en l'origen del projecte, mesures molt restrictives i costoses les quals s'observen de difícil accés per a molts d'aquests propietaris.

Així doncs, la motivació d'aquest projecte és aportar solucions viables i accessibles a aquest conflicte existent entre les exigències de la normativa i les possibilitats dels empresaris i/o propietaris dels establiments, afavorint a una millor concreció de la normativa que permeti facilitar la millora de la seguretat i protecció enfront els incendis que es puguin originar.

Si aquesta situació es pogués aconseguir, facilitaria enormement la ocupació d'aquestes naus per a realitzar-hi activitats industrials, el que aportaria una dinamització en el desenvolupament del teixit industrial del territori espanyol, molt representat pel teixit industrial català, el qual és una font de riquesa tant productiva (econòmica) com social que cal preservar.

## 2. INTRODUCCIÓ

### 2.1. OBJECTIUS DEL PROJECTE

L'objectiu principal del projecte és continuar l'estudi iniciat pels tècnics en prevenció d'incendis i els bombers, comprovant la validesa dels resultats obtinguts prèviament amb els simuladors de dues zones i completant aquest estudi comprovant si aquests resultats es mostren estables generant modificacions sobre l'escenari simulat o, pel contrari, es generen grans variacions que invalidarien en gran mesura les conclusions extretes prèviament. Per tal d'acomplir aquest objectiu, es pretén desenvolupar una anàlisi de sensibilitat sobre els escenaris previs modificant un conjunt de paràmetres que, empíricament o per experiència dels bombers, es conclouen rellevants.

Aquesta anàlisi podria col·laborar a caracteritzar millor naus industrials que han de fer modificacions molt restrictives degudes a la llei, o al pla de viabilitat desenvolupat en consonància amb la normativa RSCIEI.

Per tal d'aplicar aquesta anàlisi, un objectiu important és assimilar el funcionament dels simulador així com la importància dels diferent factors que afecten en un incendi que poden ser alterats mitjançant el programador.

Finalment es vol aconseguir caracteritzar les corbes de temperatures (tant del gas del recinte confinat com les suportades per l'acer) les quals permetran extreure

### 2.2. ABAST DEL PROJECTE

L'abast d'aquest projecte queda delimitat a aconseguir desenvolupar l'anàlisi de sensibilitat sobre l'escenari patró utilitzat en l'estudi previ. Per a aquest projecte s'han realitzat simulacions sobre els elements estructural d'acer estructural IPE600 amb protecció R90 i R120 (protecció d'esprai perlític) utilitzant les configuracions de risc 1, 2 (considerats baix risc) i 3 (risc mitjà).

Per altra banda, s'ha mantingut el procediment efectuat en el projecte anterior mantenint variables els factors d'influència que en un principi es van avaluar: “ % de superfície d'incendi” i l'aplicació/ no aplicació d'exutoris (com a sistemes de ventilació forçada). És a dir, s'han continuat variant en l'actual anàlisi de sensibilitat.

Els quatre nous paràmetres introduïts són:

- **Superfície de la nau:** es realitzen variacions sobre l'escenari patró de 1000 m<sup>2</sup> de base l'establiment utilitzant escenaris de 800 i 1200 m<sup>2</sup> (és a dir, s'ha aplicat una variació del  $\pm 20\%$ ).

- **Alçada de la nau:** s'ha realitzat variacions sobre l'alçada de la nau, és a dir, la distància vertical entre la base i la teulada. També s'ha efectuat la variació del  $\pm 20\%$  (és a dir, simulacions per alçades de 4.87m, 6.5m i 8.125m).
- **Localització de les ventilacions:** s'han aplicat variacions sobre l'alçada de les ventilacions del  $\pm 20\%$  sobre l'alçada predeterminada disposada en l'estudi anterior. Consta de dos tipus de ventilacions:
  - o **La porta d'accés de la nau** (de dimensions 3x3m).
  - o **Ventilacions** ( de dimensions 1x2,5m) situades a 4m d'alçada respecte el nivell de la base.
- **Velocitat de creixement de l'incendi:** s'han aplicat les velocitats de creixement disponibles sobre cada escenari.

Les simulacions han estat executades, categoritzades i presentades de la mateixa forma que ho estaven en estudis previs. S'ha seguit el mateix model patró per tal d'assolir concordança entre resultats. L'estudi principalment ha girat entorn el valor de temperatures màximes assolides durant l'incendi, avaluant el risc estructural que presenta en conseqüència.

### 3. LA NORMATIVA RSCIEI

El RSCIEI (Reglament de Seguretat contra Incendis en Establiments Industrials) és una normativa aprovada l'any 2004 que té com a principal objectiu "establir i definir els requisits que han de complir els establiments i instal·lacions d'ús industrial per a la seva seguretat en cas d'incendi per a prevenir la seva aparició i donar la resposta adequada, en cas de produir-se, limitant-ne el màxim possible la seva propagació i facilitant-ne l'extinció, amb la finalitat d'anular o reduir els danys i pèrdues que l'incendi pugui produir a persones o béns [5].

Tot i que és una normativa recent de control i prevenció d'incendis, apareixen certs dubtes respecte a la seva efectivitat [4]:

- **Engloba una gran quantitat d'activitats diferenciades en el mateix àmbit d'aplicació.** La gran quantitat de possibilitats d'activitat industrial existents en l'actualitat provoca que una aplicació massa genèrica sobre aquestes pugui donar problemes (i generar desavantatges a unes activitats respecte d'altres).
- Es basa en un paràmetre (**densitat de càrrega de foc**), el qual no sempre és calculable o no existeix cap possibilitat d'obtenir valors fiables que s'adeqüin a cada activitat.
- **Gran afectació sobre les naus tipus A horitzontals.** Aquesta tipologia de naus industrials és molt comú en territori espanyol i, degut a les exigències de la normativa, és més complex) el correcte compliment dels requisits demanats.

En definitiva, l'excessiva i genèrica aplicació del reglament, unit a dificultats intrínseques del compliment de la normativa, dificulta en gran mesura la seva correcta aplicació. A més a més, la possibilitat de tornar a dissenyar naus existents per a què compleixin amb la normativa es veu reduïda per les dificultats tècniques i econòmiques, dificultant també la reinserció d'antigues naus industrials per a la realització de noves activitats.

Molts dels problemes existents a l'hora de dissenyar (o tornar a dissenyar) naus industrials de tipus A horitzontals es focalitza en gran mesura en que la normativa equipara pràcticament els requisits d'aquestes amb les tipus B, havent-hi diferències notables entre les dues tipologies. A continuació s'exposa les característiques de cadascuna de les tipologies existents.

#### 3.1. TIPUS D'ESTABLIMENTS

##### 3.1.1. ESTABLIMENTS INDUSTRIALS EN UN EDIFICI

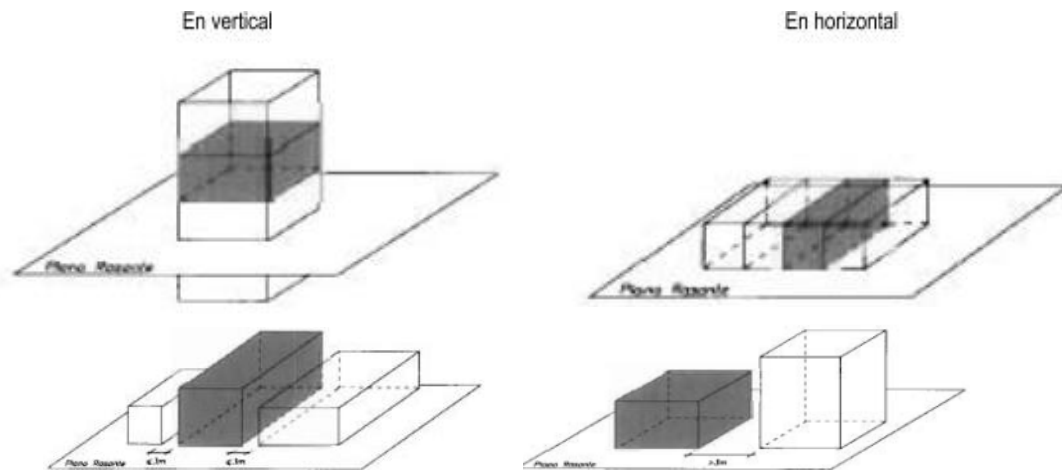
- **Tipus A:** l'establiment industrial ocupa parcialment un edifici que té, a més a més, altres establiments, ja siguin d'ús industrial o d'altres usos. Per tant, el tret més distintiu d'aquesta tipologia és que l'estructura portant és comuna amb altres establiments. (figura 1) [5]

- **Tipus B:** l'establiment ocupa totalment l'edifici en qüestió que, a la vegada, està adossat a un o altres edificis, o a una distància igual o inferior a tres metres de la resta (ja siguin d'ús industrial o d'altres usos). (figura 1)

En el cas de naus adossades amb estructura compartida amb altres de contigües s'admetrà el compliment de les exigències corresponents al tipus B (sempre que es pugui justificar tècnicament el no col·lapse a les naus adjacents). Per tant, s'haurà de demostrar que l'hipotètic col·lapse estructural degut a l'incendi no afecti a la mitgera ni la coberta de la nau adjacent.

Així doncs, s'haurà de justificar analíticament mitjançant càlculs estructurals, estudis de control de fums i temperatura, així com la dissipació de calor aconseguida amb instal·lacions de ruixadors automàtics. [5]

- **Tipus C:** l'establiment industrial ocupa totalment un edifici (o varis) i està a una distància superior a tres metres de l'edifici més pròxim. Aquesta distància ha de ser lliure d'elements susceptibles de propagar l'incendi o de mercaderies combustibles. [5] (figura 1).



**Figura 1** - Representacions (d'esquerra a dreta i de dalt a baix) de les configuracions Nau A horitzontal, Nau A vertical, Nau B i Nau C respectivament. Font: [5]

### 3.1.2. ESTABLIMENTS INDUSTRIALS EN ESPAIS OBERTS

- **Tipus D:** l'establiment ocupa un espai obert, que pot estar totalment cobert però alguna de les seves façanes manca de tancament lateral. [5] (figura 2).

- **Tipus E:** l'establiment industrial ocupa un espai obert que pot estar parcialment cobert (fins un 50% de la seva superfície) i alguna de les façanes (dins l'espai cobert) manca de tancament lateral. [5] (figura 2)

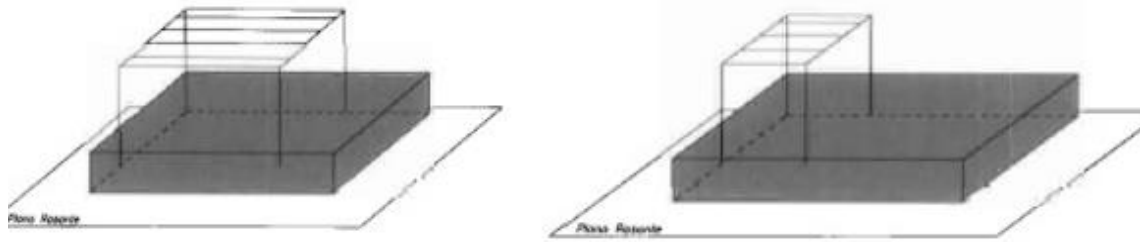


Figura 2 - Representacions (d'esquerra a dreta) dels tipus de Nau D i E respectivament. Font: [5]

Cada una d'aquestes configuracions (tipus de nau industrial) constituirà una o varies zones (sectors o àrees d'incendis) de l'establiment industrial. Per als tipus A, B i C es considera "sector d'incendi" a l'espai de l'edifici tancat per elements resistents: per als tipus D i E es considera l'àrea d'incendi oberta (definida solament pel seu perímetre).

### 3.2. CÀLCUL DEL NIVELL DE RISC INTRÍNSEC I CÀRREGA DE FOC

Els establiments que generen activitat industrial es classifiquen segons el nivell de risc intrínsec:

**Càlcul del nivell de risc intrínsec (NRI):** valor que ha de calcular-se per a cada sector o àrea d'incendi i s'avalua mitjançant la densitat de càrrega de foc, mostrada en la següent expressió (equació 1):

$$Q_s = \frac{\sum_i G_i q_i C_i}{A} \times R_a \left[ \frac{MJ}{m^2} \right] \quad (1)$$

$Q_s$  = densitat de càrrega de foc, ponderada y corregida, del sector o àrea d' incendi.

$G_i$  = massa [Kg] de cada un dels combustibles que existeixen en cada sector o àrea de l'incendi.

$q_i$  = poder calorífic [MJ/Kg] de cada un dels combustibles existents.

$C_i$  = coeficient adimensional que pondera el grau de perillositat de cada un dels combustibles (taula 1).

Taula 1 - Taula del coeficient de perillositat. Sota la taula clarifiquen conceptes desenvolupats dins la pròpia taula. Font:[5] i [6]

Coeficient de Perillositat ( $C_i$ )		
Alt	Mitjà	Baix
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Líquids de classe A i de subclasse B1 (estipulats en l'ITC -MIE -APQ1*).</li> <li>- Sòlids que puguin iniciar una combustió a menys de 100°C.</li> <li>- Productes que puguin formar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Líquids de subclasse B2 o de classe C (estipulats en l'ITC-MIE-APQ1*).</li> <li>- Sòlids que no comencen la ignició a 100-200°C.</li> <li>- Sòlids que emeten gasos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Líquids de classe D estipulats en l'ITC-MIE -APQ1*).</li> <li>- Sòlids que comencen la ignició a <math>T &gt; 200^\circ\text{C}</math>.</li> </ul>

mesclures explosives amb l'aire a temperatura ambient o, que en aquesta, pugui ocasionar combustió espontània.	inflamables.	
$C_i = 1,60$	$C_i = 1,30$	$C_i = 1,00$

\*Parlem d'ITC (Instrucció Tècnica Complementària)- MIE - APQ1 (identificatiu d'emmagatzematge de líquids inflamables i combustibles). Aprovada per el Reial Decret 279/2001. [6]. En aquesta Instrucció Tècnica es diferencien productes líquids per classes segons el punt d'inflamació de la substància.

$R_a$  = coeficient adimensional que corregeix el grau de perillositat d'una activitat concreta en cada zona sectoritzada de la nau industrial. Si existeixen varies activitats en la mateixa zona sectoritzada, el  $R_a$  pertinent més elevat serà l'utilitzat a la fórmula (taula 2).

L'activitat que aporti coeficient ha de ser una activitat representativa de la zona sectoritzada on es troba ( ha d'ocupar del 10% de la superfície en endavant). Heus aquí algun exemple en la següent taula:

Taula 2 - Exemples d'activitats industrials contemplades a la normativa RSCIEI. Font: [5]

Activitat	Fabricació i venda		$R_a$	Emmagatzematge		$R_a$
	$Q_s$			$Q_s$		
	$MJ/m^3$	$Mcal/m^2$		$MJ/m^3$	$Mcal/m^2$	
Olis comestibles	1000	240	2,0	18900	4543	2,0
Acers	40	10	1,0			
Armes	300	72	1,0			
Productes de sucre	800	192	1,5	800	192	1,5
Begudes Alcohòliques	500	120	1,5	800	192	1,5
Cuir sintètic	1000	240	1,5	1700	409	1,5

A = superfície construïda del sector d'incendi.

A mode d'alternativa a la fórmula mostrada en anterioritat, existeixen dues fórmules per a calcular la càrrega de foc (depenent de l'activitat comercial):

- **Activitats de producció, transformació o reparació (2)**

$$Q_s = \frac{\sum_i q_{si} S_i C_i}{A} \left[ \frac{MJ}{m^2} \right] \quad (2)$$

On la diferenciació (equació 2) la trobem en el significat de  $q_{si}$  (densitat de càrrega de cada zona amb procés diferent depenent dels diferents processos que es realitzen en el sector d'incendi. La  $S_i$  és la superfície de la zona de cada procés.



- Activitats d'emmagatzematge (3)

$$Q_s = \frac{\sum_1^i q_{vi} h_i s_i C_i}{A} \left[ \frac{MJ}{m^2} \right] \quad (3)$$

Els valors a interpretar nous són  $q_{vi}$ , que representa la càrrega de foc aportada per cada zona existent,  $h_i$  que és l'alçada de l'emmagatzematge i  $s_i$  la superfície aportada per cada tipus d'emmagatzematge.

Finalment, un cop calculada la densitat de càrrega de foc, es valora el NRI (equació 4) (Nivell de Risc Intrínsec de l'edifici) mitjançant la següent expressió de la densitat càrrega de foc ponderada i corregida (eq.4):

$$Q_e = \frac{\sum_1^i Q_{si} \cdot A_i}{\sum_1^i A_i} \left[ \frac{MJ}{m^2} \right] \quad (4)$$

Aquest valor de càrrega de foc ponderada s'ha de comparar amb la taula oficial que classifica el risc intrínsec mitjançant aquest valor obtingut (taula 3).

**Taula 3** - Taula de categorització del risc intrínsec associat a la nau industrial a partir del càlcul de càrrega de foc.  
Font: [5]

Nivell de risc intrínsec		Densitat de Càrrega de Foc Ponderada	
		$\frac{Mcal}{m^2}$	$\frac{MJ}{m^2}$
Risc Baix	1	$Q_s \leq 100$	$Q_s \leq 425$
	2	$100 < Q_s \leq 200$	$425 < Q_s \leq 850$
Risc Mitjà	3	$200 < Q_s \leq 300$	$850 < Q_s \leq 1275$
	4	$300 < Q_s \leq 400$	$1275 < Q_s \leq 1700$
	5	$400 < Q_s \leq 800$	$1700 < Q_s \leq 3400$
Risc Alt	6	$800 < Q_s \leq 1600$	$3400 < Q_s \leq 6800$
	7	$1600 < Q_s \leq 3200$	$6800 < Q_s \leq 13600$
	8	$3200 < Q_s$	$13600 < Q_s$

### 3.3. SECTORITZACIÓ DELS ESTABLIMENTS INDUSTRIALS

Tot establiment industrial com a mínim conforma un sector d'incendis quan adopta la configuració tipus A,B o C (que conformen espais totalment confinats). La màxima superfície construïda admissible (taula 4) de cada sector d'incendis ve determinada en la següent taula:

**Taula 4** - Taula que mostra la màxima superfície construïda admissible per a cada sector d'incendi. Font [5]

Risc Intrínsec del Sector d'Incendi		Configuració de l'Establiment		
		Tipus A	Tipus B	Tipus C
Baix	1	2000 (1,2,3)	6000 (2,3,5)	Cap límit
	2	1000 (1,2,3)	4000 (2,3,5)	6000 (3,4)
Mitjà	3	500 (2,3)	3500 (2,3)	5000 (3,4)
	4	400 (2,3)	3000 (2,3)	4000 (3,4)
	5	300 (2,3)	2500 (2,3)	3500 (3,4)
Alta	6	No admès	2000 (3)	3000 (3,4)
	7		1500 (3)	2500 (3,4)
	8		No admès	2000 (3,4)

Notes sobre la taula 4 [5]. els valors assignats a cada una de les tipologies segons el risc intrínsec es poden veure alterats degut als següents punts:

- 1 - Si el sector d'incendi està situat en primer nivell sota de rasant de carrer, la màxima superfície construïda es 400 m<sup>2</sup>, que pot incrementar-se degut als punts 2 i 3.
- 2 - Si la façana accessible de l'establiment industrial és superior a 50% del seu perímetre, les màximes superfícies construïdes poden augmentar per 1,25.
- 3 - Quan s'instal·lin ruixadors automàtics d'aigua que no siguin exigits perceptivament per al reglament, les màximes superfícies construïdes admissibles poden multiplicar-se per 2.
- 4 - En configuracions tipus C (si l'activitat ho requereix), el sector d'incendis pot tenir qualsevol superfície, sempre i quan compti amb una instal·lació automàtica d'extinció a distància a límits de parcel·les edificables sigui superior a 10 metres.
- 5 - Per establiments industrials tipus B de risc intrínsec baix 1, activitat la qual es tracti d'emmagatzemar materials de classe A i revestit estructuralment de materials tipus A, pot augmentar la superfície per 10.

### 3.4. ESTABILITAT AL FOC DELS ELEMENTS CONSTRUCTIUS PORTANTS

L'exigència estructural ve determinada per el temps (minuts) durant el qual l'element ha de mantenir l'estabilitat mecànica. L'estabilitat davant el foc (exigible als elements constructius) pot determinar-se mitjançant la següent taula (taula 5) o per procediments de càlcul (amb justificació i solvència).

Taula 5 - Relació estructural mínima exigida depenent del nivell de risc i la configuració de la nau industrial. Font: [5]

Nivell de Risc Intrínsec	Tipus A		Tipus B		Tipus C	
	Planta soterrani	Planta sobre rasant	Planta soterrani	Planta sobre rasant	Planta soterrani	Planta sobre rasant
Baix	R-120	R-90	R-90	R-60	R-60	R-30
Mitjà	No admès	R-120	R-120	R-90	R-90	R-60
Alt		No admès	R-180	R-120	R-120	R-90

## 4. TEORIA SOBRE ELS INCENDIS CONFINATS

A nivell microscòpic, un incendi és una reacció d'oxidació exotèrmica, per tant, diversos productes reaccionen amb l'oxigen generant un fenomen que desprèn energia calorífica i llum. Per iniciar la reacció caldrà una font d'ignició.

Un cop aquesta energia calorífica es desprèn, generalment ja no serà necessària la intervenció de cap font d'ignició per tal que el procés es mantingui per si mateix doncs l'aportació necessària d'energia per tal que el fenomen es sustenti la dona la mateixa reacció exotèrmica.

Aquest fenomen es mantindrà viu sempre i quan quedi material combustible.

### 4.1. PRINCIPALS COMPONENTS D'UN INCENDI

Els incendis requereixen de quatre elements bàsics. Si un dels elements no apareix, no és possible que es desenvolupi tal incendi [7]. Aquests elements són:

- **Combustible:** compost sòlid, líquid o gasos que es veu oxidat en la reacció de combustió, alliberant energia tèrmica i lumínica.
- **Comburent:** compost que oxida el combustible. Els casos que es tractaran utilitzen com a màxim exponent de comburent l'oxigen.
- **Font de calor:** energia aportada al principi que permet la primera ignició. Un cop la reacció en cadena s'ha efectuat, generalment ja no serà necessària la seva intervenció. Altrament anomenada "Font d'ignició".
- **Reacció en cadena:** reacció que es produeix un cop la font de calor ha permès la ignició d'un combustible i el sistema s'alimenta per si mateix.

### 4.2. LA COMBUSTIÓ I EL FOC

Tal i com s'ha comentat, la combustió és una reacció exotèrmica en la qual un material combustible amb capacitat d'inflamar-se rep una aportació d'energia i desencadena una reacció amb l'oxigen generant, en la majoria de casos, diòxid de carboni, aigua i energia (generalment tèrmica i lumínica).

El combustible en qüestió pot trobar-se en qualsevol de les formes de la matèria (sòlid, líquid o gas). La reacció es desencadenarà quan l'aportació d'energia requerida trenqui un dels seus enllaços generant el principi de reacció que, a posteriori, s'alimentarà per si mateixa sempre i quan segueixi havent combustible i oxigen [7]. Aquesta aportació d'energia provocarà doncs l'augment de temperatura fins a la temperatura d'ignició.

Un altre element fonamental que apareix en les reaccions de combustió és el fum. El fum està format per vapor d'aigua, partícules i altres gasos (depenent de la combustió). Els gasos del fum solen ser incoloros, per la qual cosa el color característic del fum durant l'incendi serà bàsicament determinat per la quantitat de vapor d'aigua i per les partícules sòlides.

Molts dels components que formen el fum poden ser tòxics, fent d'aquest un factor important d'estudi en un incendi [8]. A més a més, un dels components comú en el fum, el CO (monòxid de carboni), té una temperatura d'ignició baixa i és altament inflamable. Aquest fenomen pot alimentar de forma addicional el procés de combustió.

Els components més rellevants del fum són:

- **Aire:** format aproximadament de 79% de Nitrogen i 21% d'Oxigen.
- **Partícules sòlides en suspensió:** majoritàriament derivades del carboni.
- **Gasos altament inflamables:** com s'ha exposat en anterioritat, un exemple n'és el monòxid de carboni (CO).
- **Gasos no inflamables:** principalment estan compostos pel diòxid de carboni i el vapor d'aigua, que són productes de la reacció de combustió.

Altres components minoritaris es poden trobar en l'entorn de la combustió, condicionant-la de manera notable sense intervenir en la reacció. Aquests components, anomenats també agents passius, absorben part de l'energia després i afectaran directament a la quantitat d'energia necessària que cal aportar a la reacció per a que aquesta es continuï produint. Un exemple d'agent passiu és l'aigua.

### 4.3. LA PIRÒLISI

La piròlisi és la descomposició d'una substància a causa de l'energia calorífica rebuda.

Totes les substàncies que rebin suficient energia (gràcies a una font de calor) poden passar dels estats líquid o sòlid a gas degut a que les molècules de la substància absorbeixen l'energia provocant la pròpia inestabilitat i generant el debilitament i/o ruptura dels enllaços existents [7]. A certa temperatura i depenent de les condicions de la mescla, els gasos alliberats (que són funció dels components de la substància líquida o sòlida) podran ser inflamables, fet que provocarà l'inici del procés de combustió i el conseqüent incendi.

En un espai confinat com poden ser les naus industrials, moltes de les substàncies sòlides i líquides que es poden trobar en el seu interior poden pirolitzar i generar aquests gasos inflamables a l'arribar a certa temperatura. Elements sintètics, fustes, cartrons (com a principals exemples) són subjectes a ser pirolitzats (requereixen temperatures relativament baixes per a la seva piròlisi).

Per altra banda, els materials que cremen en un incendi desprenen gasos que depenen, en gran part, de la pròpia composició dels materials (tant en tipus de substància com en les seves proporcions).

El tipus de gasos existents dins d'un recinte confinat altera notablement el transcurs de l'incendi accelerant o no el desenvolupament d'aquest. Si el gas és altament energètic ajudarà a accelerar el desenvolupament de l'incendi; per altra banda, un gas poc energètic pot no repercutir notablement en l'evolució de l'incendi.

### 4.4. DESENVOLUPAMENT D'INCENDIS EN NAUS CONFINADES

Per a que un incendi es desenvolupi en un espai confinat és necessària la participació d'altres substàncies combustibles. A diferència d'un espai exterior (on l'oxigen és il·limitat), l'incendi en un recinte tancat sempre estarà controlat per la quantitat d'oxigen i les substàncies combustibles que es trobin en el seu interior.

L'evolució d'un incendi confinat es pot desglossar en les següents etapes (figura 4):

#### 4.4.1. IGNICIÓ

El procés d'ignició, comentat en anterioritat, es produeix quan les substàncies combustibles comencen a reaccionar. És la immediata conseqüència de l'aportació suficient d'energia a un material o substància fins a arribar al punt de temperatura d'ignició.

La ignició pot ser provocada (per exemple, per una espurna generada d'una mala connexió) o no provocada (com pot ser l'exposició prolongada a temperatures elevades d'un material fàcilment inflamable).

Tots els incendis es produeixen degut a la ignició d'un material o substància.

#### 4.4.2. CREIXEMENT

Un cop la substància combustible es veu exposada a suficient energia i comença a cremar, es desprèn d'ella un plomall que es va desenvolupant, absorbint l'aire que l'envolta.

L'aire que va entrant al plomall determina el nivell de refrigeració o de sustentació de temperatura del recinte doncs l'aire que entra al plomall és considerablement més fred que el del propi plomall el qual està format per gasos calents que es van desprenent de la combustió de les substàncies. Quan més aire pugui entrar, més es refredarà el focus calent i es sustentaran les temperatures [7].

Aquest plomall aviat entrarà en contacte amb els impediments físics que limiten un recinte confinat. La limitació d'espai ràpidament provoca que el plomall xoqui contra la limitació d'alçada (el sostre) i ràpidament es propagui des de la zona superior del recinte cap a la zona inferior, creant una capa de fums.

Aquest fenomen provoca que la temperatura del recinte comenci a elevar-se, doncs el plomall és més calent que l'aire del recinte. També repercuteix directament sobre la salut i la possibilitat de vida dins el recinte un cop la capa de fums baixa a l'alçada de les persones [9].

En el supòsit que existeixin ventilacions en el recinte confinat (en aquest treball s'ha fet ús d'elles), aquestes permetran a l'aire més calent sortir del recinte provocant que el pla neutre (superfície teòrica on la pressió de l'exterior és igual a la de l'interior) s'elevi. Aquesta elevació permetrà que l'aire fred de l'exterior del recinte entri per sota del pla mitjançant les ventilacions i realimentar el cicle de l'incendi.

Un cop es produeix aquest fenomen l'incendi no s'aturarà fins que totes el combustible existent s'hagi cremat, doncs el sistema es realimenta de l'oxigen provinent de l'aire fred que entra al recinte.

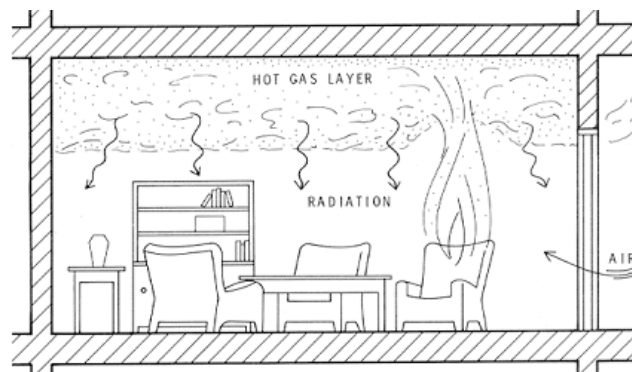
#### 4.4.3. FLASHOVER

El 'flashover' o inflamació sobtada generalitzada és un fenomen que apareix quan una àrea s'escalfa fins el punt que la flama es propaga per tota la superfície de local (figura 3).

Aquest fenomen es produeix degut a les altes temperatures que es troben a la capa calenta i que emeten una elevada energia radiant que incideix directament sobre tots els cossos del recinte confinat (ja siguin sòlids o líquids) provocant la seva piròlisi i conseqüent crema.

Un cop es produeix el flashover les condicions del recinte canvien notablement, doncs molts més cossos comencen a cremar aportant molta més energia a l'incendi. La reacció exotèrmica que es produeix també fan augmentar notablement la temperatura del recinte.

En el supòsit que hi hagi persones dins l'espai confinat, les possibilitats de supervivència disminueixen de forma dràstica, sent nul·les en el cas que les persones es trobin sense protecció.



**Figura 3** - Representació de l'inici del flashover. Efecte radiant de la capa calenta sobre els sòlids que no participaven a l'incendi. Font: [7]

#### 4.4.4. INCENDI TOTALMENT DESENVOLUPAT

Aquesta etapa es produeix quan tots els materials combustibles en el recinte cremen. Durant aquest període, els combustibles alliberen la màxima quantitat d'energia calorífica possible produint gran quantitat de gasos d'incendi. És en aquesta etapa del procés quan és més factible que l'incendi es propagui per recintes contigus, punt especialment important en els edificis de tipologia A als quals tenen l'estructura portant comú amb altres establiments.

Si l'incendi és controlat per ventilació [10], l'aire del recinte es va renovant gràcies a l'aire fred que prové de l'exterior (el qual aporta oxigen) provocant que l'incendi no cessi. Aquest aire fred, juntament amb fum, pot desplaçar-se a zones contigües a la zona d'incendi, arribant a inflamar-se paulatinament al entrar en contacte amb aquestes zones, sempre i quan tinguin grans quantitats d'oxigen i temperatures suficientment altes que puguin permetre la inflamació.

#### 4.4.5. DECREIXEMENT

Durant aquesta etapa la potència de l'incendi decau. Aquest fenomen pot estar produït degut a que el combustible s'està consumint (incendis limitats per combustible) o degut a la falta de ventilació, fet que provoca que la potència de l'incendi no sigui suficient per a compensar les pèrdues de calor cap a l'entorn.

##### **Incendi limitat per combustible**

Un incendi limitat per combustible és aquell en el qual l'emissió de calor i el seu desenvolupament es troben limitats per les característiques del combustible (quantitat distribució). Existeixen dos escenaris que poden provocar el decreixement de l'incendi [11]:

- **Incendis d'interior amb una àmplia ventilació.** L'accés a nou oxigen degut a l'abundant entrada d'aire fred de l'exterior (el qual incorpora oxigen a l'incendi) provoca que la única raó que debiliti l'incendi sigui la consumpció del combustible.
- **Incendis en recintes de gran volum** (com són les naus industrials) on la grandària de l'incendi en relació al volum del mateix és molt petit.

##### **Incendis limitats per ventilació**

L'incendi limitat per ventilació és aquell en que el seu desenvolupament i potència queda limitat per la quantitat d'oxigen disponible. Es pot correspondre a incendis d'interior, fins i tot amb sistema de ventilació, si la mida de les ventilacions i la seva geometria no ajuda a la inserció suficient d'aire fred de l'exterior, provocant que s'aporti nou oxigen al sistema.

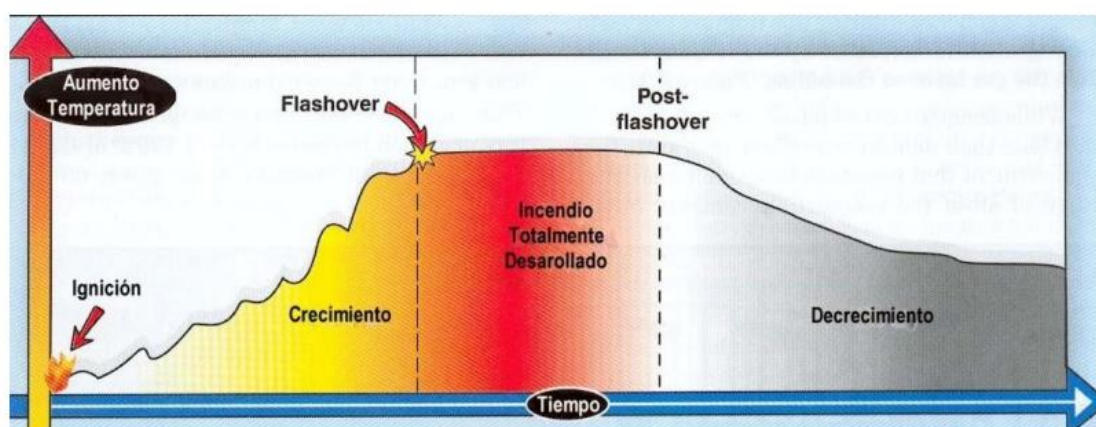


Figura 4 - Etapes del desenvolupament d'un incendi. Font: [7]



#### 4.5. LA IMPORTÀNCIA ESTRUCTURAL EN UN INCENDI

La capacitat de l'estructura per a transmetre el calor pot contribuir notablement a la velocitat de desenvolupament d'un incendi i a la quantitat d'energia calorífica que es podrà dissipar a l'exterior de l'espai confinat.

Un exemple evident és la comparació de dues estructures formades pel mateix material però de diferent composició, essent un més lleuger que l'altre. El component estructural més lleuger tindrà quantitats d'aire superiors a "l'estàndard", la qual cosa provoca unes pèrdues de calor menors degut a la baixa conductivitat tèrmica del component.

Per tant, una conductivitat tèrmica menor implica, en primer lloc, que no es podrà alliberar tanta energia tèrmica a l'exterior mitjançant l'estructura de l'edifici i, per tant, molta d'aquesta energia es veurà retinguda dins l'espai confinat afegint-se a l'energia que el combustible que crema vagi alliberant, provocant en el pitjor dels casos que cossos sòlids entrin en fase de piròlisi.

Així doncs, l'estructura de l'establiment és un factor important que incideix directament en el desenvolupament de l'incendi.

#### 4.6. INTRODUCCIÓ A LES MESURES DE PREVENCIÓ I PROTECCIÓ D'INCENDIS

Existeixen diverses mesures que permeten evitar la propagació del foc i garantir l'estabilitat estructural de l'espai confinat en cas d'incendi, anomenades mesures passives.

Els equipaments que conformen les mesures de protecció passives tenen com a propòsit principal confinar i sectoritzar l'incendi impedit la seva lliura propagació. Exemples de mesures passives per a establiments i edificis són les portes talla-foc o els revestiments estructurals (com perlita o plaques de guix). En aquest treball s'habilita la opció de protegir estructuralment l'edifici amb addició de perlita.

Per altra banda, existeixen equipaments i instal·lacions els quals tenen com a principal funció controlar (i, si és possible, extingir) el foc. Aquestes s'anomenen mesures de protecció actives, les quals incideixen directament sobre el focus de l'incendi i intenta controlar-lo en la mesura que sigui possible. Exemples de mesures actives per a establiments i edificis són els extintors, ruixadors automàtics o boques d'incendis.

#### 4.7. INTRODUCCIÓ AL CONCEPTE DE COL·LAPSE ESTRUCTURAL

El col·lapse estructural és un fenomen en el qual el material que conforma l'estructura d'un edifici deixa de mantenir les seves propietats, perdent la funcionalitat com a material estructural i provocant, en molts casos, que la integritat de l'edifici perilli. En el cas que ocupa aquest treball, el col·lapse es produeix a altes temperatures (estipulades a 550°C<sup>1</sup>).

La mateixa normativa RSCIEI demanda que tota estructura ha d'estar conformada per materials que compleixin uns requeriments mínims basats en un temps mínim que ha d'aguantar l'estructura abans que col·lapsi. Aquests requisits faciliten la possibilitat d'augmentar el marge temporal per permetre una actuació suficient amb l'objectiu d'evacuar qualsevol persona que es trobi en el recinte de l'incendi, així com facilitar un temps d'acció per tal que els equips d'extinció d'incendis puguin realitzar la seva tasca.

El cas de l'acer estructural (que és el cas que ocupa aquest treball) és delicat doncs les propietats de l'acer tenen fluctuacions notables de les seves propietats depenent de la temperatura. De fet, la capacitat resistent de l'acer davant el foc inicia la seva caiguda a partir dels 100 - 200°C, de tal manera que al voltant dels 700°C queda poc més del 23% de la seva resistència a temperatura ambient [12].

A nivell normatiu europeu, s'adopta la corba estandarditzada d'incendis ISO 834, que es troba recollida en totes les normatives vigents a Espanya i, que a nivell pràctic, reproduceix de forma aproximada l'acció de l'incendi de forma conservadora.

En aquest projecte doncs, s'intentarà simular diferents escenaris, sempre buscant que no es produeixi tal col·lapse estructural, observant la temperatura màxima que assoliran els elements estructurals en cada simulació.

#### 4.8. INTRODUCCIÓ ALS MODELS DE SIMULACIÓ D'INCENDIS

Un cop introduïda la teoria bàsica sobre incendis, cal exposar quin tipus de programari permet estudiar aquests incendis i en què es basen [13]

- **Models de Zona<sup>2</sup>:** simulacions que subdivideixen els compartiments a simular en zones les quals s'assumeix que la temperatura és uniforme al llarg d'elles. Són sistemes computacions senzills basats en les lleis de conservació de la massa i de l'energia, útils per tal de realitzar estudis de sensibilitat.

Algun exemple de programari pot ser el CFAST o l'Ozone (utilitzat en aquest projecte).

- **Models de camp:** simulacions basades en els modes de la dinàmica de fluids i el mètode dels elements finits. Són models molt sofisticats basats en les equacions de Navier - Stokes de cada element del sistema.

<sup>1</sup> S'ha estipulat 550°C per mantenir la línia projectada per els treballs i estudis previs a aquest.

<sup>2</sup> Els models de zona s'explicaran amb més profunditat a posteriori, doncs són els tipus de model utilitzats per a fer les simulacions en aquest projecte.

Són útils per a simular casos molt concrets o escenaris molt detallats. Per contrapart, triguen molt més en concloure les simulacions i és més complex dissenyar l'escenari.

Cada model i escenari a simular ha d'haver passat abans per un conjunt de fases que han de ser validades i correctament argumentades (figura 5).

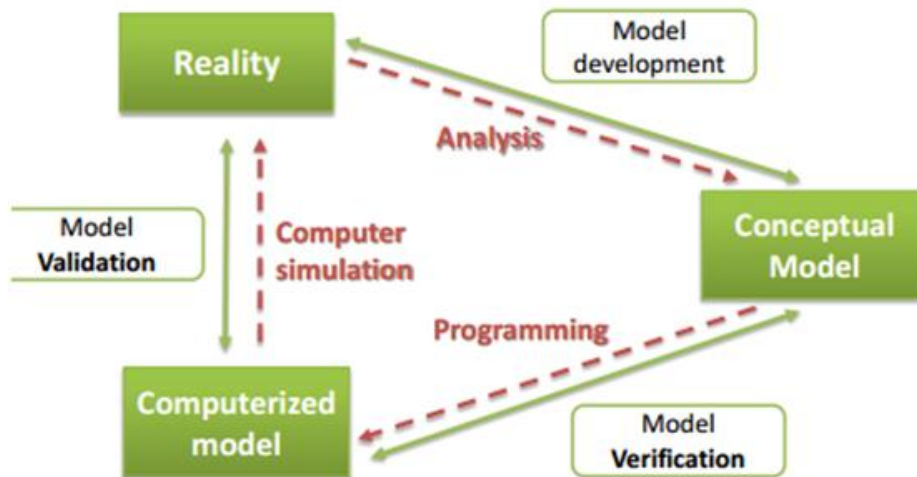


Figura 5 - Fases de disseny d'un escenari. Font: [13]

- **Fase de Validació:** procés en qual cal argumentar i acceptar un procés de càlcul com a vàlid, basant-se en la representativitat d'aquest envers la realitat.
- **Fase de Verificació:** procés en el qual cal determinar si una implementació del mètode de càlcul representa la descripció conceptual d'aquest mateix mètode prèviament validat.

## 5. EL PROGRAMARI I LA BASE TEÒRICA EN QUÈ ES FONAMENTA

El sistema emprat per tal d'obtenir valors numèrics i resultats sobre els quals fonamentar les conclusions extretes en aquest document ha estat el simulador Ozone (versió v2.2.6). En els següents apartats es resumeixen les principals característiques del simulador, així com les interpretacions i hipòtesis que aquest realitza a l'hora de simular. Existeix documentació més extensa i detallada sobre el programari així com les eines matemàtiques que aquest aplica a la qual es pot recurrir [14][15].

El simulador Ozone, a grans trets, està basat i desenvolupat a partir de la teoria dels models de zona (prèviament introduïts). Aquests models són eines numèriques que actualment s'utilitzen de manera freqüent per tal de calcular i avaluar les temperatures assolides dins d'un espai confinat en escenaris on el foc n'és el protagonista (per exemple, un incendi).

En comparació amb els models CFD (usats, per exemple, en simuladors com el FDS - Fire Dynamics Simulator -) és una eina molt bàsica i senzilla tot i que els resultats que se'n poden obtenir són potents, sempre i quan es representi correctament l'escenari d'estudi.

La principal hipòtesi que utilitzen els models de zona és que el compartiment d'estudi es troba dividit en capes o zones diferenciades entre si, les quals tenen dins d'elles una distribució uniforme de la temperatura (de fet, de totes les propietats). Per exemple, un model d'una zona només té una temperatura uniforme en el compartiment; en canvi, un model de dues zones està format per dues capes (generalment anomenades capa calenta i capa freda), cada una amb la seva pròpia temperatura.

Tant l'un com l'altre són models vàlids en circumstàncies totalment diferents. El model d'una zona es considera vàlid per a focs totalment desenvolupats, per altra banda el model de dues zones representa de forma eficaç focs localitzats i en procés de desenvolupament.

Aquesta consideració és una eina potent que pot permetre al simulador canviar de model de zona segons l'etapa de l'incendi en la que es trobi. En aquest cas, el simulador Ozone (que comença a analitzar un model de dues zones) considerarà per convergència de temperatures entre la capa calenta i freda que el foc està totalment desenvolupat, finalitzant la simulació en un model d'una zona.

### 5.1. MODEL DE DUES ZONES

Els models de dues zones estan analíticament fonamentats a partir d'onze variables de sentit físic (figura 6). Aquestes variables estan relacionades entre si mitjançant set restriccions en quatre equacions diferencials, que bàsicament conformen els balanços de massa i energia en cada una de les zones (equacions 12 a 14).

La possibilitat d'observar el desenvolupament d'aquestes equacions diferencials conforme el temps avança permet calcular valors a temps real i aportar gràfiques de l'evolució de les variables del sistema, podent caracteritzar el gas en cada moment.

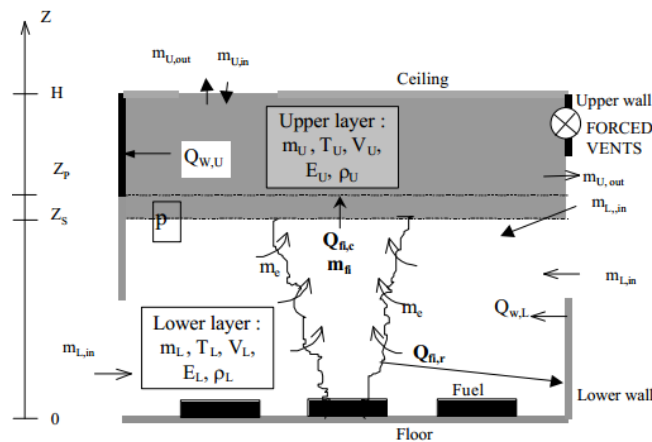


Figura 6 - Representació del model de dues zones junt amb les seves variables. Font: [14].

Per una banda, els balanços de massa són condició necessària per assegurar analíticament que, en qualsevol moment de l'estudi, la variació de massa de gas d'una de les zones és equivalent a la massa de gasos de combustió creats per el foc a més de les variacions d'entrada i sortida de gasos introduïts o expulsats de les ventilacions [14].

Per altra banda, el balanç d'energia exposa que, en qualsevol moment de l'estudi de l'esdeveniment, s'estableix un balanç entre l'energia produïda en l'espai confinat a causa de la combustió i l'energia consumida (durant l'escalfament dels gasos).

Les restriccions que caracteritzen l'escenari (equacions 5 a 8) simulat són:

$$\rho_i = \frac{m_i}{V_i} \quad (5)$$

$$E_i = c_v(T) \cdot m_i \cdot T_i \quad (6)$$

$$p = \rho_i \cdot R \cdot T \quad (7)$$

$$V = V_U + V_L; \quad i = U, L \quad (8)$$

El subíndex "i" marcarà la referència de la capa, és a dir, si el paràmetre en qüestió es refereix a la capa superior o inferior (U, capa superior, o L, capa inferior<sup>3</sup>).

Per altra banda,  $c_v(T)$  és la nomenclatura de la calor específica a volum constant. Cal recordar (equació 9) que existeix una relació establerta entre R i  $c_v(T)$ .

$$C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V = \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_V \quad (9)$$

Al no considerar que es treballa amb un gas ideal,  $c_v(T)$  depèn de  $c_p(T)$  de la següent forma (equació 10):

$$\frac{\gamma(T_i)}{c_p(T_i)} = c_v(T_i) \quad (10)$$

<sup>3</sup> Les lletres "U" i "L" fan referència al nom de la capa en anglès, upper and lower respectivament.

Finalment, el sistema d'equacions establert que relaciona la capa superior amb la inferior (equacions 11 a 14) és el següent [14]:

### Balanços de massa

$$\dot{m}_U = \dot{m}_{U,VVout} + \dot{m}_{U,HVIn} + \dot{m}_{U,HVout} + \dot{m}_{U,FVIn} + \dot{m}_{U,FVout} + \dot{m}_e + \dot{m}_{fi} \quad (11)$$

$$\dot{m}_L = \dot{m}_{U,VVIn} + \dot{m}_{L,VVout} + \dot{m}_{L,HVIn} + \dot{m}_{L,HVout} + \dot{m}_{L,FVIn} + \dot{m}_{L,FVout} - \dot{m}_e \quad (12)$$

### Balanços d'energia

$$\dot{q}_U = \dot{q}_{U,rad} + \dot{q}_{U,wall} + \dot{q}_{U,VVout} + \dot{q}_{U,HVIn} + \dot{q}_{U,HVout} + \dot{q}_{U,FVIn} + \dot{q}_{U,FVout} + c_p(T_L)\dot{m}_{ent}T_L + 0,7RHR \quad (13)$$

$$\dot{q}_L = \dot{q}_{L,rad} + \dot{q}_{L,wall} + \dot{q}_{U,VVIn} + \dot{q}_{L,VVIn} + \dot{q}_{L,VVout} + \dot{q}_{L,HVIn} + \dot{q}_{L,HVout} + \dot{q}_{L,FVIn} + \dot{q}_{L,FVout} - \dot{q}_{ent} \quad (14)$$

Si el sistema és descrit pel següent conjunt de variables, el sistema podrà quedar definit per un conjunt d'equacions diferencials més senzill [14]:

$$T_U, T_L, Z_S \text{ i } \Delta p$$

Aquestes variables defineixen les temperatures del gas de cada una de les capes, alçada de separació de les zones i diferència de pressió establert des de l'instant inicial respectivament (variables d'esquerra a dreta). El sistema queda simplificat (equacions 15 a 18) de la següent forma:

$$\dot{T}_U = \frac{1}{c_p(T_U) \cdot \rho_U \cdot V_U} \cdot (q_U - c_p(T_U) \cdot m_u \cdot T_U + V_U \dot{\Delta p}) \quad (15)$$

$$\dot{T}_L = \frac{1}{c_v(T_L) \cdot \rho_L \cdot V_L} \cdot (q_L - c_v(T_L) \cdot m_l \cdot T_L + V_L \dot{\Delta p}) \quad (16)$$

$$\dot{Z}_S = \frac{1}{\gamma(T_L) \cdot P \cdot A_f} \left( (\gamma(T_L) - 1) \dot{q} - V_L \cdot \dot{\Delta p} \right) \quad (17)$$

$$\Delta p = \frac{(\gamma-1) \cdot \dot{q}}{V} \quad (18)$$

## 5.2. MODELS D' UNA ZONA

El model d'una zona (figura 7) és analíticament més simple que el model mostrat en anterioritat. A l'incloure únicament una capa desapareixen el conjunt de variables que caracteritzava la segona capa, disminuint el conjunt de variables a 6 [14].

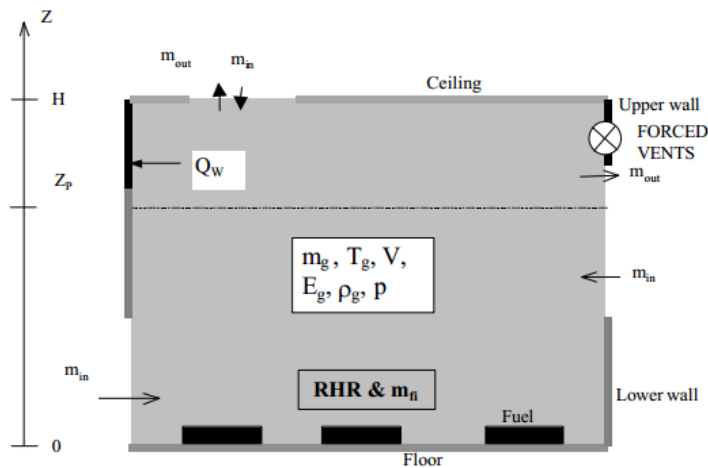


Figura 7 - Representació del model d'una zona. Font: [14].

Així mateix, les variables que defineixen la capa són les mateixes que defineixen cada una de les capes en el model de dues zones. El sistema de restriccions (equacions 19 a 21) i equacions (22 i 23) que conforma el model és:

### Restriccions

$$\rho_g = \frac{m_g}{V} \quad (19)$$

$$E_g = c_v(T_g) \cdot m_g \cdot T_g \quad (20)$$

$$p = \rho_g \cdot R \cdot T_g \quad (21)$$

### Balanç de massa

$$m_g = m_{in} + m_{out} + m_{fi} \quad (22)$$

### Balanç d'energia

$$q_U = q_{rad} + q_{wall} + c_p(T_g)m_{out}T_g + c_p(T_{out})m_{in}T_{out} + RHR \quad (23)$$

Si es fa el supòsit que el volum del sistema és constant, doncs el recinte d'estudi (espai confinat) en cap moment augmenta l'espai i donades certes dades, el sistema es pot simplificar per sistemes d'equacions diferencials ordinàries (equacions 24 i 25) similars a les mostrades en el mode de dues zones:

$$\Delta p = \frac{(\gamma-1)q}{v} \quad (24)$$

$$T_g = \frac{1}{c_p(T_g) \cdot \rho_g} \quad (25)$$

En aquest cas, el programa Ozone es basa en els sistemes d'equacions exposats per tal de resoldre els escenaris proposats. Per a resoldre d'una forma acurada els sistemes, utilitza un model d'elements finits format per elements unidimensionals en el cas dels models d'una zona i bidimensional en el cas de dues zones.

### 5.3. LES PARTICIONS

Les particions són els sòlids que limiten el recinte. En el cas de l'escenari utilitzat les particions són 6: el sostre, el terra i les quatre parets del recinte. La formulació del sistema d'elements finits és el mateix per a cadascuna de les particions, tot i que cada una d'elles estarà caracteritzada per les condicions de contorn, depenent de les necessitats i el cas a simular.

En aquesta configuració el recinte queda limitat, doncs només es poden analitzar recintes formats per quatre parets de base rectangular, formant paral·lelepípede ortoedre. Per el cas d'estudi no suposa una limitació.

La única variació sobre el paral·lelepípede ortoedre pot ser l'aplicació d'un sostre a "dues vessants" o a "una vessant" (figura 8). El cas estudiat utilitza la configuració de sostre pla (tercera configuració a la figura 8).



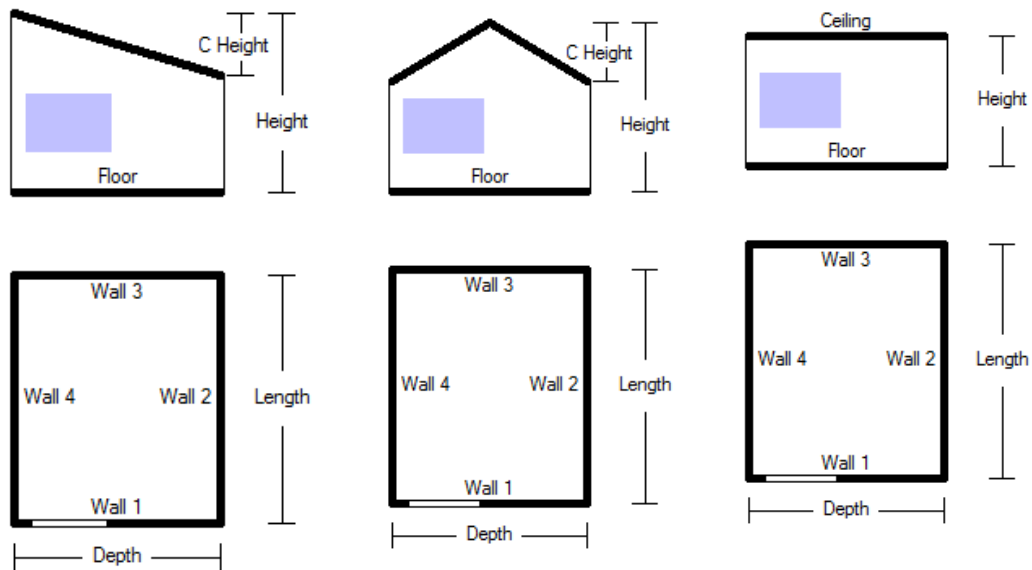


Figura 8 - Diferents configuracions de les particions usades per Ozone. Font: [14]

### 5.3.1. SISTEMA D'ELEMENTS FINITS QUE ACTÚA SOBRE LES PARTICIONS

Basant-se en el següent esquema de discretització unidimensional (figura 9), es disposa el sistema a calcular d'elements finits. Per a cada un dels elements li correspon el sistema d'equacions matricial (equacions 26 i 27) i, per tant, hi haurà tants sistemes d'equacions com elements tingui el sistema [14].

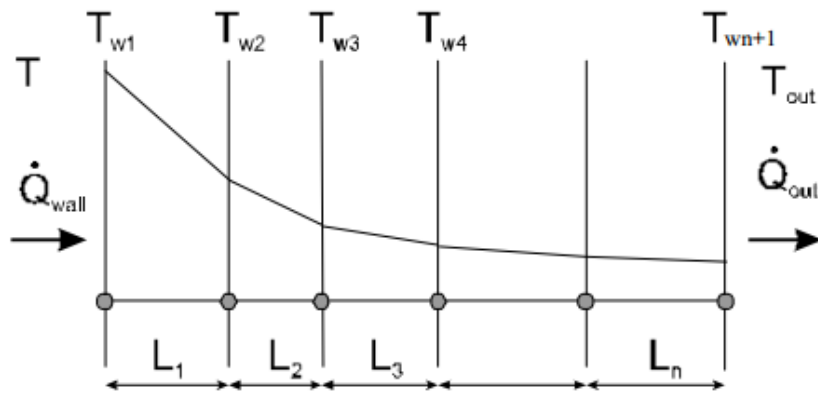


Figura 9 - Discretització del sistema unidimensional. Font: [14]

$$K_{el,i} \cdot T_{el,i} + C_{el,i} \cdot T_{el,i} = g_{el,i} \quad (26)$$

$$T_{el,i} = \begin{Bmatrix} T_{w,i} \\ T_{w,i+1} \end{Bmatrix}; K_{el,i} = \frac{k_i}{L_i} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}; C_{el,i} = c_i \rho_i L_i \begin{bmatrix} 0,5 & 0 \\ 0 & 0,5 \end{bmatrix} \quad (27)$$

El sistema d'equacions d'energia que afecta a les particions de l'espai confinat depèn bàsicament de l'energia transmesa per convecció i per radiació. Per altra banda, el propi programari identifica que la temperatura del gas que toca la superfície de la paret serà la mateixa que el de la superfície de la paret (simplificació per diferències de temperatures negligibles).

Un cop vist el tractament analític de l'estudi de les particions i de l'estudi que es fa de les zones on hipotèticament hi ha gas (les capes del model) cal observar la relació que s'estableix entre les particions i les capes.

L'estudi de transferència de calor i, per tant, de les temperatures en cada instant de la simulació es computa utilitzant el següent sistema matricial (equació 28) computat per elements finits:

$$T_w^i = C^{-1} \cdot (g - K T_w) \quad (28)$$

La relació establerta es fàcilment deduïble si s'introdueix les capes dins d'un recinte confinat per quatre parets, un sostre i un terra (configuració usada en el treball), sempre tenint en compte que la capa calenta és sempre la capa superior i, per tant, és la que es troba en contacte directe amb el sostre; per altra banda, la capa més freda, la inferior, es troba en contacte directe amb el terra.

Així doncs, les parets estan subdividides en dues zones, la superior que tocarà la capa calenta i la inferior que estarà en contacte amb la capa freda. L'alçada de les capes és un valor que fluctua en el temps depenent de la temperatura i de la capa de fums (un exemple n'és la figura 10, obtinguda en una de les simulacions, que mostra el moviment de la capa límitrof<sup>4</sup>).

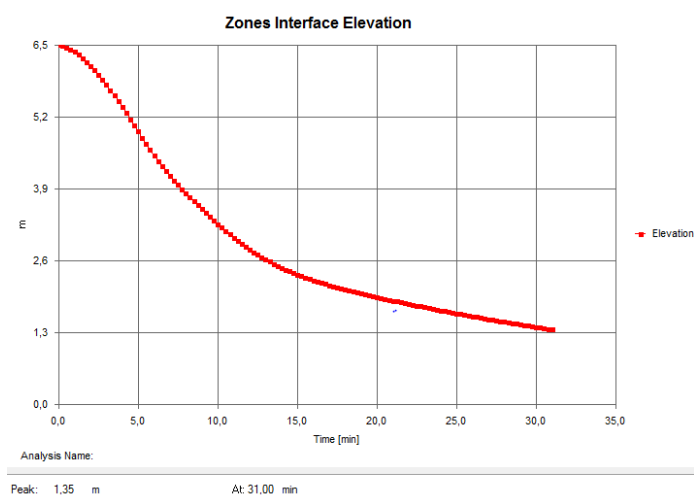


Figura 10 - Moviment de la capa límitrof al llarg de la simulació. Extret del programari Ozone.

El tractament que es fa de cada capa per elements finits és el mateix, però evidentment les condicions de contorn de cadascuna són diferents.

<sup>4</sup> S'entén com a capa límitrof d'aquella que uneix les dues zones del model (capa superior i capa inferior).

A diferència de les capes de l'escenari que en el model de dues zones s'analitzen de forma bidimensional, les particions sempre són estudiades unidimensionalment. Aquest fenomen que permet simplificar els problemes notablement requereix de la creació espontània (i artificial, no és un fenomen real) d'energia [14].

Finalment, si es considera el cas mostrat a la figura 10, la capa calenta augmenta la seva ocupació, disminuint l'elevació de la capa límitrof. Aquest fenomen provoca directament la disminució de la ocupació en el recinte tancat de la capa freda del sistema. Aquest mateix fenomen es pot observar en les particions del sistema on, matemàticament, si la capa a l'instant  $i$  (en un temps  $t_0$ ) és  $Z_s$ , a l'instant  $i + 1$  ( $t_0 + \Delta t$ ) la capa es veurà desplaçada a  $Z_s + \Delta Z_s$ , tal com s'observa a la figura 11.

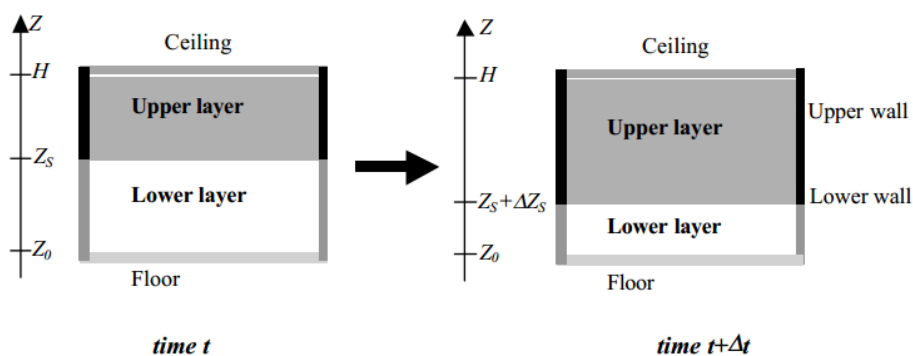


Figura 11 - Moviment de les capes al llarg de l'incendi entre un temps  $t$  i un temps  $t+\Delta t$ . Font: [14]

#### 5.4. CONDICIONS DE CONTORN ESTABLERTES PEL PROGRAMARI OZONE

Per a cada sòlid dins l'espai confinat on en el conjunt d'escenaris simulats el sòlid existent és cadascuna de les particions (parets mitgeres, sostre i terra) s'estableixen unes condicions de contorn degut a la transferència de calor que es transmet entre les capes del sistema i les particions, i les particions amb l'exterior de l'espai confinat [16].

La transferència tèrmica es realitza mitjançant els fenòmens de convecció i radiació. L'equació (29) que caracteritza aquest fenomen és:

$$q = h \cdot (T_2 - T_1) + \varepsilon^* \cdot \sigma (T_2^4 - T_1^4) \quad (29)$$

La part de l'equació ressaltada en vermell fa referència a la potència transferida per convecció (entre un sòlid i un fluid). Aquesta part de l'equació, anomenada Llei de refredament de Newton, determina que la potència transmesa entre dos cossos és proporcional a la superfície exposada a la transferència i la diferència de temperatures entre els cossos (equació 29).

La constant que estableix aquesta proporció s'anomena coeficient de convecció i generalment es caracteritza amb la lletra  $h$  (mesurat en  $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ). Aquest coeficient però, no és constant i depèn de la geometria de la capa plana (controlada pel programa), la velocitat de fluid i les propietats de l'entorn de la superfície sòlida de contacte [16].

L'altre part de l'equació, ressaltat en blau, fa referència a la potència transferida per radiació entre dos cossos. Qualsevol cos a temperatura major a 0 K emet radiacions electromagnètiques i les radiacions tèrmiques mantenen una longitud d'ona entre 0,1 i 100µm [16].

Suposant una superfície  $A$  d'emissivitat  $\varepsilon$  a temperatura  $T_1(K)$  com, per exemple, les particions de l'espai confinat (envoltades d'un entorn més gran a temperatura  $T_2(K)$ ), si la superfície de l'entorn és molt més gran que la superfície de la partició es compliran els requisits per aplicar l'equació simplificada de la radiació, anomenada llei de Stefan-Boltzmann (remarcada en blau i aplicada pel programari Ozone).

La constant que relaciona les temperatures existents i l'emissivitat entre els dos cossos és la constant de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ ), mesurada en  $\frac{W}{K^4 m^2}$ . El cas que ocupa aquest projecte evidencia que la temperatura del gas és superior a la de les particions i, per tant, s'estableix una potència positiva (la superfície  $A$  rep més potència).

Un cop introduïda l'equació que permet avaluar la transferència de calor per convecció i radiació, les equacions de l'escenari simulat que defineixen aquesta transferència tèrmica són:

$$q_{ext} = h \cdot (T_{ext} - T_{surf}) + \varepsilon^* \cdot \sigma \cdot (T_{ext}^4 - T_{surf}^4) \quad (30)$$

La condició de contorn (equació 30) defineix la transferència de calor entre la superfície de la partició i l'exterior. Al ser l'exterior (entorn) infinitament gran comparat amb una de les parets o el sostre de l'edifici, es compleix la llei de Stefan-Boltzmann.

$$q_{int} = h \cdot (T_g - T_{surf}) + \varepsilon^* \cdot \sigma \cdot (T_g^4 - T_{surf}^4) \quad (31)$$

La segona condició de contorn (equació 31) determina l'existència de transferència de calor per convecció i radiació entre les capes de gas i les particions de l'establiment.

## 5.5. EL CANVI DE MODEL DURANT LA SIMULACIÓ

S'ha introduït en anterioritat el fenomen de canvi de model durant la simulació (figura 12). El procés de canvi de model ve determinat per l'estratègia a escollir per a realitzar la simulació. El programa Ozone permet executar simulacions íntegres d'una o de dues zones o, per altra banda, pot demanar que Ozone executi una simulació mixta [14].

La simulació mixta es basa en el canvi de model de dues zones a una zona on només queda en el sistema la capa superior (la capa de gas calenta o "upper layer"). A continuació s'exposa en què es basa aquesta estratègia, enumerant els criteris que poden provocar el canvi:

- $T_U > T_{FL}$ . La temperatura de la capa superior és molt elevada, provocada per productes de combustió i l'aire que arrossegueu ("entrained air", en anglès). Aquest excés de temperatura pot portar la combustió sobtada generalitzada i, per tant, a la crema de tots els sòlids existents en l'espai confinat.

El simulador té predeterminada aquesta temperatura a 500°C. Aquest és un fenomen que es pot detectar en les simulacions fetes.

- $A_{foc} \geq 0.25 A_f$ . L'àrea de foc és massa gran comparada amb l'àrea de la superfície del terra de l'espai confinat, per tant, ja no es pot considerar foc localitzat. És un fenomen que es detecta en totes les simulacions fetes.

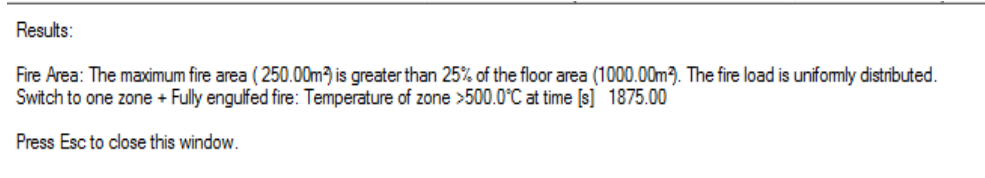


Figura 12 - Mostra en pantalla dels criteris que s'han aplicat durant la simulació. Exposen el canvi de model durant la simulació. Extret del programari Ozone.

- $Z_S < Z_q; T_Z > T_{ignició}$ . Si els gasos que estan en contacte directe amb el fuel tenen una temperatura més elevada que la temperatura d'ignició, el foc s'acabarà propagant per tot el material combustible mitjançant la ignició convectiva (transmesa per el fluid, el gas). La temperatura d'ignició és de 300°C.

Aquesta ignició convectiva pot ser provocada per la capa freda o per la capa calenta si aquesta es troba per sota de l'alçada de l'element combustible que es trobi més amunt.

- $Z_S < 0.2H$  on H és l'alçada de l'edifici. La interfície entre les dues capes disminueix d'alçada provocant el predomini de la capa calenta (superior) i deixant la capa freda (inferior) molt prima. Si es dona aquest fenomen, el model de dues zones no es pot simplificar

Així doncs, si es compleix alguna de les condicions o criteris descrits (figura 13), el simulador realitzarà el canvi de model de dues a una zona on el predomini serà de la capa calenta.

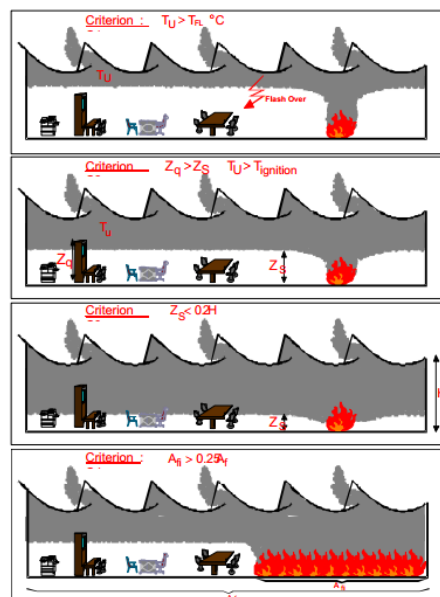


Figura 13 - Els quatre criteris aplicats per Ozone per a generar el canvi de model durant la simulació. Font: [14].

Un cop el programari Ozone analitza i detecta la necessitat d'efectuar un canvi de model, aquest segueix un conjunt de passos per tal d'assegurar la coherència d'aquesta modificació en el sistema.

Suposant un  $t_{canvi}$  com a temps en el qual es produeix el canvi de model, en anterioritat a aquest temps el sistema estava caracteritzat per 11 variables que permetien descriure totalment els gasos de les dues capes existents. Aquestes variables són conegudes gràcies a les equacions així com les restriccions del sistema (equacions 11 a 18).

Quan es produeix el canvi de model a  $t_{canvi}$ , el sistema és modificat, sent aquest caracteritzat per 6 variables. Per tal de fer tal modificació caldrà aplicar dues condicions de contorn sobre el gas (equacions 32 i 33). Aquestes equacions es basen en la conservació de la massa i de l'energia:

$$m_g(t_{canvi}) = m_U(t_{canvi}) + m_L(t_{canvi}) \quad (32)$$

$$E_g(t_{canvi}) = E_U(t_{canvi}) + E_L(t_{canvi}) \quad (33)$$

Finalment, la pressió i temperatura de l'estat inicial del model es poden trobar usant les equacions i restriccions del model d'una zona (equacions 19 a 23).

Un cop el canvi s'ha efectuat les particions que confinen l'espai només es trobaran en contacte amb una única capa que defineix tot l'entorn interior (figura 14). Per tant, el terra i el sostre es trobaran en contacte amb el mateix gas.

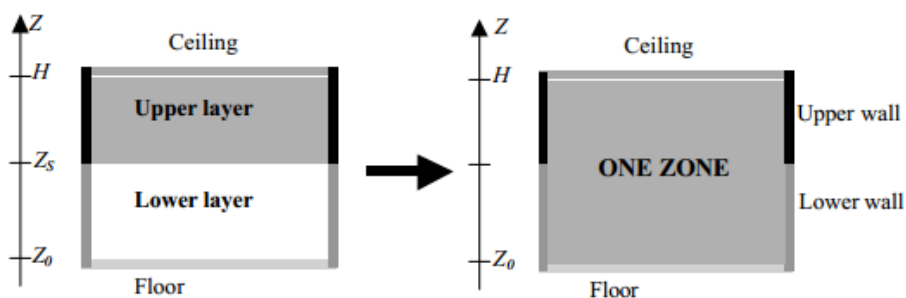


Figura 14 - Canvi de model produït en l'escenari simulat. Font: [14]

## 5.6. MODELITZACIÓ DE LES VENTILACIONS

En totes les simulacions efectuades existeixen ventilacions (o obertures que poden utilitzar-se com a ventilacions dependent de la temperatura o del temps transcorregut).

Totes les ventilacions es poden crear en el simulador aplicant espais buits sobre les particions i es poden accionar de la següent manera:

- **Per temperatura:** mentre el recinte no superi la temperatura estipulada, estaran tancades. Un cop es superi aquesta temperatura s'obriran.

Aquest fenomen podria representar, per exemple, que existeix un sistema de seguretat que obre automàticament les ventilacions a la temperatura fixada o, per

altra banda, que el material del qual està formada la ventilació es trenca a causa de l'absorció d'energia tèrmica (vidres trencats d'una finestra).

- **Per temps transcorregut:** mentre no es superi el temps estipulat, sigui quina sigui la temperatura del recinte, les ventilacions no s'obriran i deixaran passar aire renovat d'oxigen.

Aquest tipus de control pot representar, per exemple, el temps que triguen les dotacions d'extinció a arribar.

Existeixen altres controls que permeten monitoritzar les ventilacions i que permeten un control continu durant la simulació (control constant, lineal i esglaonat).

Per altra banda, Ozone modelitza les ventilacions de forma diferent si aquestes són "verticals" o "horizontals", és a dir, si es troben al sostre o a les parets del recinte. A continuació s'exposa la modelització de ventilacions, la qual tindrà intercanvis convectius i radiants [14].

### 5.6.1. INTERCANVIS CONVECTIUS

El flux de massa que surt per la ventilació es pot trobar utilitzant les següents equacions (equacions 34 i 35):

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho v^2 \quad (34)$$

$$\dot{m}_{ij} = K \cdot b(T \text{ o } t^*) \int_{z_1}^{z_2} \frac{P_1(z)}{R \cdot T_1} \cdot \sqrt{2 \cdot RT_1 \cdot \left(1 - \frac{P_1}{P_2}(z)\right)} dz \quad (35)$$

Essent 1 i 2 els índexs d'origen i destinació del flux,  $z_1$  i  $z_2$  les alçades d'integració (alçada que cobreix l'obertura de la ventilació) i  $b$  el gruix de l'obertura de la finestra. Els subíndexs 'ij' fan referència a si la integració es realitza a la capa superior o inferior (i) i si el flux màssic va de fora del recinte cap a dins o viceversa (j, "in/out").

L'equació 35 està extreta de la integració de la llei de Bernoulli a través de l'obertura de la ventilació [14].

En el supòsit que, en algun punt de l'alçada on es troben les ventilacions, les pressions exterior i interior al compartiment siguin iguals, es subdivideix la ventilació en dues zones diferenciades: una en la qual el flux màssic entra al compartiment i l'altre que permet la sortida del flux cap a l'exterior.

Un altre cas hipotètic que subdivideix l'obertura en dues zones es produeix quan, en un model de dues zones, la separació de les dues capes es troba a l'alçada de l'obertura i, per tant, és necessària la separació per estudiar les dues zones.

A part del flux màssic, també s'estudia l'energia que es desprèn dels fluxos (equacions 36, 37 i 38):

**Model de dues zones**

$$q_{ij} = c_p(T_i) \cdot m_{ij} \cdot T_i \tag{36}$$

$$q_{ij} = c_p(T_j) \cdot m_{ij} \cdot T_j \tag{37}$$

Aquestes dues equacions (36 i 37) representen de forma genèrica els 4 possibles càlculs que es poden efectuar doncs, de la mateixa manera que s'ha mostrat anteriorment (equacions 34 i 35), "i" pot prendre el valor de capa superior o inferior i "j" pot prendre el valor del sentit del flux (entra o surt del compartiment).

**Model d'una zona**

$$q_j = c_p(T_j) \cdot m_j \cdot T_j \tag{38}$$

En aquest cas (equació 38) només es disposa d'una zona i, per tant, es perd el subíndex que fa referència a la capa i dos càlculs. De la mateixa manera, "j" pren el valor del sentit del flux.

En el cas que el flux sigui sortint,  $T_j$  serà la temperatura interior del gas; el cas contrari serà la temperatura exterior del recinte.

**5.6.2. INTERCANVIS RADIANTS**

El sistema fa ús de l'equació de Stefan-Boltzmann (introduïda amb anterioritat) [16].

Per a les ventilacions es considera que només existeix intercanvi radiant (equació 39) per sota de l'alçada en què la pressió dins i fora del compartiment és igual. Per sobre d'aquest nivell els gasos surten a l'exterior i la temperatura exterior del compartiment és igual a la existent dins el recinte confinat. Aquesta suposició determina que  $T_{int}^4 = T_{ext}^4$ , així doncs, el terme radiant serà nul.

$$q_{rad} = \epsilon^* \cdot \sigma \cdot (T_{int}(z)^4 - T_{out}^4) \tag{39}$$

**5.7. LA MODELITZACIÓ DEL FOC EN OZONE**

Per tal de definir el foc del sistema que es vulgui simular cal establir diversos paràmetres, molts d'ells relacionats entre si.

- **RHR/HRR (Rate of Heat Release):** és la quantitat d'energia alliberada pel foc per cada segon. Generalment es mesura en W o KW, tot i que en aquest cas es deixa en funció de la superfície  $\left(\frac{kW}{m^2}\right)$ , per la qual cosa serà un valor que dependrà de la geometria exterior del combustible. La taxa de calor alliberada es calcula a partir del producte de la velocitat de pèrdua de massa per la calor de combustió efectiva.



Es parla de combustió efectiva perquè aquesta és la que s'allibera durant el període de temps en què es produeix la flama. Es calcula mitjançant l'equació 40:

$$\dot{q}'' = \dot{m}'' \cdot \Delta H_{c,eff} \quad (40)$$

- **MLR** (Mass loss rate): és la velocitat de pèrdua de massa, la qual expressa la quantitat de massa per unitat de temps que vaporitza. Es calcula mitjançant l'equació 41, que és una estimació per a materials que produeixen carbó [16].

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{q}_f'' + \dot{q}_g'' + \dot{q}_w'' - \dot{q}_{rr}''}{L_g} \quad (41)$$

Les potències tèrmiques transferides per la flama (f), pels gasos de la capa (g) i les parets del voltant (w) al cos així com la pèrdua tèrmica de potència del cos per transferència radiant (subíndex rr) intervenen en l'equació. Per altra banda,  $L_g$  és el calor de gasificació ( $kJ \cdot kg^{-1}$ ).

Aquesta relació (equació 41) és la relació física teòrica que permet calcular el MLR (mass loss rate) en qualsevol cas. En el cas concret del programari Ozone no s'utilitza aquesta relació per tal de determinar aquest valor al llarg del temps, sinó que és directament determinada per l'usuari a partir de la definició de la corba de HRR (directament relacionada amb el MLR).

- **Calor de combustió** ( $\Delta H_{c,eff}$ ): és un terme depenent de molts factors (com temperatura del gas, model d'emmagatzematge del combustible o temps) tot i que s'assumeix constant utilitzant l'equació 40.
- **Àrea de foc** ( $A_{fi}$ ): és l'àrea on el combustible és cremat durant l'incendi. Generalment en qualsevol incendi depèn del temps. La màxima àrea de foc doncs, és la màxima àrea on hi ha combustible en l'espai confinat, sent un terme important en les distincions que es faran en les simulacions.

### 5.7.1. LA QUÍMICA UTILITZADA PER OZONE

El programari Ozone efectua els dos següents balanços (equacions 42 i 43)[14]:

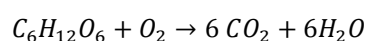
$$1\text{kg fuel} + 1.27 \text{ kg oxigen } (O_2) = 2.27 \text{ kg productes de combustió} + H_c \quad (42)^5$$

Equació que porta al balanç d'oxigen següent:

$$\dot{m}_{ox} = \dot{m}_{in} + \dot{m}_{out} - 1.27 \dot{m}'' \quad (43)$$

Es suposa que un 23% en massa del gas en l'instant inicial és oxigen, el qual correspon al 21% en volum del gas. Aquest percentatge disminueix degut a les pèrdues que es produeixen per combustió.

<sup>5</sup> Aquesta equació representa la combustió estequiomètrica de la fusta considerada com  $C_6H_{12}O_6$ . [18].



### 5.7.2. EL MODEL DE COMBUSTIÓ

El programari permet escollir entre tres models de combustió diferents [14]:

- **"No combustion model"**: model en el qual no es produeix la combustió. L'existència d'oxigen dins el compartiment no afecta.
- **"External flaming combustion model"**: tota la càrrega de foc es converteix en gasos dins el compartiment, però només una part d'ella ofereix energia.
- **"Extended fire duration combustible model"**: aquest model suposa que l'alliberament de massa està limitat per la quantitat d'oxigen disponible en el recinte confinat en cada instant de temps. Tot combustible crema dins el recinte confinat.

Mentre hi hagi oxigen disponible en el compartiment, la combustió està controlada pel combustible i tota la pèrdua de massa allibera energia.

Un cop no hi ha oxigen, el foc és controlat per l'efecte de les ventilacions. En aquest cas, la massa perduda pel foc és controlada per la massa d'oxigen que entra per les ventilacions. Tota la massa pirolitzada es converteix en energia, de tal manera que la taxa de piròlisi és proporcional a l'oxigen que entra al compartiment per les ventilacions.

En aquest model no s'assumeix cap tipus de combustió externa, tota la càrrega de foc dona la seva energia dins el compartiment. És el model que s'ha utilitzat en aquest projecte.

### 5.8. LA MODELITZACIÓ DE LES MESURES DE PROTECCIÓ PER OZONE

El programari disposa de diverses opcions de protecció actives per al recinte a simular. Aquestes, com es mostra a la taula 6, tenen un coeficient que intervé directament en el càlcul de la densitat de càrrega de foc, la qual depèn de la màxima àrea de risc de foc.

Quan alguna d'aquestes mesures és activada, el coeficient associat intervinrà en el càlcul disminuint el valor, doncs el coeficient sempre és un terme inclòs en l'interval [0,1], essent 1 quan la mesura no està activada (no afecta, doncs multiplica la densitat de càrrega per 1) i menor a 1 quan s'activa [15].

Taula 6 - Mesures actives disponibles a Ozone. Font:[15]

Mesures actives disponibles	$\gamma_{ni}$
Sistema automàtic de ruixadors d'aigua	0,61
Subministrament independent d'aigua (1)	0,87
Subministrament independent d'aigua (2)	0,7
Detecció automàtica de foc per calor	0,87
Detecció automàtica de foc per fum	0,73
Alarma automàtica de transmissió d'informació al cos de bombers	0,87

Brigada de bombers preparada	0,61
Brigada de bombers existent, però fora de lloc	0,78

La metodologia emprada per modelitzar la densitat de càrrega de foc depenent de les mesures de protecció existents (equació 44) és:

$$q_{f,d} = \gamma_{q1} \cdot \gamma_{q2} \cdot \prod_i \gamma_{ni} \cdot m \cdot q_{fk} \quad (44)$$

*Nota: en vermell la intervenció de les mesures actives*

Per altra banda, hi ha dos factors dels quals depèn l'equació:  $\gamma_{q1}$  i  $\gamma_{q2}$ .

- $\gamma_{q1}$ : factor que determina la influència de l'àrea de foc sobre la densitat de càrrega de foc. La influència d'aquest factor es calcula segons l'equació 45.

$$\gamma_{q1} = 1,688 \cdot \ln(A_f) + 0,5752 \quad (45)$$

- $\gamma_{q2}$ : factor que determina el perill d'inici/ activació d'un incendi. Ve tabulat i es pot observar a la taula 7.

Taula 7 - Taula de relació del factor  $\gamma_{q2}$  (perill d'activació). Font:[15]

Perill d'activació d'un incendi	$\gamma_{q2}$
Baix	0,85
Mitjà	1
Alt	1,2
Molt alt	1,4
Imminent	1,6

## 6. MODEL DEL ESCENARI SIMULAT PER OZONE

### 6.1. DEFINICIÓ DE L'ESCENARI

El model utilitzat per tal de realitzar les simulacions es basa en l'escenari utilitzat per els Bombers de la Generalitat basat en els plànols representats en les figures 15 i 16.



Figura 15 - Plànol de l'establiment sense ventilació. Font: [19]





Figura 16 - Plànol de l'establiment que disposa de ventilació (per a Risc Baix 2). Font: [19]

### 6.1.1. GEOMETRIA

L'escenari amb el qual es treballa representa una nau industrial diàfana de 1000 m<sup>2</sup> de superfície (50 x 20m), la qual assumeix una càrrega de foc uniforme en tota la seva superfície.

Tot i que el plànol està basat en un edifici amb una coberta a dues aigües (model 2 de la figura 8), la modelització de l'establiment en Ozone s'ha efectuat mitjançant coberta plana (model 3 de la figura 8). Aquest canvi s'ha realitzat per tal d'implementar, en cas que sigui necessari, les obertures corresponents als exutoris. L'alçada mitjana de la nau és de 6,5 metres [19].

La nau industrial disposa de dues portes 3x3 m (9 m<sup>2</sup>) en façanes oposades i dues obertures de 4,2x1 m (4,2 m<sup>2</sup>) també en façanes oposades, aquestes últimes obertures situades a la part elevada del sector a mode de finestres.

### 6.1.2. MATERIALS

L'elecció de materials per a l'escenari queda determinada per materials ja preconfigurats pel programari Ozone. Els materials escollits per a caracteritzar l'estructura són [19]:

- **Maó estàndard de 20 cm de gruix.** És el material utilitzat per a definir la composició de les parets de l'edifici, tant les façanes d'accés com les parets mitgeres (proprietats en la figura 17).

	Material	Thickness	Unit mass	Conductivity	Specific Heat	Rel Emissivity	Rel Emissivity
		[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[J/kgK]	Hot Surface	Cold Surface
Layer 1	Normal Bricks	20	1600	0,7	840	0,8	0,8

**Figura 17** - Propietats del maó estàndard, utilitzat per a definir les parets mitgeres i les façanes d'accés. Extret del programa Ozone. Font adicional: [20].

- **Formigó estàndard de 20 cm de gruix.** Material utilitzat per tal de definir la composició del sòl de l'edifici (propietats del material en la figura 18).

	Material	Thickness	Unit mass	Conductivity	Specific Heat	Rel Emissivity	Rel Emissivity
		[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[J/kgK]	Hot Surface	Cold Surface
Layer 1	Normal weight Concrete [EN1994-1-2]	20	2300	1,6	1000	0,8	0,8
Layer 2							

**Figura 18** - Propietats del formigó, utilitzat per a definir el sòl de l'edifici. Extret del programa Ozone. Font adicional: [20]

- **Material compost tipus sandvitx** amb capes externes d'acer (EN 1994 - 1 -2) de 0,2 cm de gruix i aïllament interior de llana de roca de 0,037 W/mK de conductivitat i 5 cm de gruix. Usat per tal de definir la composició de la coberta (veure composició i propietats de cada capa del material en la figura 19).

	Material	Thickness	Unit mass	Conductivity	Specific Heat	Rel Emissivity	Rel Emissivity
		[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[J/kgK]	Hot Surface	Cold Surface
Layer 1	Steel [EN1994-1-2]	0,2	7850	45	600	0,8	0,8
Layer 2	Glass wool & Rock wool	5	60	0,037	1030	0,8	0,8
Layer 3	Steel [EN1994-1-2]	0,2	7850	45	600	0,8	0,8
Layer 4							

**Figura 19** - Capes del panell sandvitx amb les propietats de cadascuna. Utilitzat per definir el sostre de l'edifici. Extret del programa Ozone. Font adicional: [20].

### 6.1.3. OBERTURES

Les obertures es poden caracteritzar de dues formes diferents depenent del compliment o no de l'edifici amb la normativa UNE23585. Un exemple del disseny de les obertures es pot observar en la figura 20.

	Sill Height Hi	Soffit Height Hs	Width	Variation	Adiabatic
	[m]	[m]	[m]		
Opening 1	4	5	2,5	Time Dependent	no
Opening 2	0	3	3	Time Dependent	no
Opening 3					

**Figura 20** - Disseny de les obertures per a les façanes accessibles (Wall 1 i Wall 3). Extret del Programari Ozone. Font adicional: [20].

### Les ventilacions de l'establiment no compleixen amb la normativa UNE 23585

Les obertures actuen a mode de ventilació a causa de dos motius [19]:

- **Intervenció de bombers:** aquest esdeveniment provoca l'obertura d'una porta un cop es superen els 900 segons de l'inici de l'incendi.
- **Trencament d'elements degut al xoc tèrmic:** aquest esdeveniment es produeix en funció de la temperatura dels gasos que contacten amb les finestres. Es considera que s'assoleix una temperatura suficient per a trencar el material que conformen les finestres als 300 segons de l'inici de l'incendi [21].

A la pràctica, les simulacions que s'executin amb aquest perfil d'obertures s'anomenaran "sense ventilació forçada o sense exutoris".

### Les ventilacions de l'establiment compleixen amb la normativa UNE 23585

Les obertures s'obren segons els paràmetres establertes en la normativa. Totes tres obertures (en aquest cas, degut al compliment de la normativa, s'afegeixen exutoris a la coberta) trigaran dos minuts en obrir-se automàticament. Els dos minuts estan compostos per 60 segons de temps de detecció mitjançant sensors i 60 segons de temps d'obertura pneumàtica de les obertures [19].

A la pràctica, les simulacions que s'executin amb aquest perfil d'obertures s'anomenaran "amb ventilació forçada o amb exutoris".

## 6.1.4. DEFINICIÓ DE LA CÀRREGA DE FOC DE L'INCENDI

### Càrrega de foc de l'incendi

S'estipula segons els límits establerts dins la normativa RSCIEI [5]. S'utilitza la càrrega de foc ponderada i corregida límit, aportada segons la normativa (taula 8).

Taula 8 Càrrega de foc ponderada i corregida utilitzada en les simulacions. Extret d'Ozone.

Nivell de Risc	Càrrega de foc [ $MJ/m^2$ ]
Risc 1	425
Risc 2	850
Risc 3	1275

### Taxa de creixement de l'incendi

S'entén com a taxa de creixement de l'incendi el temps que triga a evolucionar fins a obtenir un incendi completament desenvolupat.

S'estipula la fase de creixement predeterminada del programari Ozone. Per als nivells de risc 1 i 2 s'executa el nivell "ràpid" i per al nivell de risc 3 s'executa el nivell de fase de creixement "mitjà" (veure taula 9).

Taula 9 - Taxes de creixement emprades en el treball. Extret d'Ozone

Nivell de Risc	Taxa de creixement [s] <sup>6</sup>
Risc 1	300
Risc 2	300
Risc 3	150

### Taxa d'alliberament de calor (RHR)

És la potència per unitat de superfície que allibera el material combustible. S'ha utilitzat una potència de  $1250 \text{ kW/m}^2$  per als escenaris de risc baix i  $6000 \text{ kW/m}^2$  per als escenaris de risc alt tal i com es pot observar en la taula 10.

Taula 10 - Taxa d'alliberament de calor depenent del nivell de risc de l'escenari. Extret d'Ozone

Nivell de Risc	RHR [ $\text{kW/m}^2$ ]	Equivalència en Ozone <sup>7</sup>
Risc 1	1250	0,5m de palets apilats cremant
Risc 2	1250	0,5m de palets apilats cremant
Risc 3	6000	3m de palets apilats cremant

### Màxima àrea d'incendi

S'ha analitzat el 25%, 50%, 75% i 100% de l'àrea per a cada cas. En l'explicació del model de sensibilitat s'exposa el fet de seguir amb aquests percentatges en l'estudi, encara que canviï la superfície de la nau.

### Alçada del combustible

L'alçada del combustible és de 0,5m per al risc baix (nivells de risc 1 i 2) i d'1 metre per al nivell de risc mitjà

#### 6.1.5. MESURES DE PROTECCIÓ UTILITZADES

S'estipulen una sèrie de mesures per tal d'actuar envers l'incendi [15] [19]:

- Addició del sistema de detecció de fums
- Recorreguts d'evacuació segurs
- Mitjans de protecció contra incendis
- Servei d'extinció d'incendis

<sup>6</sup> Altrement anomenats velocitat de creixement "normal" (300s) i "ràpida" (150s).

<sup>7</sup> El valor es pot posar de forma exacte aplicant l'equivalència en Ozone. És a dir, per executar la taxa d'alliberament desitjada en qualsevol dels tres casos, s'ha d'escollir la opció d'Ozone predeterminada, que en el document l'anomenem "equivalència en Ozone".



A més a més, en el cas que ens trobem en una configuració de l'escenari on les obertures compleixin amb la normativa (cas de ventilació forçada), s'afegeix la següent mesura activa al sistema:

- Sistema d'escapament de fums.

Per altra banda, en cap cas s'acciona cap mena de dispositiu d'extinció per aigua com poden ser els ruixadors automàtics, doncs una de les comprovacions que es vol efectuar en aquest projecte és quins resultats s'obtenen sense aquest mecanisme degut a l'alt cost d'implementació que tenen i l'exigència tècnica de la instal·lació.

### 6.1.6. ELEMENT ESTRUCTURAL UTILITZAT

L'estudi del comportament de l'element estructural en les simulacions també s'ha realitzat en Ozone, a diferència dels anteriors estudis fets pel cos de Bombers<sup>8</sup>. S'ha realitzat de la següent forma:

#### Elecció del tipus de biga i espessor

S'ha escollit de la taula 11 el factor de secció 130. S'ha utilitzat la taula de disseny a T = 550°C per tal de complir amb el criteri de col·lapse exposat en anterioritat (veure apartat 4.7. del treball).

Taula 11 - Taula de disseny estructural a T = 550°C segons ENV 13381 - 4. Font: [5]

Acer	Classificació de resistència al foc							
	R15	R30	R45	R60	R90	R120	R180	R240
Factor de secció $\frac{A_m}{V} [m^{-1}]$	Guix mínim [mm] per a mantenir la temperatura per sota de la temperatura de disseny de 550°C.							
105	10	10	10	10	16	22	33	45
110	10	10	10	11	17	22	34	46
115	10	10	10	11	17	23	35	47
120	10	10	10	11	17	23	35	47
125	10	10	10	11	18	24	36	48
130	10	10	10	12	18	24	36	49
135	10	10	10	12	18	24	37	50
140	10	10	10	12	18	25	37	50

A partir de la informació donada per la taula 5 (pàgina 17), s'ha procedit a l'estudi dels models de resistència R90 i R120, doncs són els models exigits pel RSCIEI.

Per altra banda, s'ha mantingut les bigues R90 i R120 pel nivell de risc 3, tot i que per la normativa no està acceptada la resistència R90. El tipus de biga escollit per a les simulacions és la IPE600 reforçada amb protecció de morter perlític.

<sup>8</sup> L'estudi realitzat pel cos de bombers de la Generalitat es va portar a terme mitjançant ELEFIR. Aquest programa, al no ser d'accés lliure i no disposar de llicències docents, no ha estat accessible per a realitzar aquest treball.

Aquest material, usat com a protecció estructural té les propietats exposades a la taula 12:

Taula 12 - Propietats de la protecció estructural. Extret d'Ozone.

Propietats del morter perlític		
Densitat [ $kg/m^3$ ]	Calor específic [ $J/kg \cdot K$ ]	Conductivitat tèrmica [ $W/mK$ ]
350	1200	0,12

## 6.2. VALORS D'ESTUDI ESCOLLITS I CRITERIS EMPRATS

L'estudi d'aquest projecte es basa en l'avaluació de les temperatures crítiques que s'obtenen dins l'escenari mitjançant les corbes característiques del sistema.

La primera temperatura a avaluar és la pròpia de la capa calenta del sistema, que és la capa que acabarà predominant després que el simulador executi el canvi de model de dues zones a una zona. El model d'una zona es basarà en la seva totalitat en la capa calenta. Per a obtenir la temperatura crítica caldrà aconseguir la temperatura més elevada al llarg de la simulació que, per altra banda, serà la temperatura més elevada a la que estarà sotmesa l'escenari.

Per altra banda, la segona temperatura que s'estudia és la temperatura que assoleix l'acer estructural. Aquesta dada és important per tal de comprovar si l'estructura arriba a la temperatura de col·lapse estructural o no.

Com ja s'ha comentat amb anterioritat (veure apartat 4.7. del treball), el valor llindar (o threshold number, en anglès) per al col·lapse és  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  [1]. Evidentment, aquest valor pot oscil·lar doncs l'acer és un element que fluctua molt, depenent de la seva composició.

Es realitzarà la distinció en les taules de resultats observada en la taula 13 (que ja és el criteri utilitzat en altres estudis realitzats per el cos de bombers) [1]

Taula 13 - Llegenda utilitzada per a classificar l'estat de col·lapse en les taules. Font: [1]

Llegenda de colors - Criteri de col·lapse		
	$T_{\text{màx}} > 550^{\circ}\text{C}$	Col·lapse molt provable en la majoria de perfils normalitzats.
	$500 < T_{\text{màx}} < 550^{\circ}\text{C}$	Col·lapse poc provable en la majoria de perfils normalitzats. Possible col·lapse dels pilars
	$T_{\text{màx}} < 500^{\circ}\text{C}$	Col·lapse improbable

Com ja s'ha comentat en l'apartat referent a l'abast del projecte (apartat 2.2.), l'anàlisi de temperatures només s'efectuarà a les simulacions de Risc 1,2 i 3.

Finalment, cal recalcar que el programari Ozone pot proporcionar altres dades que caracteritzen l'incendi com pot ser la zona d'elevació de la interfície entre les dues capes (veure figura 10), l'evolució de l'àrea de foc, així com la pressió i l'evolució del comburent al llarg de l'incendi.

També es pot obtenir la temperatura a la qual es troba la capa freda, dada poc rellevant doncs a causa de l'estratègia de simulació per model combinat, aquesta deixa de computar un cop es produeix el canvi al mode d'una zona.

### 6.3. RESULTATS DE L'ESCENARI BASE

A continuació es mostren els resultats de les simulacions sobre els nivells de risc 1, 2 i 3 (taules 14 i 15). Per a la realització d'aquest conjunt de simulacions s'han aplicat totes les condicions del sistema exposades amb anterioritat segons el nivell de risc i la presència o no de sistemes de ventilació forçada (veure en la seva totalitat l'apartat 6.1).

#### Temperatures de l'acer estructural

Taula 14 - Temperatura màxima (°C) registrada sobre l'acer estructural amb protecció R90

Nivell de Risc		Sense exutoris				Amb exutoris			
		25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
BAIX	1	292,62	466,59	584,88	670,04	220,14	359,99	467,17	549,99
	2	410,12	669,99	730,45	729,88	360,11	549,92	669,62	724,81
MIG	3	584,9	729,6	729,58	729,55	467,67	669,87	718,73	728,97

Taula 15 - Temperatura màxima (°C) registrada sobre l'acer estructural amb protecció R120

Nivell de Risc		Sense exutoris				Amb exutoris			
		25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
BAIX	1	248,15	408,5	526,99	615,2	184,43	307,28	409,39	491,75
	2	410,12	615,59	679,35	677,23	307,38	491,67	615,01	669,52
MIG	3	527,01	676,92	677,26	677,26	409,87	615,23	675,29	675,55

#### Temperatures de la capa calenta de gas

Taula 16 - Temperatura màxima (°C) registrada de la capa calenta de gas

Nivell de Risc		Sense exutoris				Amb exutoris			
		25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
BAIX	1	590	711,99	794,975	851,57	536,28	642,07	714,77	770,05
	2	716,97	851,79	932,33	945,71	642,177	769,884	850,7	908
MIG	3	724,99	932,5	945,73	>700°C	714,83	850,75	931,68	943,99

Aquest conjunt de simulacions (taules 14, 15) permeten de forma visual observar que l'estructura dels escenaris amb exutoris reben menys transferència de calor, per la qual cosa tenen menys temperatura. Les simulacions subratllades no han arribat a la fase de decreixement.

Observant els resultats, es pot afirmar que els escenaris amb exutoris obtenen un perfil de temperatures més baix, reduint de forma dràstica els valors de temperatures de l'acer estructural i de la capa calenta del sistema. Així doncs, s'observa una eina molt útil a mode de complement per al disseny de naus industrials de tipus A. Mitjançant els valors, es pot afirmar que els escenaris amb exutoris obtenen un perfil de temperatures més baix, reduint de forma dràstica els valors de temperatures de l'acer estructural i de la capa calenta del sistema. Així doncs, s'observa una eina molt útil a mode de complement per al disseny de naus industrials de tipus A.

Així doncs, es pot assegurar que els escenaris de Risc baix 1 amb exutoris (amb un escenari del perfil exposat) no col·lapsaran en cap cas (temperatura molt menor al límit establert). Per altra banda, s'observa que l'escenari de Risc 2 amb protecció R120 tampoc col·lapsarà, però caldrà veure en l'estudi de sensibilitat si l'escenari de 100% de superfície cremant es manté en tots els casos per sota de la temperatura límit.

Finalment, l'escenari de risc 3 sense mesures actives addicionals de protecció (com poden ser els ruixadors automàtics) pateix perfils de temperatures molt elevats, provocant el col·lapse estructural en tots els casos menys quan l'incendi ocupa com a màxim un 25% de la superfície de l'establiment.

#### 6.4. INTRODUCCIÓ A L'ESTUDI DE SENSIBILITAT

Els resultats de les simulacions de l'escenari base fan evident la necessitat de multiplicar els escenaris per tal d'observar en quin sentit afecten les modificacions que es poden fer sobre l'escenari patró. Caldrà també observar si alguna de les modificacions permet disminuir en gran mesura la temperatura tant de l'acer com de la capa de gas així trobar escenaris addicionals que no col·lapsin.

Tècnics especialistes mitjançant resultats propis i la seva experiència exposen [1]:

- Les condicions geomètriques de la configuració poden fer variar els resultats de la corba.
- 1000 m<sup>2</sup> és una situació molt concreta i no és extrapolable a totes les superfícies.
- Incrementos importants per a risc 3 denoten la necessitat d'efectuar anàlisis a partir de paràmetres que poden afectar de manera important.

Així doncs, els paràmetres alterats per tal de realitzar l'anàlisi de sensibilitat són:

- **Alçada de l'establiment.** Cal comprovar si diferents alçades poden alterar o no la temperatura de la capa calenta i de l'estructura. En cas afirmatiu, caldrà analitzar si hi ha configuracions que faciliten o no el col·lapse estructural de l'edifici.

A priori, basant-se en la teoria expressada en anterioritat, l'alçada pot facilitar o retardar el punt de "flashover", motiu que fa pensar que pot ser un factor important a tenir en compte.

S'ha aplicat modificacions del  $\pm 20\%$  sobre l'alçada de l'escenari base.

- **Disposició en alçada de les ventilacions de l'habitable.** En aquest cas les ventilacions de les parets (finestres). Cal observar si la disposició en alçada de les ventilacions pot ser un factor determinant que pugui disminuir la temperatura estructural i de la capa calenta.

S'ha aplicat modificacions del  $\pm 20\%$  sobre l'alçada de les ventilacions del model d'alçada efectuat en les simulacions prèvies.

- **Superfície en planta de l'escenari.** Tal i com s'ha explicat en anterioritat, els resultats amb la superfície en planta de l'escenari base és una situació no extrapolable i, per tant, caldrà observar els resultats per a altres superfícies.

S'ha aplicat modificacions del  $\pm 20\%$  sobre la superfície total.

- **Taxa de creixement del sistema.** les simulacions prèvies havien estipulat una fase de creixement concreta segons la fase risc en la que es trobava.

S'ha decidit realitzar les simulacions per a totes les condicions de taxa de creixement que es poden configurar amb Ozone ('Lent', 'mitjà', 'ràpid' o 'ultra ràpid') indistintament de la configuració de risc, entenent que la taxa de creixement depèn en gran mesura del combustible que cremi i sabent que el nivell de risc és controlat per un ventall de paràmetres més ampli.

## 7. ANÀLISI DE SENSIBILITAT: CASOS I RESULTATS

Els resultats mostrats són els valors més elevats que presenten les corbes característiques de cada escenari, aplicant les modificacions introduïdes en l'apartat 6.4.

S'estudiarà, de la mateixa manera que s'efectua en l'apartat 6.3. dos tipus de temperatures:

- **Temperatura de la capa calenta** (Capa de fums): s'observarà el comportament de la temperatura de la capa calenta, la qual aportarà la temperatura de gas més elevada del recinte i, per tant, la més crítica.
- **Temperatura de l'acer estructural**: s'observarà la temperatura a la qual arriba l'estructura que sosté l'establiment, comparant aquesta temperatura amb la temperatura de col·lapse (veure apartat 4.7.).<sup>9</sup>

Per tal de poder identificar l'estat estructural de cada simulació, s'ha seguit el codi de colors establert en la llegenda (veure apartat 6.2.).

Per altra banda, s'ha calculat la desviació percentual de cada escenari enfront el cas base (en els casos que és possible), podent observar quins factors generen més variació de resultats i, per tant, quins paràmetres poden ajudar a disminuir (si existeix una variació negativa) la temperatura de la capa de fums i la temperatura de l'acer estructural. Totes les variacions superiors al 5% es troben senyalitzades en vermell per a la millor identificació.

Finalment, cal recalcar que a causa de la capacitat de computació d'Ozone, el temps màxim de simulació és de 16000 segons. Aquest fet provoca que certes simulacions no continguin la seva etapa de decreixement (total o parcial). Aquest fet però, en cap cas ha provocat problemes severos sobre la utilitat dels resultats obtinguts doncs en totes les simulacions que manquen de fase de decreixement s'ha obtingut temperatures superiors a la de col·lapse i, per tant, permeten descartar-los completament com a casos escenaris factibles.

---

<sup>9</sup> A l'annex 1 i 2 es podran observar totes les gràfiques que representen els escenaris simulats i la informació aportada a les conclusions. D'aquestes gràfiques s'han extret les temperatures més elevades.

## 7.1. RESULTATS PER A RISC 1

A continuació es mostren els valors obtinguts de temperatura màxima obtinguts per la capa calenta (de fums) de cada sistema, la temperatura màxima suportada per l'acer estructural i les desviacions pertinents respecte a l'escenari patró.

### 7.1.1. TEMPERATURES DE L'ACER ESTTRUCTURAL AMB PROTECCIÓ R120

**Taula 17** - Valors de temperatures màximes assolides (°C) per l'acer estructural en l'escenari de risc 1 i protecció perlítica R120.

Risc 1 – IPE 600 – protecció R120 <sup>10</sup>								
Tipus de Simulació	Amb exutoris				Sense exutoris			
	25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
Cas patró	184,43	307,28	409,39	491,75	248,5	408,5	526,99	615,2
Ventilacions -20%	185,02	317,63	417,75	499,12	255,65	417,99	533,98	616,71
Ventilacions +20%	180,14	300,47	401,92	484,67	242,71	401,14	520,18	609,66
Alçada edifici -20%	193,82	321,03	427,42	511,45	259,68	425,87	546,73	636,54
Alçada edifici +20%	178,16	296,53	393,19	474,01	238,51	394,88	509,35	596,18
Creixement Lent	192,26	312,18	379,58	493,64	251,71	410,66	528,24	614,88
Creixement ràpid	181,86	306,01	367,75	490,5	249,33	410,05	527,51	615,24
Creixement Ultra ràpid	184,05	306,5	407,94	490,96	250,39	409,97	526,9	614,77
Superfície -20%	167,82	280,04	377,99	459,97	228,52	380,89	500,69	585,91
Superfície +20%	198,42	328,01	451,11	512,12	263,15	429,96	546,39	616,31

A continuació es mostren les variacions de cada temperatura respecte l'escenari patró (taula 18).

<sup>10</sup> Cal recordar que els percentatges 25,50, 75 i 100% sota els títols "amb exutoris" i "sense exutoris" fan referència al percentatge d'àrea d'incendi sobre el total d'àrea de la nau industrial.

Taula 18 - Valors de les desviacions de les temperatures màximes assolides (°C) per l'acer estructural segons les simulacions de risc 1 i protecció perlítica R120.

Risc 1 – IPE 600 – protecció R120 – desviacions (%)								
Tipus de Simulació	Amb exutoris				Sense exutoris			
	25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
Cas patró	0	0	0	0	0	0	0	0
Ventilacions -20%	0,320	3,368	2,042	1,499	2,877	2,323	1,326	0,244
Ventilacions +20%	-2,3260	-2,2162	-1,824	-1,44	-2,329	-1,802	-1,292	-0,900
Alçada edifici -20%	5,091	4,475	4,404	4,000	4,500	4,252	3,746	3,469
Alçada edifici +20%	-3,400	-3,500	-3,957	-3,607	-4,020	-3,310	-3,347	-3,092
Creixement Lent	4,245	1,594	7,282	0,384	1,292	0,529	0,237	0,052
Creixement ràpid	-1,393	-0,4133	-10,17	-0,254	0,334	0,379	0,099	0,007
Creixement Ultra ràpid	-0,206	-0,254	-0,354	-0,161	0,761	0,360	-0,017	-0,076
Superfície -20%	-9,006	-8,865	-7,669	-6,462	-8,040	-6,759	-4,990	-4,761
Superfície +20%	7,586	6,746	10,191	4,142	5,896	5,253	3,681	0,180

### 7.1.2. TEMPERATURES DE L'ACER ESTRUCTURAL AMB PROTECCIÓ R90

Taula 19 - Valors de temperatures màximes assolides (°C) per l'acer estructural en l'escenari de risc 1 i protecció perlítica R90.

Risc 1 – IPE 600 – protecció R90								
Tipus de Simulació	Amb exutoris				Sense exutoris			
	25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
Cas patró	220,14	359,99	467,17	549,99	292,62	466,59	584,88	670,04
Ventilacions -20%	220,8	368,5	472,94	554,05	299,89	472,79	588,42	671,36
Ventilacions +20%	215,61	353,7	461,36	545,26	286,59	401,14	520,18	667,55
Alçada edifici -20%	231,12	376,18	486,66	570,93	306,41	485,97	606,15	691,46
Alçada edifici +20%	208,95	344,82	449,02	530,54	280,53	449,93	565,41	649,46
Creixement Lent	229,18	364,69	441,28	551,3	296,33	468,54	585,91	670,97
Creixement ràpid	215,19	357,38	431,22	548,44	292,51	466,51	584,39	669,54
Creixement Ultra ràpid	214,37	356,21	465,25	548,99	291,89	465,58	583,4	668,8



<b>Superfície -20%</b>	200,89	332,26	438,88	523,25	270,17	440,23	562,58	648,36
<b>Superfície +20%</b>	234,73	378,81	503,08	564,72	310	484,26	598,36	673,97

A continuació es mostren les variacions de cada temperatura respecte l'escenari patró (taula 20).

**Taula 20** - Valors de les desviacions de les temperatures màximes assolides (°C) per l'acer estructural segons les simulacions de risc 1 i protecció perlítica R90.

<b>Risc 1 – IPE 600 – protecció R90 – desviacions (%)</b>								
<b>Tipus de Simulació</b>	<b>Amb exutoris</b>				<b>Sense exutoris</b>			
	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>
<b>Cas patró</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Ventilacions -20%</b>	0,299	2,364	1,235	0,738	2,485	1,330	0,605	0,197
<b>Ventilacions +20%</b>	-2,058	-1,747	-2,445	-1,586	-2,061	-14,03	-11,06	-0,371
<b>Alçada edifici -20%</b>	4,98	4,497	5,483	4,708	4,712	4,154	3,637	3,197
<b>Alçada edifici +20%</b>	-5,083	-4,214	-7,735	-7,074	-4,132	-7,416	-3,329	-3,071
<b>Creixement Lent</b>	4,107	1,306	-1,724	3,913	1,268	0,418	0,176	0,1389
<b>Creixement ràpid</b>	-2,2486	-0,725	-2,28	-0,519	-0,038	-0,017	-0,084	-0,075
<b>Creixement Ultra ràpid</b>	-2,621	-1,05	7,89	0,1	-0,249	-0,216	-0,253	-0,185
<b>Superfície -20%</b>	-8,744	-7,703	-5,668	-4,689	-7,672	-5,649	-3,813	-3,236
<b>Superfície +20%</b>	6,627	5,228	14,628	7,926	5,939	3,787	2,305	0,587

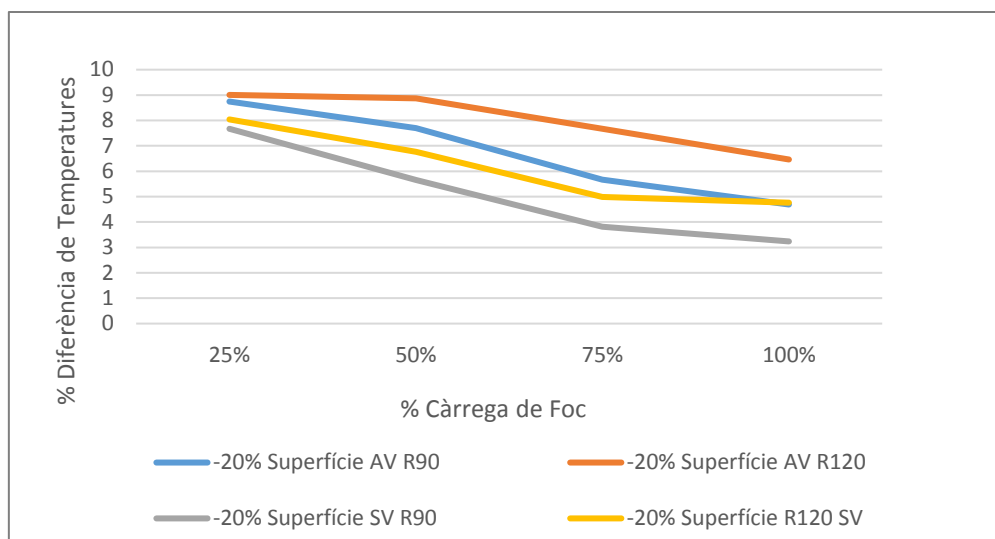
Com es pot observar, en situació de risc 1 els principals factors que influeixen sobre el sistema és l'alçada de l'edifici i la superfície en planta d'aquest. Part de la variació d'aquesta temperatura màxima obtinguda pot venir determinada per la diferència en càrrega de foc total. Al mantenir la càrrega de foc per unitat de superfície, si aquesta superfície és reduïda s'està reduint també la quantitat de combustible present.

Tot i així, aquest fenomen es podrà observar molt millor en els resultats de la temperatura de la capa calenta, on la incidència és més directa. Aquest fenomen es comentarà també en l'apartat 7.1.3.

Per altra banda, el factor altura de l'edifici no presenta un comportament progressiu a l'augmentar l'àrea d'incendi (l'àrea cremada) de l'escenari (fluctua i oscil·la entorn al  $\pm 3$ -4% per a R120 i sobre valors més elevats en protecció R90).

La superfície clarament marca una progressió (també influïda per el fenomen de diferència de càrrega de foc). Quan menys àrea cremada té l'escenari simulat, més significant i més pes té influint directament sobre la temperatura resultant.

Per al contrari, quan més àrea cremada té l'escenari, menys significant és (figura 21).



**Figura 21** - Progressió de la importància del factor superfície, segons el % d'àrea d'incendi (àrea cremada) de l'escenari.<sup>11</sup>

Els escenaris escollits per tal de crear la figura 21 són els escenaris de Risc 1 (IPE600) on es modifica l'escenari reduint un 20% la superfície en planta de la nau (recopilatori observable en la taula 21).

**Taula 21** – Recopil·latori dels escenaris usats per tal de crear la figura 21. En concret s'han usat les seves desviacions (taules 18 i 20).

<b>Superfície -20%</b>	167,82	280,04	377,99	459,97	228,52	380,89	500,69	585,91
<b>Superfície -20%</b>	200,89	332,26	438,88	523,25	270,17	440,23	562,58	648,36

Com es pot observar en la figura 21, per a cada simulació (4 en aquest cas), s'observa la diferència (percentual) de la temperatura màxima de cadascuna de les 4 simulacions respecte el valor patró (en valor absolut).

El valors extrets per a fer aquesta gràfica s'han obtingut de les taules 17-20. Veiem la tendència a disminuir la temperatura en els 4 casos a mesura que s'augmenta l'àrea cremada de l'incendi.

Per altra banda, utilitzant la taula 20 es pot observar com ni el factor alçada de les ventilacions ni el factor ritme de creixement siguin influents sobre el valor màxim de l'incendi.

Finalment, es corrobora l'afirmació que s'ha realitzat de la simulació de l'escenari base en què s'exposava que, per a risc 1 amb un sistema correctament ventilat (amb sistema de ventilació forçada), l'estructura era perfectament capaç de resistir al col·lapse i, per tant, podia aguantar l'incendi.

<sup>11</sup> Com també s'explica en els annexos, "AV" és l'abreviatura d'"amb ventilació" (referent a que existeix ventilació forçada). Per altra banda, "SV" és l'abreviatura de "sense ventilació" (no existeix ventilació forçada, no hi ha exutoris).

Només per als casos amb resistència estructural R90 amb tota l'àrea de la nau cremant apareixen temperatures superiors a 550°C (o molt properes a aquest terme) les quals caldria corroborar amb eines complementàries, és a dir, amb altres simuladors que permetin calcular temperatures estructurals.

Per altra banda, es pot observar la importància de la ventilació forçada observant la comparativa entre les taules 17 i 19. Els mateixos escenaris però modificant el sistema de ventilació divergeixen molt sobre el seu valor màxim de temperatura. Les temperatures entre escenaris iguals (amb diferència de ventilació) oscil·la entre 50 i 85°C).

### 7.1.3. TEMPERATURES DE LA CAPA CALENTA

A continuació s'exposen les temperatures màximes trobades a la capa calenta (o de fums). Veure taules 22 i 23.

**Taula 22** - Valor de les temperatures màximes assolides (°C) en la capa calenta segons les simulacions de risc 1.

Risc 1 – Temperatura Capa Calenta								
Tipus de Simulació	Amb exutoris				Sense exutoris			
	25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
<b>Cas patró</b>	536,285	642,068	714,755	770,046	590,078	716,995	794,968	851,975
<b>Ventilacions -20%</b>	534,53	623,377	694,439	748,885	580,354	695,916	773,368	830,355
<b>Ventilacions +20%</b>	548,524	657,165	730,854	786,667	614,207	733,789	730,854	869,12
<b>Alçada edifici -20%</b>	561,413	669,6	743,759	799,706	625,828	746,55	825,092	881,878
<b>Alçada edifici +20%</b>	534,53	680,673	686,639	740,917	580,354	687,779	764,8	821,652
<b>Creixement Lent</b>	525,799	637,571	829,497	768,022	598,407	717,102	795,074	851,945
<b>Creixement ràpid</b>	592,602	644,277	794,712	770,448	630,225	716,483	794,306	851,44
<b>Creixement Ultra ràpid</b>	664,295	644,142	716,433	771,345	634,744	715,482	793,462	850,809
<b>Superfície -20%</b>	561,884	671,186	745,812	801,983	636,279	748,783	827,47	884,832
<b>Superfície +20%</b>	515,605	616,997	687,693	741,976	574,281	689,636	766,348	823,229

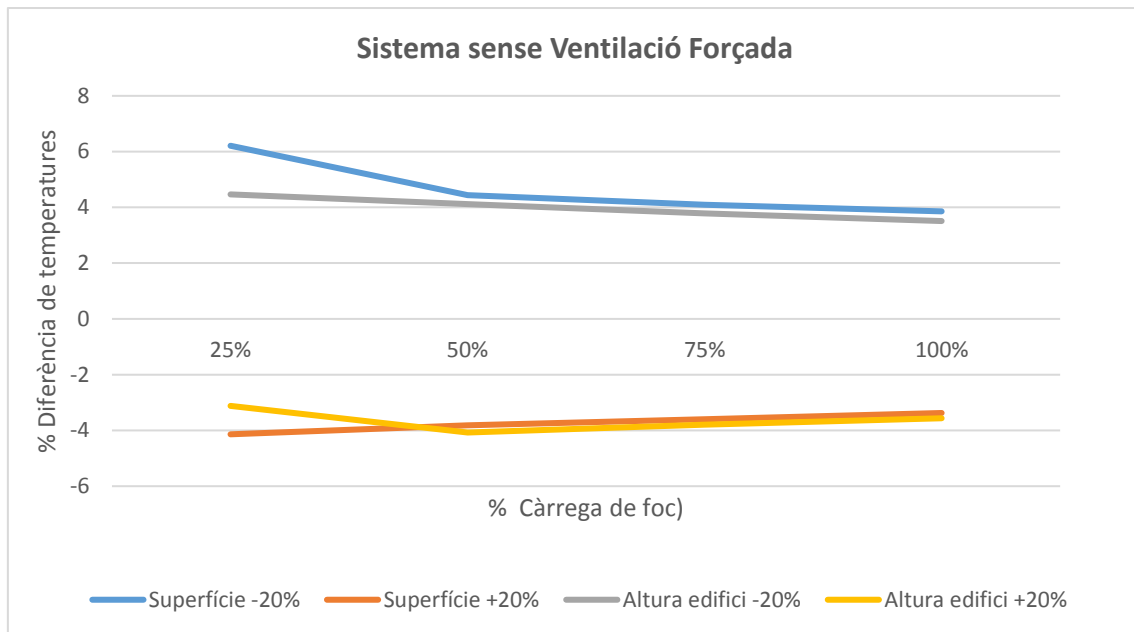
A continuació es mostren les variacions de cada temperatura respecte l'escenari patró (taula 22).

Taula 23 -Valor de les desviacions de les temperatures màximes assolides (°C) en la capa calenta segons les simulacions de risc 1.

Risc 1 – desviacions (%) – Temperatura capa calenta								
Tipus de Simulació	Amb exutoris				Sense exutoris			
	25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
Cas patró	0	0	0	0	0	0	0	0
Ventilacions -20%	-0,327	-2,911	-2,842	-2,748	-3,125	-2,939	-2,717	-2,538
Ventilacions +20%	2,282	2,351	2,252	2,158	2,525	2,342	-8,065	2,012
Alçada edifici -20%	4,685	4,288	4,058	3,851	4,4652	4,122	3,789	3,510
Alçada edifici +20%	-0,327	6,013	-3,934	-3,783	-3,126	-4,075	-3,795	-3,56
Creixement Lent	-1,9553	-0,700	16,053	-0,263	-0,112	0,014	0,013	0,003
Creixement ràpid	10,501	0,344	11,187	0,052	5,199	-0,071	-0,08	-0,06
Creixement Ultra ràpid	12,098	0,323	0,234	0,169	5,95	-0,211	-0,189	-0,137
Superfície -20%	4,773	4,535	4,345	4,147	6,209	4,433	4,089	3,856
Superfície +20%	-3,856	-3,905	-3,786	-3,645	-4,139	-3,816	-3,600	-3,374

Com s'ha pogut observar amb les temperatures de l'acer estructural, l'existència d'exutoris és influent a la hora de valorar la temperatura màxima assolida. Per a un sistema sense exutoris, la temperatura màxima de la capa calenta és sempre més elevada.

Per altra banda, també s'observa que a major àrea cremada, sense sistemes de ventilació s'obté que la variació de la temperatura disminueix progressivament (variacions molt petites) mentre es varia els paràmetres "superfície de la nau" i "alçada de la nau" (observar figura 22).

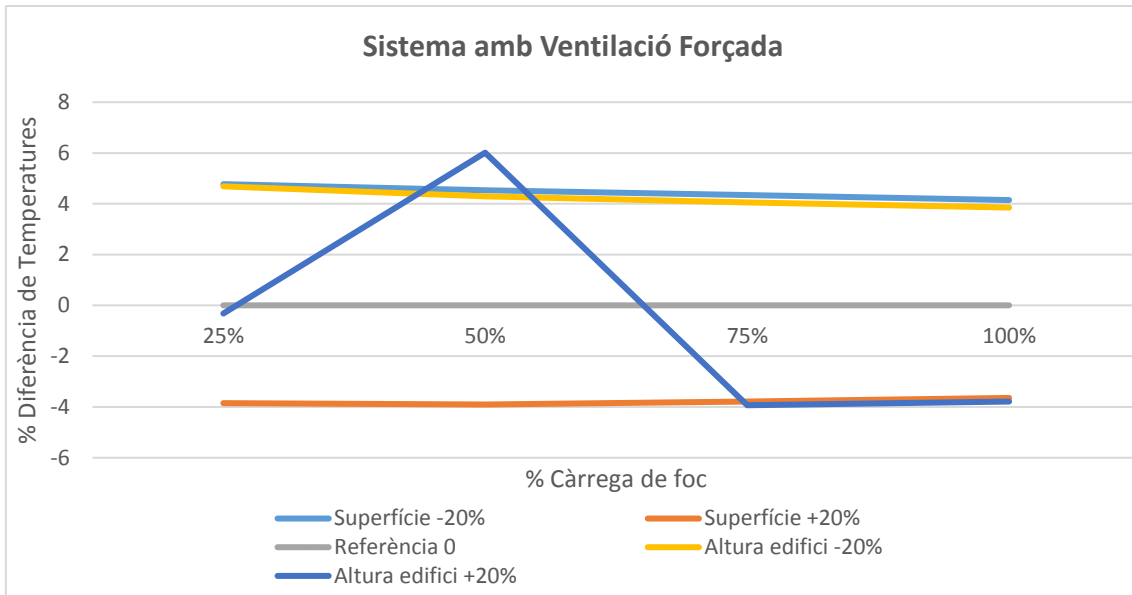


**Figura 22** - Progressió de la importància del factor superfície i alçada d'edifici segons el % d'àrea d'incendi (àrea cremada) de l'escenari

Aquest fenomen pot venir donat per el fenomen exposat anteriorment (7.1.1 i 7.1.2.): la influència de mantenir la càrrega de foc per unitat de superfície si es redueix la superfície de la nau.

Si es realitza aquest procediment, indirectament s'està reduint la quantitat de combustible present a la nau industrial i, per tant, pot ser normal que la temperatura sigui menor.

Ara bé, analitzant el mateix fenomen per a sistemes amb ventilació (figura 23), s'observa que aquest fenomen perd importància i la variació resta constant a l'augmentar la superfície d'incendi (àrea cremada).



**Figura 23** - Progressió de la importància del factor superfície i alçada d'edifici segons el % d'àrea d'incendi (àrea cremada) de l'escenari. (amb ventilació).

En aquest cas, figura 23, es pot observar una anomalia referent a la corba que mostra la diferència de l'alçada de l'edifici. Observant i revisant la simulació no s'observa cap anomalia en la manera de procedir ni en la configuració de l'escenari. Tampoc en els resultats de la corba. El fet d'estar tractant percentatges de variabilitat i no resultats en valor absolut pot provocar en casos puntuals alguna dada diferenciada de les altres.

## 7.2. RESULTATS PER A RISC 2

A continuació es mostren els valors obtinguts de temperatura màxima per la capa calenta (de fums) de cada sistema, la temperatura màxima suportada per l'acer estructural i les desviacions pertinents respecte a l'escenari patró.

### 7.2.1. TEMPERATURES DE L'ACER ESTRUCTURAL AMB PROTECCIÓ R120 i R90

**Taula 24** - Valors de temperatures màximes assolides (°C) per l'acer estructural en l'escenari de risc 2 i protecció perlítica R120.

Risc 1 – IPE 600 – protecció R120								
Tipus de Simulació	Amb exutoris				Sense exutoris			
	25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
Cas patró	307,38	491,67	615,01	669,82	410,12	615,59	<u>679,35</u>	<u>677,23</u>
Ventilacions -20%	308,33	499,25	616,77	650,35	418,12	617,92	<u>650,68</u>	<u>650,68</u>
Ventilacions +20%	300,36	484,67	609,42	680,93	402,78	609,66	<u>695,74</u>	<u>696,83</u>
Alçada edifici -20%	321,79	510,7	636,15	689,64	427,24	636,17	<u>694,71</u>	<u>694,72</u>
Alçada edifici +20%	296,8	474,01	595,64	653,54	395	597,21	<u>660,35</u>	<u>661,02</u>
Creixement Lent	312,28	493,64	583,57	654,31	411,94	613,39	<u>652,34</u>	<u>652,32</u>
Creixement ràpid	306,5	490,84	578,66	683,44	410,59	615,65	<u>689,7</u>	<u>691,03</u>
Creixement Ultra ràpid	307,84	491,62	614,58	683,97	410,83	615,19	<u>690,04</u>	<u>691,47</u>
Superfície -20%	280,4	459,95	648,83	676,7	380,4	647,65	<u>703,6</u>	<u>723,96</u>
Superfície +20%	327,95	512,14	616,53	632,73	429,96	618,18	<u>632,24</u>	<u>632,24</u>

**Taula 25** - Valors de temperatures màximes assolides (°C) per l'acer estructural en l'escenari de risc 2 i protecció perlítica R90.

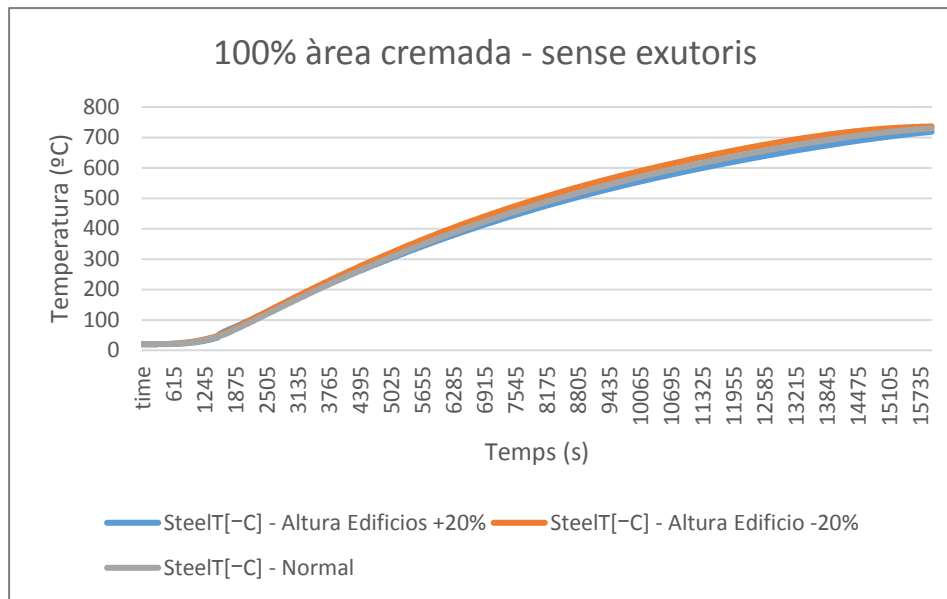
Risc 2 – IPE 600 – protecció R90								
Tipus de Simulació	Amb exutoris				Sense exutoris			
	25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
Cas patró	360,11	549,92	669,62	724,81	410,12	669,99	730,45	729,86
Ventilacions -20%	360,98	554,18	670,94	709,87	473,03	671,41	710,81	710,82
Ventilacions +20%	353,58	545,26	667,07	730,69	461,38	667,55	736,09	736,94
Alçada edifici -20%	376,47	570,67	690,99	734,25	486,39	691,47	736,07	736,18
Alçada edifici +20%	345,23	530,54	648,86	711,22	449,86	649,77	717,9	718,61
Creixement Lent	364,81	551,3	649,81	709,02	468,97	670,77	715,18	715,17
Creixement ràpid	357,84	548,82	646,39	730,35	466,96	669,75	733,89	734,4
Creixement Ultra ràpid	357,26	548,72	669,18	730,83	466,28	669,12	733,9	734,5
Superfície -20%	332,31	523,75	719,23	726,41	439,95	711,69	739,04	760,71
Superfície +20%	378,78	564,75	673,66	693,62	484,26	674,84	693,64	693,64

Tant per als escenaris de risc 2 com per als de risc 3 és inviable poder realitzar l'anàlisi de variabilitat (com, per exemple, s'efectua a la taula 23) a partir de l'escenari patró. La capacitat computacional del simulador no permet anar més enllà dels 16000 segons, dificultant l'obtenció de la fase de decreixement i part de la fase d'incendi totalment desenvolupat. Tots aquests valors venen subratllats.

Com s'ha comentat anteriorment (veure inici de l'apartat 7), tots els valors que no són definitius i que no assoleixen l'estat de decreixement superen en gran mesura el valor llindar de 550 °C, categoritzant aquests escenaris com de col·lapse estructural.

Tot i això, tots els escenaris de risc 2 els quals la temperatura és menor a la llindar arriben a la fase de decreixement, sent les temperatures mostrades les màximes possibles (veure figura 24). De la mateixa manera, la segona columna de valors de la taula 25 (escenaris amb 50% de superfície cremant i sistemes d'exutoris) arriba també en tots els casos a la temperatura màxima assolible, existint temperatures properes al valor llindar.



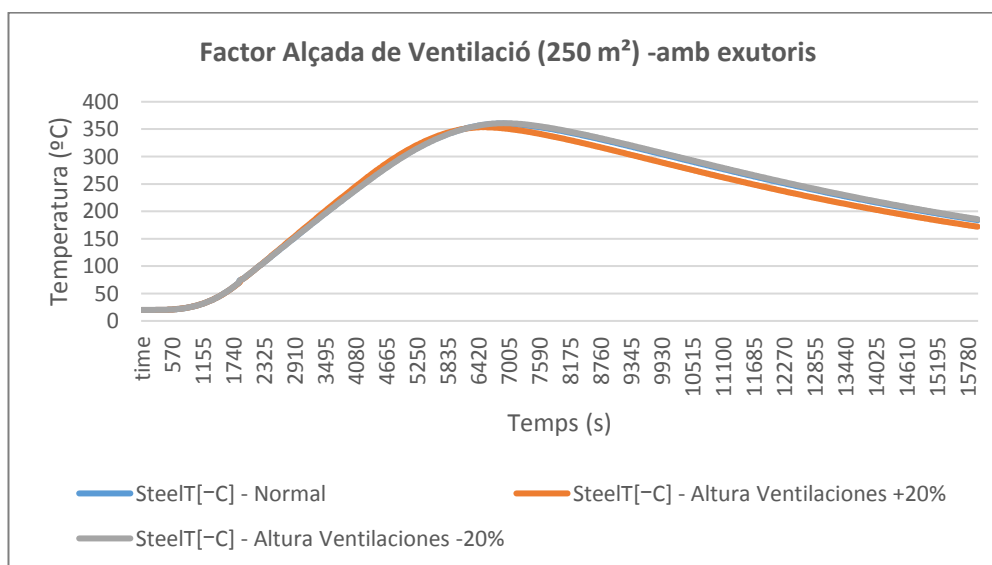


**Figura 24** - Corba de temperatures de l'acer estructural amb protecció R90. Fenomen observable a causa de la limitació computacional de les iteracions.

Com ja es pot observar en les simulacions de l'escenari patró, hi ha moltes dificultats a la hora de determinar si naus industrials en escenaris de risc 2 podrien suportar l'incendi.

Només en els casos on només es crema 25% de l'àrea de la nau la temperatura de l'estructura es menor a la de col·lapse. També es pot afegir la casuística de 50% de l'àrea cremada si la nau té sistema de ventilacions, encara que, per al cas de resistència estructural R90, les temperatures oscil·len molt a prop de la temperatura de col·lapse i caldria utilitzant eines complementàries corroborar el resultat.

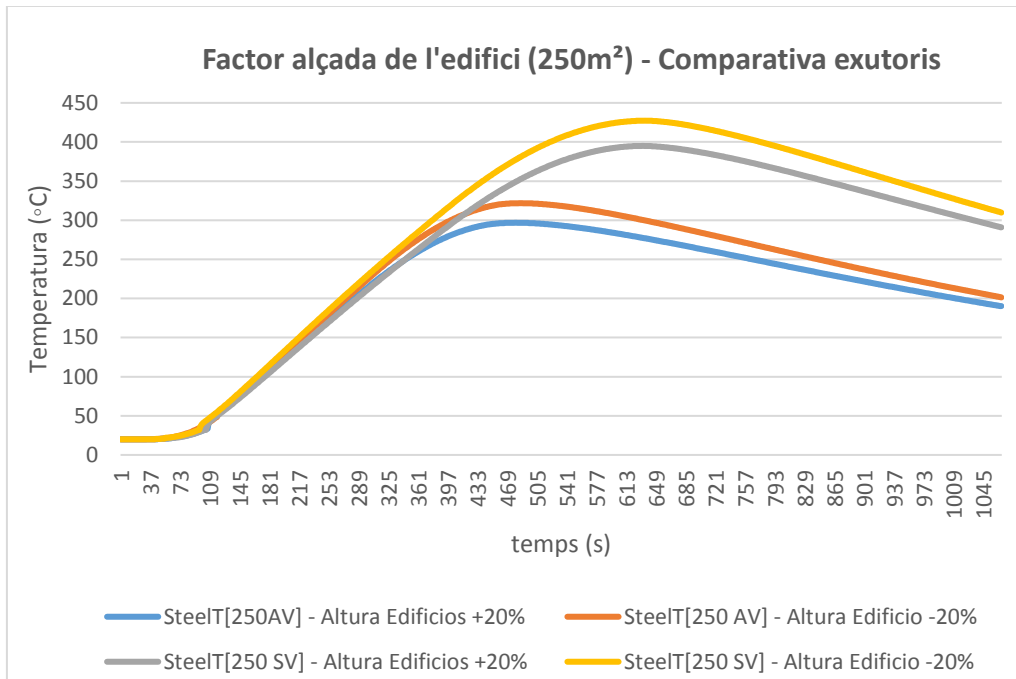
El **factor ventilació**, com es pot observar, no representa un factor que provoqui grans variacions, doncs les tres corbes (corba patró –en blau– corba -20% en alçada – en verd – i corba +20% - en vermell –) gairebé es solapen. Les diferències gairebé es podrien considerar negligibles (figura 25).



**Figura 25** - Corba característica de l'alçada de les ventilacions sobre el valor de l'escenari patró o base. Escenari de Risc 2.

El **factor alçada** de la nau és més significatiu que el factor alçada de ventilacions. Tot i així, no s'observen grans diferències entre corbes doncs les corbes en cap cas se solapen i sempre la que determina l'edifici més baix és la que registra temperatures més altes (figura 26).

Generalment s'està parlant de diferències de  $\pm 20^{\circ}\text{C}$ , la qual cosa pot demandar d'un estudi més profund en situacions de temperatura propera al llindar de col·lapse estructural.



**Figura 26** – Corba característica de temperatures de l'acer estructural. Comparativa amb i sense exitoris. Observació factor d'alçada de l'edifici. Escenari de risc 2.

El **factor superfície** és el més significatiu de tots. Com es pot observar, provoca notables variacions en la temperatura màxima així com en les temperatures al llarg del temps. Seria el factor més determinant de risc 2 (observar taules 24 i 25 i figura 27).

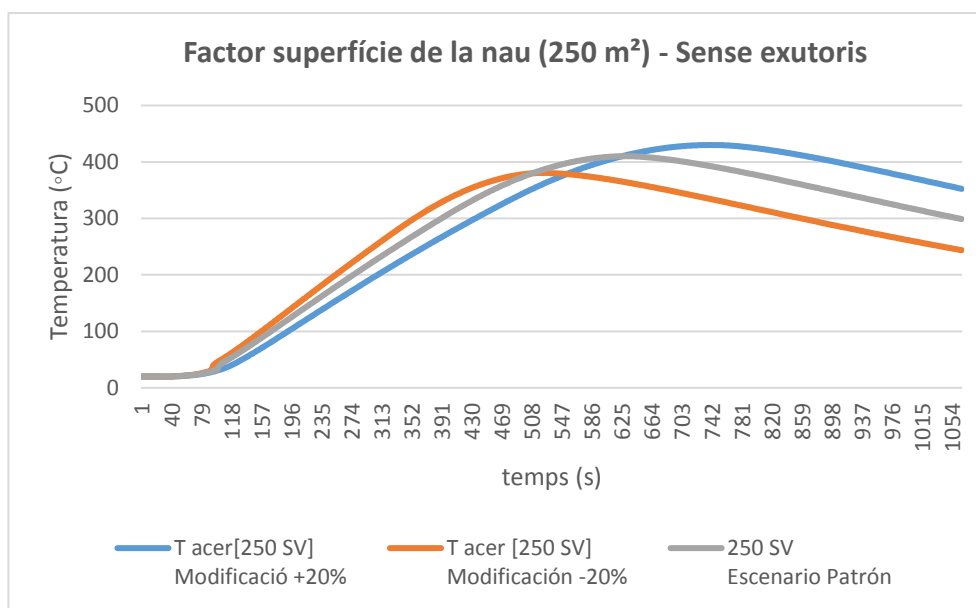


Figura 27 – Corba característica de temperatures de l’acer estructural. Comparativa segons el factor superfície de la nau. Escenari de risc 2.

## 7.2.2. TEMPERATURES DE LA CAPA CALENTA

Taula 26 - Valors de temperatures màximes assolides (°C) per la capa calenta en l'escenari de risc 2.

Risc 2 – Temperatures de la Capa Calenta								
Tipus de Simulació	Amb exutoris				Sense exutoris			
	25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
Cas patró	642,177	769,894	850,693	<u>908,243</u>	716,997	851,797	<u>932,333</u>	<u>945,722</u>
Ventilacions -20%	640,05	748,993	829,335	<u>887,173</u>	696,083	830,162	<u>902,685</u>	<u>905,094</u>
Ventilacions +20%	657,046	786,667	867,573	<u>924,887</u>	734	869,12	<u>961,528</u>	<u>977,339</u>
Alçada edifici -20%	669,649	799,76	880,442	<u>937,496</u>	746,446	882,028	<u>948,921</u>	<u>972,396</u>
Alçada edifici +20%	616,306	740,917	820,906	<u>878,43</u>	687,909	821,546	<u>905,094</u>	<u>917,843</u>
Creixement Lent	637,682	768,022	929,939	<u>907,336</u>	717,084	852,15	<u>931,565</u>	<u>931,703</u>
Creixement ràpid	644,116	770,743	932,265	<u>908,52</u>	716,755	851,509	<u>932,169</u>	<u>953,178</u>
Creixement Ultra ràpid	677,409	771,014	851,426	<u>908,887</u>	717,745	851,034	<u>931,806</u>	<u>953,329</u>
Superfície -20%	671,226	742,001	883,088	<u>940,293</u>	749	884,65	<u>964,406</u>	<u>1018,87</u>
Superfície +20%	616,973	802,097	822,089	<u>878,459</u>	689,636	823,092	<u>689,636</u>	<u>877,823</u>

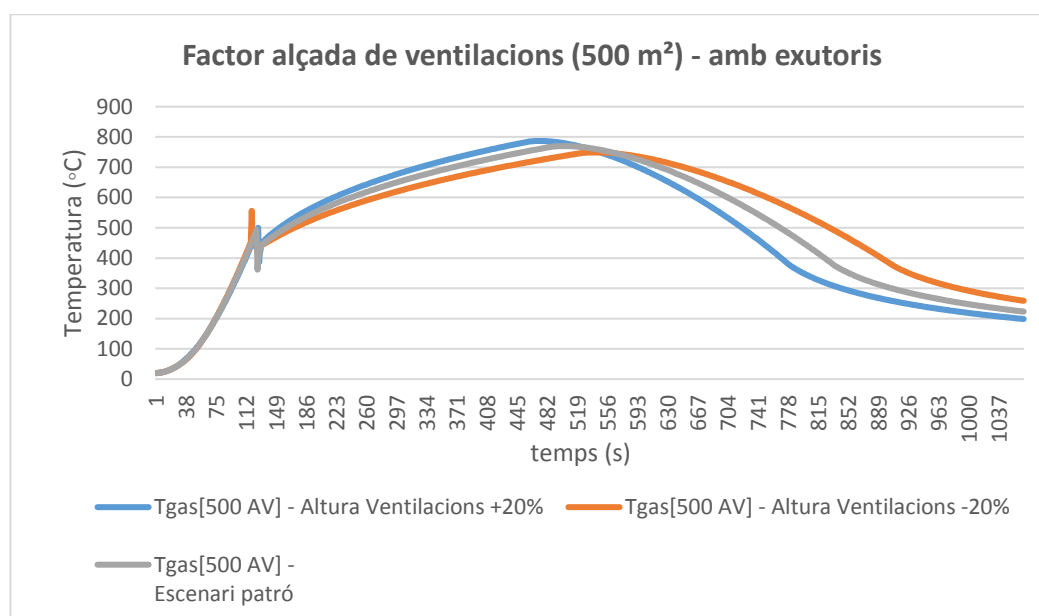
Com es pot observar, com ja havia ocorregut en la simulació de l'escenari base, el conjunt de temperatures de l'escenari de risc 2 és molt superior al de l'escenari risc 1.

Es desglossa la importància de cada factor a continuació:

**Efecte de l'alçada de les ventilacions:** en el cas de risc 2, es poden observar al complet totes les simulacions de 25%, 50% i 75% d'àrea cremada (exceptuant l'escenari 75% d'àrea cremada sense ventilacions). L'efecte de l'alçada de ventilacions és poc rellevant, com ja s'ha observat en resultats previs

L'únic fenomen interessant que es pot observar és que el fet de col·locar les ventilacions més avall (en aquest projecte les finestres), és dir, a menys alçada, permet que l'incendi es desenvolupi una mica més lentament, arribant a la seva temperatura màxima aproximadament uns 450 segons després.

Per contrapart, en l'etapa de decreixement s'observa un decreixement més lent, dificultant la disminució de la temperatura de la capa calenta (figura 28).



**Figura 28** – Corba característica de les temperatures de la capa calenta. Observació factor alçada de les ventilacions. Escenari de Risc 2.

**Efecte de l'alçada de l'edifici:** com ja ha succeït en les simulacions de risc 1, s'observa que és el factor més rellevant després del de superfície (figura 29). Aquest fenomen incideix únicament sobre el valor de la temperatura que s'assoleix a l'incendi, augmentant aquest en el cas que l'alçada de l'edifici disminueixi.

Aquest fenomen succeeix en tots els escenaris fets, sense veure cap diferència ostensible en cap cas concret.

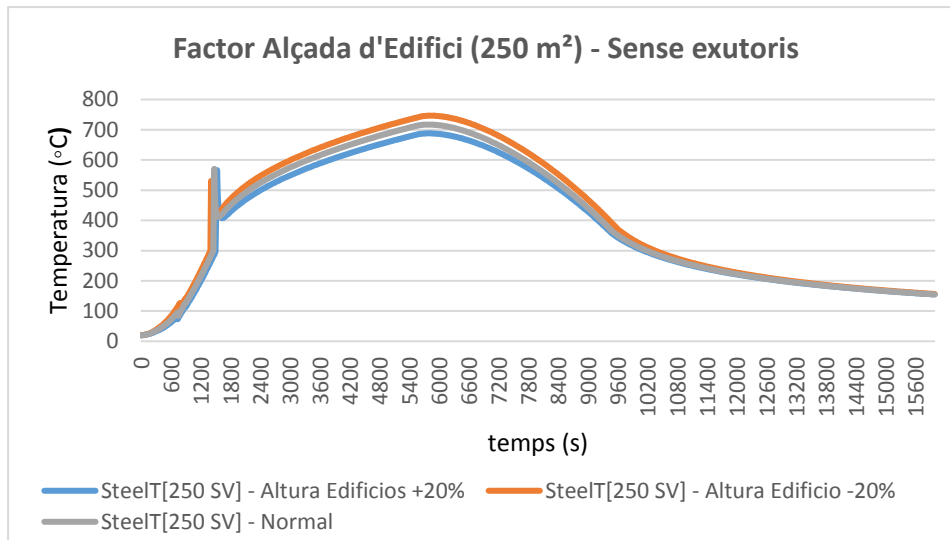


Figura 29 - Corba característica de temperatures de la capa calenta en nivell de risc 2. Efecte del factor "alçada de l'edifici".

**El factor superfície:** és el més significatiu de tots. Torna a observar-se el fenomen explicat en anterioritat: al mantenir la càrrega de foc per unitat de superfície i reduir la superfície de la nau es redueix el total de combustible present en l'edifici. Això pot influir notablement a la consecució d'una temperatura menor.

Per altra banda, la influència del factor superfície afecta en dos sentits:

1 – Al reduir la superfície, disminueix notablement la temperatura (efecte que pot venir ajudat per l'exposat amb anterioritat).

2 – Al reduir la superfície de la nau industrial, l'incendi triga més a desenvolupar-se , arribant al pic (amb diferències de temps molt variables depenent del % de superfície cremant) molt després (i a temperatura menor). En l'exemple mostrat (figura 30) s'observa com aquest temps és aproximadament de 4000 segons (més d'una hora). Aquest fenomen pot ser rellevant per assegurar més temps a les dotacions per arribar a la zona.

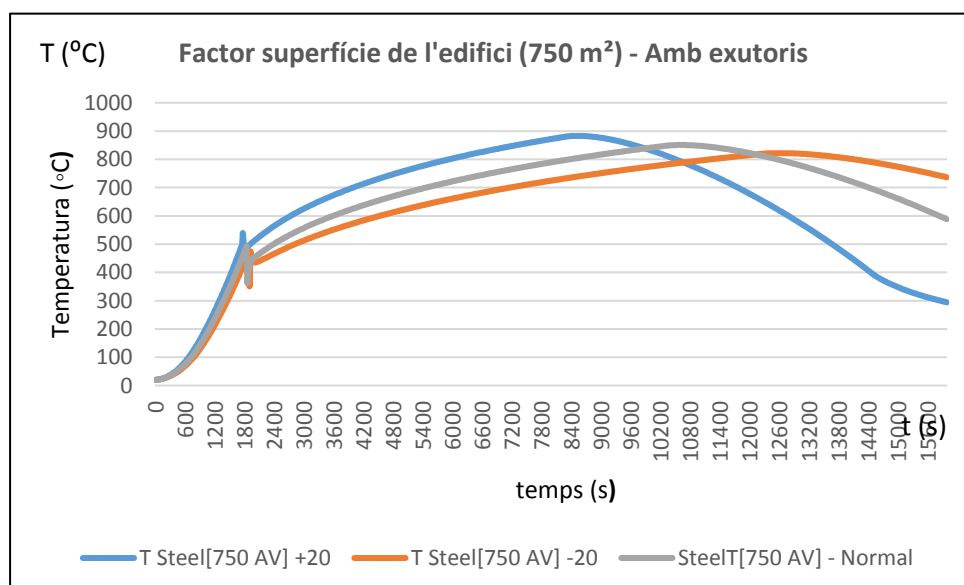
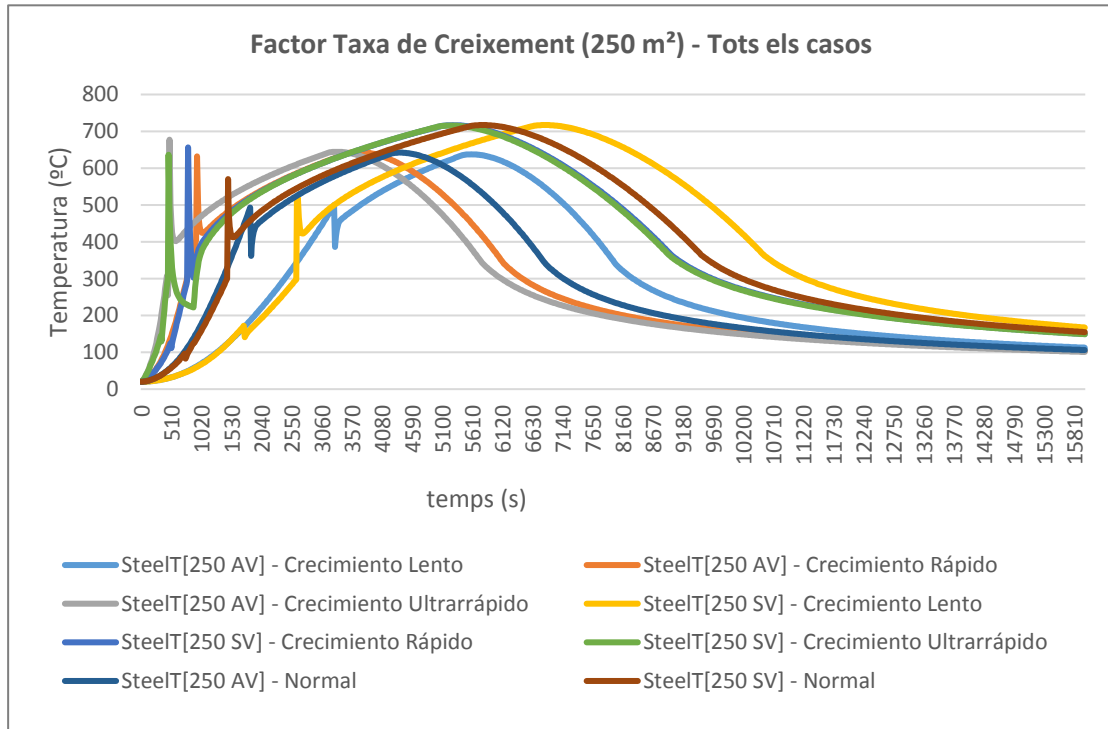


Figura 30 - Corba característica de temperatures de la capa calenta en nivell de risc 2. Efecte del factor "superfície" (en planta).

**El factor taxa de creixement:** es mostra un factor molt poc rellevant a la hora de valorar les temperatures que s'assoleixen a la capa calenta (observar figura 31). Per altra banda, s'observa que depenent del creixement de l'incendi s'assoleix la màxima temperatura en temps diferents. Aquest factor incideix directament sobre el combustible, afectant indirectament sobre l'activitat que es pugui processar en tal nau industrial.



**Figura 31** - Corbes característiques de temperatures de la capa calenta per als escenaris de risc 2.

### 7.3. RESULTATS PER A RISC 3

A continuació s'exposen els valors de temperatures màximes assolides durant la simulació per part de l'acer estructural, així com de la capa calenta en cada un dels escenaris de Risc 3.

Com ja ha succeït en alguns escenaris de risc 2, és inviable computacionalment concloure algunes de les simulacions fetes perdent informació de la fase de decreixement. Algunes d'elles a més a més no permeten observar la fase totalment desenvolupada de l'incendi. Aquest fenomen en cap cas afecta de forma rellevant en les simulacions, doncs en elles ja es registra temperatures molt elevades (i molt superiors, en el cas de l'acer estructural, a la temperatura lliandar).

Totes elles aniran indicades en les taules, essent aquestes subratllades i diferenciades de les que si que tenen fase de decreixement.

### 7.3.1. TEMPERATURES DE L'ACER ESTRUCTURAL AMB PROTECCIÓ R120 I R90

A continuació es mostren les taules 27 i 28 amb les dades de temperatures:

**Taula 27** - Valors de temperatures màximes assolides (°C) per l'acer estructural en l'escenari de risc 3 i protecció perlítica R120.

Risc 3 – IPE 600 – protecció R120 –								
Tipus de Simulació	Amb exutoris				Sense exutoris			
	25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
Cas patró	409,87	615,23	<u>675,29</u>	<u>675,55</u>	527,01	<u>676,92</u>	<u>677,26</u>	<u>677,26</u>
Ventilacions -20%	410,94	616,58	<u>649,95</u>	<u>649,96</u>	534,03	<u>650,72</u>	<u>650,72</u>	<u>650,72</u>
Ventilacions +20%	402,64	609,74	<u>691,84</u>	<u>694,55</u>	520,32	<u>693,79</u>	<u>696,86</u>	<u>696,86</u>
Alçada edifici -20%	428,56	635,97	<u>693,59</u>	<u>694,76</u>	546,44	<u>694,81</u>	<u>694,98</u>	<u>694,99</u>
Alçada edifici +20%	393,79	595,99	<u>657,01</u>	<u>657,71</u>	509,41	<u>656,79</u>	<u>657,16</u>	<u>657,16</u>
Creixement Lent	414,39	613,42	<u>704,84</u>	<u>649,9</u>	528,9	<u>653,27</u>	<u>652,34</u>	<u>653,25</u>
Creixement ràpid	408,01	614,58	<u>707,76</u>	<u>692,63</u>	526,73	<u>686,79</u>	<u>687,93</u>	
Creixement Ultra ràpid	407,57	614,32	<u>695,28</u>	<u>697,57</u>	526,6	<u>689,55</u>	<u>691,32</u>	<u>691,06</u>
Superfície -20%	378,58	585,77	<u>702,77</u>	<u>720,54</u>	495,7	<u>703,65</u>	<u>721,88</u>	<u>721,88</u>
Superfície +20%	484,94	673,48	<u>692,77</u>	<u>692,77</u>	546,43	<u>693,67</u>	<u>693,68</u>	<u>693,67</u>

**Taula 28** - Valors de temperatures màximes assolides (°C) per l'acer estructural en l'escenari de risc 3 i protecció perlítica R90.

Risc 3 – IPE 600 – protecció R90								
Tipus de Simulació	Amb exutoris				Sense exutoris			
	25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
Cas patró	467,67	669,81	<u>728,73</u>	<u>728,97</u>	584,9	<u>729,6</u>	<u>729,88</u>	<u>729,88</u>
Ventilacions -20%	468,51	671,15	<u>710,05</u>	<u>710,06</u>	588,46	<u>710,84</u>	<u>710,84</u>	<u>710,84</u>
Ventilacions +20%	462,01	667,32	<u>735,15</u>	<u>736,14</u>	580,79	<u>735,69</u>	<u>736,95</u>	<u>736,95</u>
Alçada edifici -20%	487,37	690,98	<u>735,69</u>	<u>735,94</u>	597,12	<u>736,09</u>	<u>736,19</u>	<u>736,19</u>
Alçada edifici +20%	449,71	648,97	<u>715,94</u>	<u>716,64</u>	565,46	<u>716</u>	<u>716,48</u>	<u>716,48</u>
Creixement Lent	470,76	670,3	<u>741,49</u>	<u>712,58</u>	586,49	<u>715,77</u>	<u>715,18</u>	<u>715,75</u>
Creixement ràpid	465,96	669,38	741,85	734,64	584,4	<u>733,18</u>	<u>733,71</u>	

Creixement Ultra ràpid	464,66	668,81	735,28	736,16	583,05	733,79	734,46	734,4
Superfície -20%	439,36	648,02	738,64	756,83	559,58	739,07	758,91	721,88
Superfície +20%	484,94	673,48	692,77	692,77	598,58	693,67	693,68	693,67

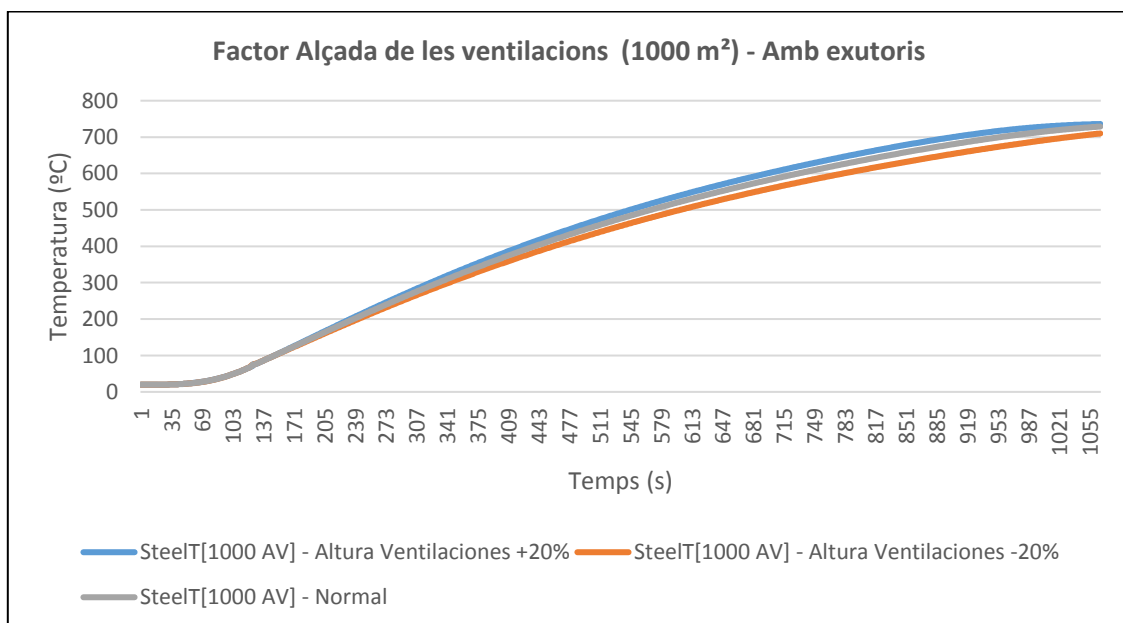
Com ja s'ha introduït en anterioritat a les taules 24 i 25, de la mateixa manera que succeeix en les simulacions de Risc 2, és impossible realitzar l'anàlisi de variabilitat perquè no s'assoleix la temperatura màxima en es simulacions subratllades a la taula, a causa de la limitació computacional del simulador. Tot i així, se'n poden fer observacions sobre el col·lapse / no col·lapse de l'estructura.

En primera instància es pot valorar que la nau industrial de tipus A horitzontal en cap cas pot afrontar la intensitat d'un incendi amb condicions de Nivell de Risc 3 sense mesures actives addicionals que puguin ajudar a disminuir la intensitat de l'incendi (mesures addicionals com, per exemple, ruixadors automàtics).

Sense aquestes mesures addicionals l'estructura col·lapsa i pot provocar danys estructurals tant a l'establiment com als establiments veïns (que comparteixin, en aquest cas, les parets mitgeres).

Tot i que l'escenari no és factible per al tipus de naus industrials estudiades sense mesures addicionals, s'observarà la significança dels paràmetres estudiats per a observar el seu comportament:

**Alçada de les ventilacions:** com en els casos de risc 1 i 2, és un factor poc rellevant el qual no afecta en gran mesura a la variació de temperatura de l'acer estructural protegit amb perlita. Com es pot observar, les corbes de temperatura gairebé es solapen, demostrant que la diferència entre escenaris és ínfima (observar figura 32).



**Figura 32** - Corba característica de temperatures de l'acer estructural en nivell de risc 3 amb existència d'exutoris. Efecte del factor alçada de les ventilacions.



Per altra banda, el factor 'alçada de l'edifici' en un nivell de risc 3 perd la rellevància que tenia en anteriors escenaris amb el risc més reduït. Com es pot observar, de la mateixa manera que ho realitza el factor 'alçada de les ventilacions', les corbes es solapen entre si, demostrant que no hi ha cap diferència notable (figura 33).

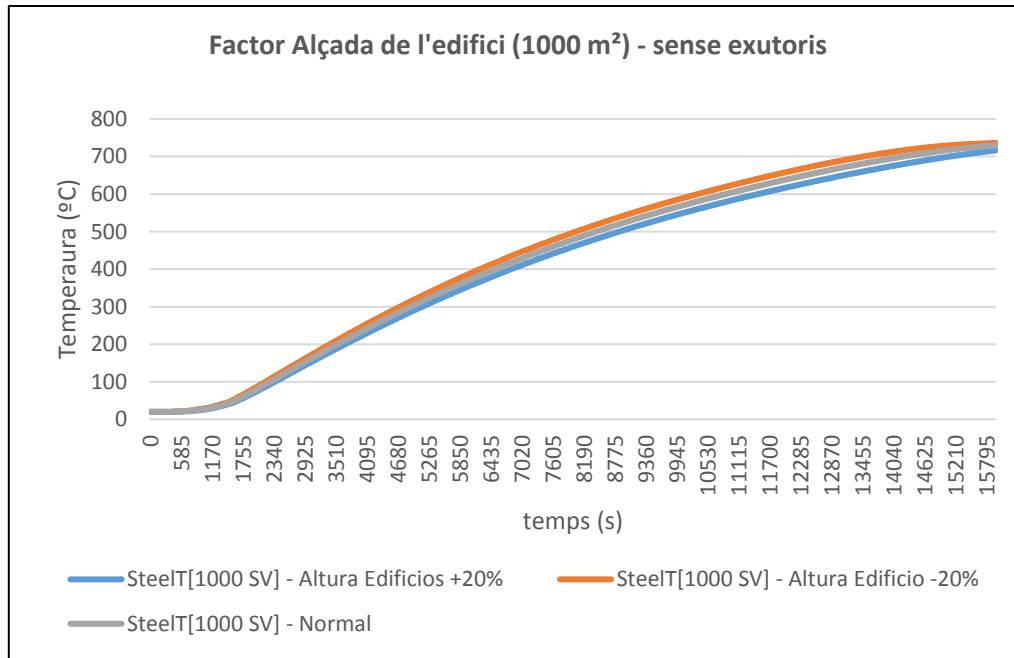


Figura 33 - Corba característica de temperatures de l'acer estructural en nivell de risc 3 sense existència d'exutoris. Efecte del factor alçada de l'edifici.

**El factor àrea de superfície** si demostra tornar a ser el factor rellevant, tot i que la diferència amb els casos mostrats a risc 1 i risc 2 disminueix.

Apareix altre cop el fenomen exposat als escenaris de nivell de risc 2 (veure apartat 7.2.1.) en el qual s'exposa que a menor superfície, s'assoleix menys temperatura i més ràpid es desenvolupa l'incendi en qüestió, sent més curt el període de creixement (figura 34).

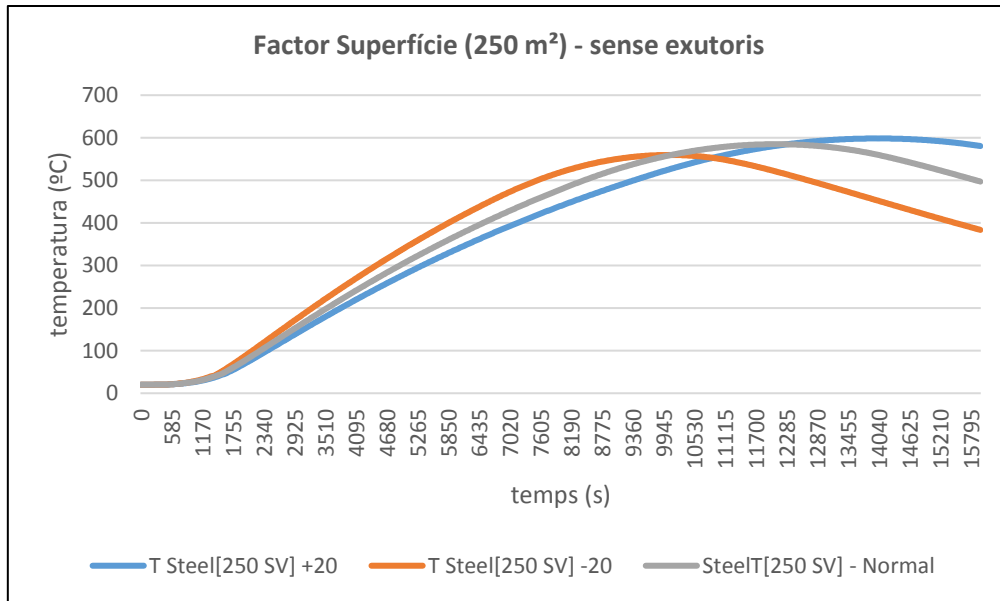


Figura 34 - Corba característica de temperatures de l'acer estructural en nivell de risc 3 sense existència d'exutoris. Efecte del factor superfície de l'edifici (en planta).

Finalment, el factor velocitat de creixement (o **taxa de creixement**) actua de la mateixa forma exposada a risc 2. Les temperatures finals que s'assoleixen són molt similars entre si, tot i que es veuen separades en el temps degut a la velocitat (la pròpia taxa de creixement) en que es desenvolupa l'incendi (veure figura 35).

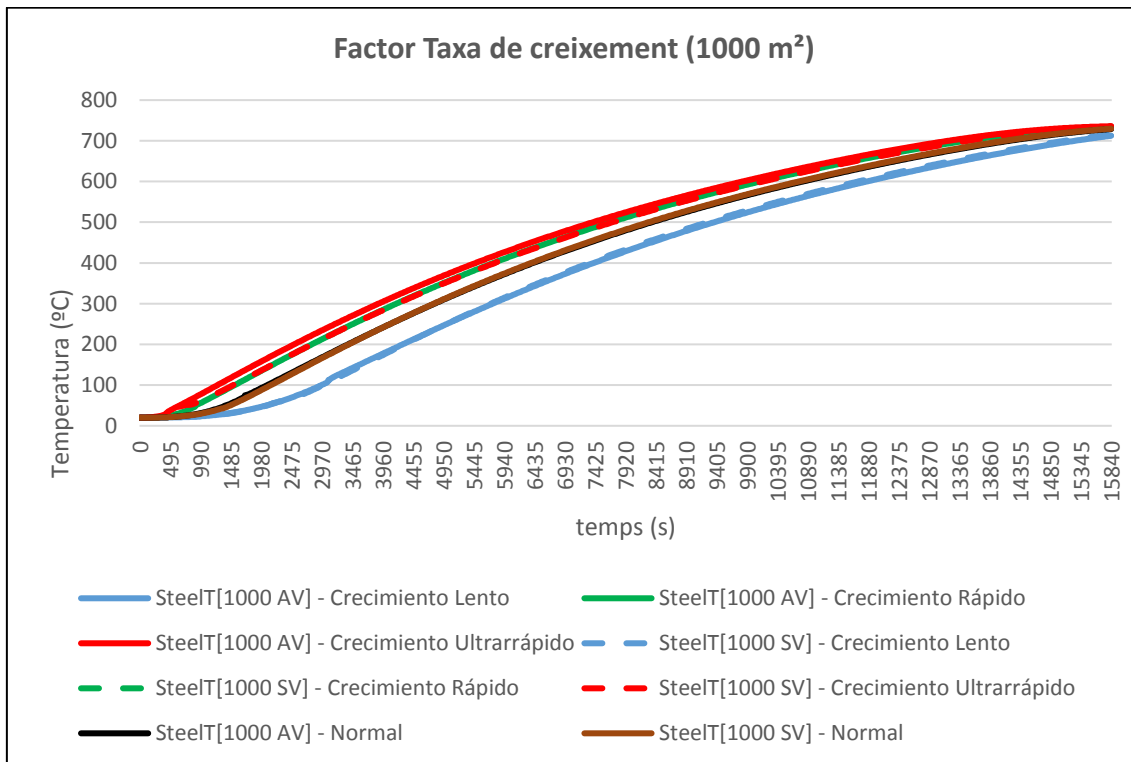


Figura 35 - Corba característica de temperatures de l'acer estructural en nivell de risc 3. Efecte del factor taxa de creixement amb el 100% d'àrea cremant.

### 7.3.2. TEMPERATURES DE LA CAPA CALENTA

A continuació es mostra la taula 29, que inclou les temperatures de la capa calenta pels escenaris simulats amb nivell de risc 3.

**Taula 29** - Valors de temperatures màximes assolides (°C) per la capa calenta en l'escenari de risc 3.

Risc 3 – Temperatures de la capa calenta								
Tipus de Simulació	Amb exutoris				Sense exutoris			
	25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
Cas patró	714,834	850,732	<u>931,681</u>	<u>943,993</u>	794,949	<u>932,488</u>	<u>945,726</u>	<u>945,726</u>
Ventilacions -20%	712,642	829,378	<u>903,93</u>	<u>903,931</u>	773,374	<u>905,099</u>	<u>905,099</u>	<u>905,099</u>
Ventilacions +20%	731,062	867,651	<u>948,08</u>	<u>975,196</u>	812,086	<u>949,052</u>	<u>977,342</u>	<u>977,342</u>
Alçada edifici -20%	743,765	880,447	<u>960,568</u>	<u>971,081</u>	972,404	<u>961,532</u>	<u>972,405</u>	<u>972,408</u>
Alçada edifici +20%	687,505	820,594	<u>902,102</u>	<u>916,065</u>	764,825	<u>902,88</u>	<u>916,335</u>	<u>916,065</u>
Creixement Lent	725,991	848,387	<u>1008,74</u>	<u>928,157</u>	794,943	<u>931,65</u>	<u>931,565</u>	<u>931,881</u>
Creixement ràpid	715,942	851,204	<u>1009,83</u>	<u>952,606</u>	794,699	<u>932,385</u>	<u>951,756</u>	
Creixement Ultra ràpid	716,066	851,101	<u>931,935</u>	<u>957,381</u>	793,094	<u>931,552</u>	<u>953,234</u>	<u>953,108</u>
Superfície -20%	745,905	883,242	<u>963,402</u>	<u>1018,12</u>	827,692	<u>964,442</u>	<u>1023,01</u>	<u>1023,01</u>
Superfície +20%	687,778	822,199	<u>877,184</u>	<u>877,184</u>	766,341	<u>878,467</u>	<u>878,469</u>	<u>878,467</u>

Altres cops les grans diferències venen marcades pels dos factors rellevants en tot el projecte: l'àrea de la nau industrial i l'alçada d'aquesta. Comencen a aparèixer temperatures per sobre dels 1000 °C, temperatures massa extremes per al límit de la supervivència humana.

Es pot desglossar el comportament de les simulacions per factors:

**Factor alçada de les ventilacions:** com succeeix en el cas de risc 2, les temperatures gairebé es solapen, no marcant gaires diferències entre escenaris. Una mostra es pot observar a la figura 36, on s'observa aquest fenomen.

Així doncs, no és un factor rellevant per als escenaris de risc 3 i en cap cas ajuda a disminuir les temperatures del gas de la capa calenta.

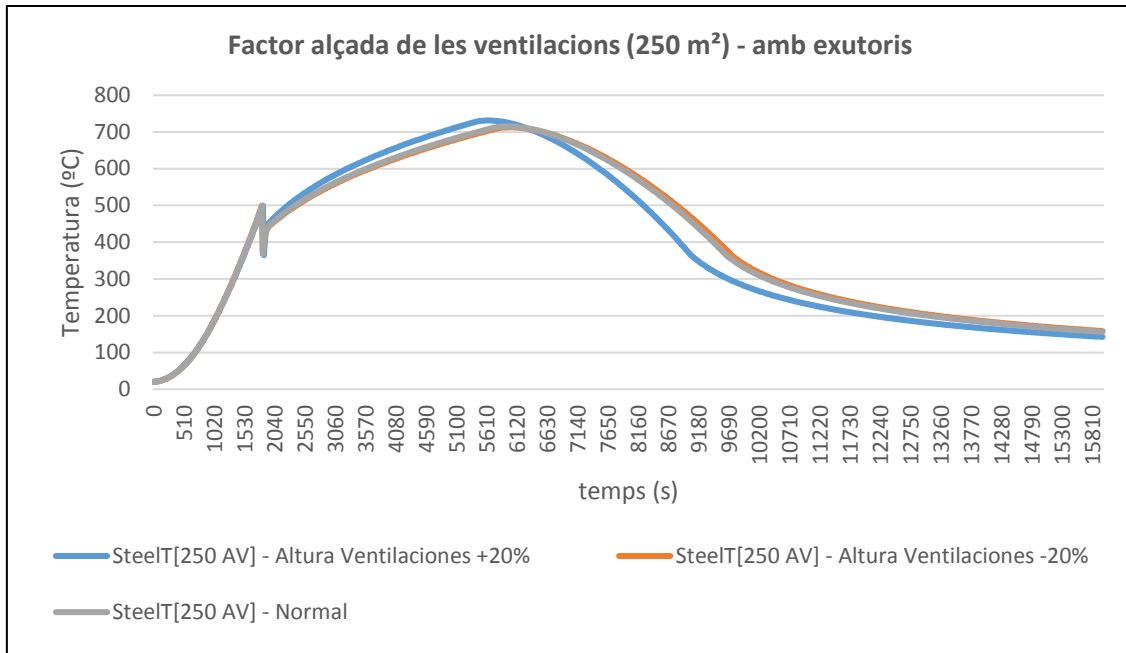


Figura 36 - Corba característica de temperatures de la capa calenta en nivell de risc 3. Efecte del factor alçada de les ventilacions amb un 25% d'àrea cremant.

**Factor alçada de la nau:** com es pot observar en la figura 37, el factor alçada de l'edifici incideix directament i únicament sobre el valor de temperatura de la corba característica de la capa calenta de l'incendi.

La variació (basant-nos en els % obtinguts de les simulacions de les quals obtenim el valor màxim, és a dir, no subratllades a la taula) es troba al voltant d'un 4%. Aquest factor per incidència respecte a la importància detectada en els escenaris de Risc 1 i Risc 2.

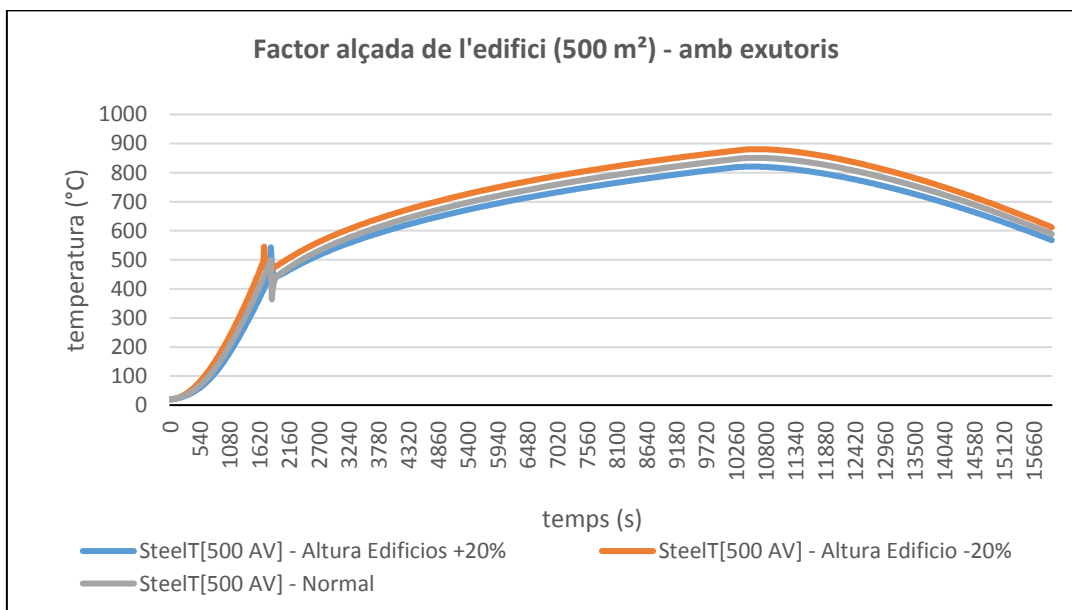
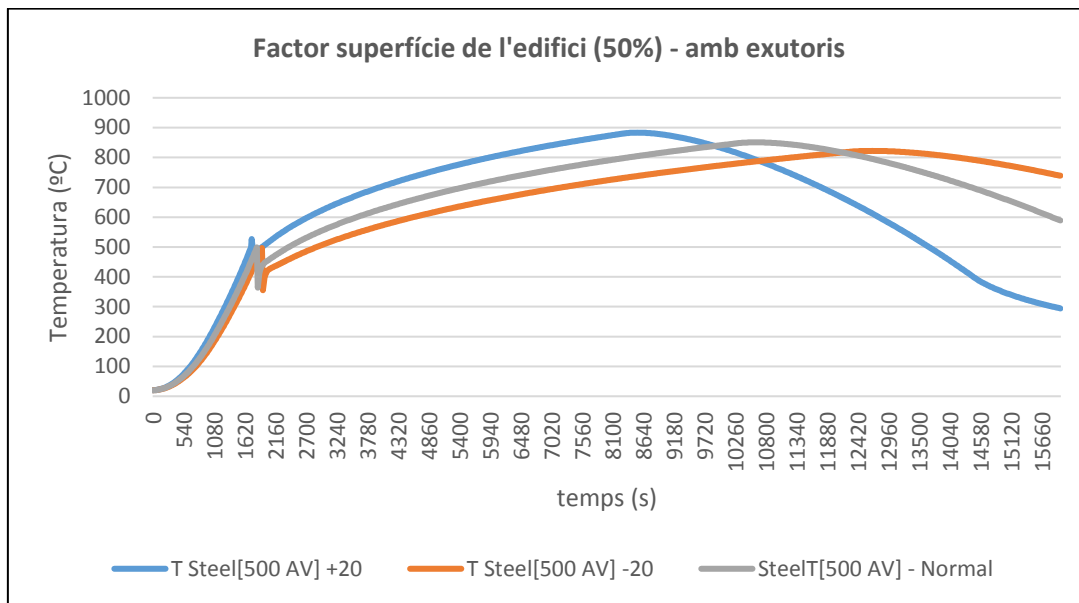


Figura 37 - Corba característica de temperatures de la capa calenta en nivell de risc 3. Efecte del factor alçada de les ventilacions amb un 25% d'àrea cremant.

**Factor superfície de la nau:** torna a ser el factor més rellevant, com succeeix en les simulacions de temperatura de l'acer estructural i les simulacions restants de la temperatura de la capa calenta.

A més, torna a observar-se el fenomen de la velocitat de creixement de l'incendi, la qual cosa provoca que els escenaris amb la superfície més petita arriben a menys temperatura (del gas de la capa calenta) i triguen més a arribar-hi. Observar figura 38.



**Figura 38** - Corba característica de temperatures de la capa calenta en nivell de risc 3. Efecte del factor superfície amb un 25% d'àrea cremant.

**Factor creixement:** actua de la mateixa forma exposada a risc 2.

Les temperatures finals que s'assoleixen són molt similars entre si, tot i que es veuen separades en el temps degut a la velocitat en què creix l'incendi. Depenent del % d'àrea cremada i del factor ventilació forçada / sense forçar, s'assoleixen una sèrie de temperatures o d'altres (figura 39).

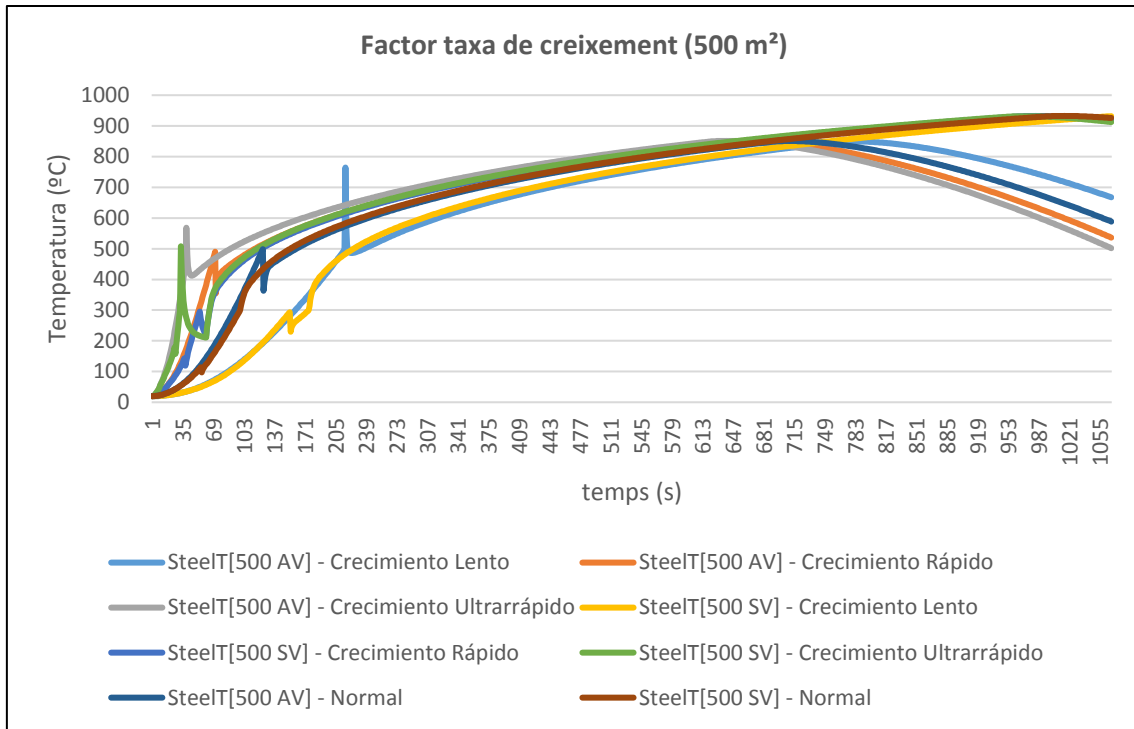


Figura 39 - Corba característica de temperatures de la capa calenta en nivell de risc 3. Efecte del factor taxa de creixement amb un 50% d'àrea cremant.

## 8. IMPACTE AMBIENTAL I SOCIAL DEL PROJECTE

Aquest projecte consisteix en la validació d'escenaris mitjançant el programari Ozone, aplicant un estudi de sensibilitat sobre diversos paràmetres (veure apartat 6.4.). L'estudi sobre l'impacte, tant ambiental com social, únicament es pot enfocar sobre la realització d'aquesta tasca.

En aquest apartat es valora la contribució, tant positiva com negativa, del projecte realitzat. Per tant s'avaluen els impactes potencials (ambientals i socials) causats per:

### Impacte Ambiental

- Utilització de recursos naturals.
- Emissió de contaminants
- Consum d'energia

### Impacte social

- Utilitzat del projecte
- Beneficis per al servei tècnic de prevenció

### 8.1. IMPACTE AMBIENTAL

Aquest projecte ha estat realitzat gairebé en tota la seva totalitat amb ordinador, la qual cosa genera un consum elèctric considerable així com alta generació d'energia tèrmica per part de l'aparell. Per altra banda, un altre recurs que incideix directament sobre el medi ambient és la impressió i maquetació del projecte [22].

Per tant, l'impacte ambiental queda reduït a l'impacte que pugui generar l'ordinador a causa del seu consum i el treball imprès. Els valors estimats de consum són:

**Consum de l'ordinador:** s'ha utilitzat ordinador de sobretaula (de torre) i ordinador portàtil a parts iguals. Si s'estima que s'han invertit hora i mitja diària sobre 22 dies laborables per mes (7 mesos estipulats) fan un total de 221 hores.

110,5 hores invertides en un ordinador de torre de consum 220W+ 90W (torre i monitor) fan un total de 34,255 kW·h.

110,5 hores invertides en un ordenador portàtil de consum 60 W fan un total de 6630 W·h.

Per tant, el consum total és de **40,885 KW·h**. Per altra banda, la xarxa elèctrica espanyola estima que s'emeten uns 300g de CO<sub>2</sub> per Kw produït. Així doncs:

$40,885 \text{ Kw}\cdot\text{h} \cdot 0,3 \text{ Kg de CO}_2 = \mathbf{12,256 \text{ Kg de CO}_2}$  emesos durant el treball.

**Gestió de residus:** bàsicament el conjunt de recursos usats per a imprimir i maquetar el treball. La gestió dels residus d'impressió es realitza segons està establert a la taula 29.

Taula 30 - Categorització dels residus generats. Font: [23]

Residu	Etapa on s'usa el material	Gestió de recollida i/o reciclatge
Paper	- Apunts realitzats. - Impressió projecte	Contenedor blau
Tinta d'impressió	Impressió (esborranys i definitius)	Contenedor de tòners d'impressora (zones: Universitat i treball)
Material divers de treball (generalment plàstic)	- Elaboració del projecte. - Impressió projecte	Contenedor groc
Aparells elèctric o electrònics	- Elaboració del projecte	Xarxa de punts verds Sistema de recollida segons fabricant.

## 8.2. IMPACTE SOCIAL

Aquest estudi pot ajudar als serveis tècnics i de prevenció de risc d'incendis a intentar modificar la normativa existent per a configurar un noi espai legislatiu per a les naus de tipus a horitzontals, flexibilitzant-ne els requeriments que demana.

Complementant el projecte anterior, aquest pot facilitar la possibilitat que es pugui valorar una flexibilització en els casos de risc més baix, els quals han quedat demostrats que amb protecció R120 l'estructura pot aguantar el col·lapse.

Aquest fet, per altra banda, pot ajudar als propietaris de les naus industrials existent en el parc industrial català que necessiten fer modificacions a la nau, a poder assolir els requeriments desitjats per una hipotètica nova normativa més flexible de forma més econòmica. Això a la vegada pot permetre dinamitzar la indústria o el negoci que es pugui fer amb aquest tipus de naus i afavorir el desenvolupament industrial a l'estat espanyol.



## 9. COSTOS DEL PROJECTE

Els costos associats es fonamenten bàsicament en mà d'obra utilitzada, costos del consum d'energia i costos relacionats amb els recursos materials (com pot ser el material usat durant la maquetació del treball). Heus ací un resum breu:

### Recursos materials i consum d'energia

- Costos de maquetació: 40 €.
- Costos en el conjunt de CDs necessitats: 6 €.
- Ordenador (amortització de l'equip informàtic existent): 350 €. [24]
- Cost del consum d'electricitat = 4,2 € .  
Preu del kW: 0,103 €. [25]  
Consum elèctric total (veure apartat 8.1.): 40,885 kW·h.

### Recursos humans

- Costos del projectista (enginyer)  
Suposant el treball remunerat a 15 €/h per 221 hores invertides suposa un total de 3315€.
- Cost de supervisió del co-director (expert)  
Suposant un treball remunerat de 30 €/h per 120h invertides suposa un total de 3600 €.
- Cost de supervisió del director (doctor i expert)  
Suposant un treball remunerat de 60 €/h per 90h invertides suposa un total de 5400 €.

Així doncs, un preu aproximat que tindria efectuar tot el treball seria de **12365,2 €**

## 10. CONCLUSIONS

Després de realitzar l'anàlisi de sensibilitat basat en el conjunt de simulacions exposat (i que queda palès als annexos Annex 1 i 2) es poden fer certes observacions a mode de conclusions finals:

- a) **Els recintes que manquen de ventilació forçada** (exutoris) acaben assolint temperatures més altes que les complementades amb un sistema de ventilació forçada. Per tant, corroborant el que es va concloure en el projecte previ, la ventilació forçada és un element indispensable per tal d'evitar el col·lapse estructural i facilitar la disminució de les temperatures de la capa calenta del habitacle.
- b) El **factor alçada de les ventilacions** (que és la disposició de les finestres) no és un factor que intervingui en gran mesura a la disminució de les temperatures en un incendi. El seu efecte és molt reduït.

Assumint els escenaris de Risc 1, en el cas de les temperatures suportades pel material estructural, els escenaris caracteritzats amb resistència R120 s'observen diferències percentuals compreses entre el 0 i el 2,3%. Aquesta variabilitat pot generar diferències de temperatures properes als 15°C. En el cas dels escenaris de resistència R90 la diferència de temperatures està compresa entre un 0 i un 2% generant diferències de temperatures pròximes als 15°C. Les temperatures de la capa calenta estan compreses entre els 35 i 40°C.

- c) El **factor alçada de l'edifici** s'ha mostrat important en les simulacions de Risc 1 i Risc 2 i perd pes (perd influència) en les simulacions d'escenari Risc 3. La consecució de les temperatures màximes de l'incendi en instants diferents de temps segons l'alçada de l'edifici també és un factor molt important a tenir en compte.

Assumint els escenaris de Risc 1 (nivell més baix i en el qual s'assumeix el no col·lapse en les simulacions amb protecció estructural R120 i en la majoria de casos de les simulacions amb protecció estructural R90), s'observen variacions compreses entre un 3,5% i un 4,7% en la temperatura de la capa calenta que poden suposar diferències de 50-60°C. En el cas de les temperatures suportades pel material estructural, aquest amb resistència R90 s'observa variacions entre un 3,5% i un 7,8% provocant diferències compreses entre 35 i 50°C; amb resistència R120 la variabilitat entre temperatures disminueix al voltant del 3,5-5% generant diferències entre escenaris de 35 a 60°C.

- d) El **factor superfície de la nau** industrial s'ha mostrat com el més influent de tots. En el model de risc 1 ja presentava la variació percentual més elevada.

A més a més, cal recalcar que aquesta diferència, en part pot venir influenciada per la variació indirecta que s'està efectuant sobre la quantitat total de combustible que crema (a menys superfície, menys superfície combustible que crema). Aquest fet s'observa clarament en les simulacions sobre l'acer estructural i en menys mesura sobre la temperatura de la capa calenta.

Assumint els escenaris de Risc 1, els escenaris caracteritzats per un material estructural de resistència R90 pateixen diferències properes als 50°C (en els casos més crítics) degudes a diferències percentuals entre el 3 i 7%. Per a les simulacions amb resistència estructural R120 la diferència està compresa entre el 3,2 i el 6,3% amb algun pic del 10%. Les diferències de temperatures es troben entre els 40 i 50°C.

Les temperatures de la capa calenta pateixen variacions compreses entre els 45 i 70°C degudes a diferències percentuals properes al 4-6%.

Un estudi interessant que es podria realitzar a partir d'aquesta conclusió seria l'estudi de les variacions de superfície mantenint la mateixa quantitat de combustible present en l'incendi. És a dir, ajustant la càrrega de foc convenientment.

- e) El **factor tipus de creixement** no afecta en gran mesura a les temperatures que assoleix el sistema.

Tot i així, la velocitat d'algun dels creixements podria ser objecte d'estudi – depenent, per exemple, de l'activitat a realitzar en la nau industrial – per a comprovar si a cert temps determinat podria arribar a ser un element de risc. La consecució d'una temperatura molt elevada abans que puguin funcionar certs sistemes de prevenció o abans que arribin els bombers, podrien ocasionar greus desperfectes a la pròpia nau i a les veïnes adossades, afectant a més d'una activitat industrial diferent.

- f) Estudis a realitzar per tal d'homologar els resultats obtinguts en aquest projecte serien la simulació de l'element estructural amb programari com Elefir. Comparacions amb altres simuladors podrien aportar informació addicional que fos d'utilitat per a millorar l'argumentació numèrica i científica de l'obtingut en aquest projecte.

Treballs pròxims podrien validar els resultats obtinguts pel simulador de models de zona per als factors més importants utilitzant simuladors de camp que permetin aprofundir en l'estudi d'aquests factors.

## 11. AGRAÏMENTS

En primer lloc volia agrair el suport ofert per el Mario Miguel Valero, co-director del projecte, per la orientació feta durant aquests mesos així com l'ajuda per a estructurar la realització del document. El seu coneixement m'ha permès accedir de forma més assequible a conceptes desconeguts per a mi. Moltes gràcies!

En segon lloc voldria agrair a l'Eulàlia Planas que acceptés que participés d'aquests treballs, així com l'orientació rebuda durant totes aquestes setmanes.

En tercer lloc volia agrair la flexibilitat oferta per al meu cap al treball, en Ramon Poll Gelabert, sempre disposat a ajudar-me, amb comprensió i respecte. Moltes gràcies!

Finalment agrair als meus pares i a la Mireia l'ajuda moral en la última empenta per tal d'acabar el projecte i, en conseqüència, el grau. Moltes gràcies.

## 12. BIBLIOGRAFIA

- [1] GALLART, JOAN; GONZÁLEZ, ALBERT; CAIMEL, EDUARD. "Anàlisi d'un incendi en una nau industrial a Gavà. Conclusions per a l'aplicació del RSCIEI en naus de tipus A en horitzontal". Diapositives 8-19, 22-24, 51-97. Barcelona, 2012.
- [2] Departament d'Interior, Generalitat de Catalunya. "Estadístiques anuals de Bombers. Departament d'Interior". Barcelona, 2014.
- [3] "Los Incendios". Web en línia.  
[http://www.desastre.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=129](http://www.desastre.org/index.php?option=com_content&view=article&id=129).
- [4] XAMPENY, MARIA. "El reglament de seguretat contra incendis en els establiments industrials". Diapositives 2,6, 25, 26, 27, 32 i 33. Barcelona, 24-25 d'Abril 2015.
- [5] Ministeri d'Indústria, Turisme i Comerç. Govern d'Espanya. "Reial Decret Legislatiu 2267/2004 del 3 de Desembre per al que s'aprova el Reglament de seguretat contra incendis en els establiments industrials". BOE núm. 303, pàgs. 41196 -41223. Madrid, 2004.
- [6] Ministeri d'Indústria, Turisme i Comerç. Govern d'Espanya. "Reial Decret Legislatiu 279/2001 del 29 de Març pel qual s'aprova la classificació de materials inflamables i combustibles". Madrid, 2001.
- [7] - BASSET, JOSÉ MIGUEL. "Flashover: Desarrollo y Control". Pàgs. 16, 25-30, 32-34,38-39 i 44-48.
- [8] HARTIN, ED (traduït per KUNSTMANN, J.ESTEBAN), "Desarrollo del Fuego en Compartimentos, Parte 1". Pàgs. 2-3. Valdivia, Chile.
- [9] WICKSTRÖM, UF. "The Adiabatic Surface Temperature and the Plate Thermometer". Fire Safety Science 10: Pàg.1001-1010 10.3801/IAFSS.FSS.10-1001. SPTRI Sweden. Borås, Suècia &, Luleå, Suècia, 2011.
- [10] AIRA, T.C.J; GARCÍA, M.J. "Investigación de Incendios", p.85, 2007.
- [11] ARNALICH CASTAÑEDA, ARTURO. "Incendios de Interior. Ventilación de Incendios, Parte 3". Ediciones Griker Orguemer, Guadalajara, Octubre 2015.
- [12] VIRGILI GRAU, XAVIER. "Comportamiento de Elementos estructurales de acero frente a incendio. Análisis de la normativa". Universitat Politècnica de Catalunya, 13 de Novembre de 2007.
- [13] PLANAS, EULÀLIA; PASTOR, ELSA; RÍOS, ORIOL. "Fonaments de Combustió i Dinàmica del Foc. Tema 3: Modelització d'Incendis en espais Confinats". Diapositives 9,11,12,15,16,23,25 i 26. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) i Centre d'Estudis del Risc Tecnològic (CERTEC), Barcelona, 2015.
- [14] CADORIN, JF., FRANSSSEN, JM. " A tool to design steel elements submitted to compartment fires—OZone V2. Part 1: pre- and post-flashover compartment fire model," Fire Safety Journal vol.38, no. 5, pàgs. 395–427. Liège (Bèlgica), 2003.

- [15] CADORIN, JF., FRANSSSEN, JM., PINTEA, D., DOTREPPE, J.C., "A tool to design steel elements submitted to compartment fires - OZone V2. Part 2: Methodology and application", Fire Safety Journal vol. 38, no. 5, pàgs. 429–451. Liège (Bèlgica), 2003.
- [16] BONALS MUNTADA, LLUIS ALBERT. "Termodinàmica, apunts de classe". Edicions UPC. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Setembre 2014.
- [17] QUINTIERE, JAMES G. "Principles of Fire Behavior". Cengage Learning, 1998.
- [18] DRYSDALE, DOUGAL. "An Introduction of Fire Dynamics". Edicions Wiley. Universitat d'Edimburg, Edimburg (Escòcia), Agost 2011.
- [19] GALLART, JOAN; GONZÁLEZ, ALBERT. "Informe Instrucció Bombers. Annex 2: Justificació Mètode Analític i Model".
- [20] "Propiedades térmicas de los materiales". Web en línia:  
<http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>.
- [21] "Glass breakage in fires". Web en línia: <https://www.doctorfire.com/GlassBreak.pdf>.
- [22] Ministeri d'Agricultura, Alimentació i Medi Ambient. "Llei 21/2013 sobre l'evaluació de l'impacte ambiental". pàgs. 98151-98177, 98183-98227. Madrid, 2013.
- [23] Agència de Residus de Catalunya, Generalitat de Catalunya. "Tipus de Residus". Web en línia:  
[https://residus.gencat.cat/ca/ambits/ambits\\_dactuacio/tipus\\_de\\_residu](https://residus.gencat.cat/ca/ambits/ambits_dactuacio/tipus_de_residu).
- [24] "Cálculo de amortización de electrónica". Web en línia: <https://www.serautonomo.net>
- [25] "Tarifas de luz de hoy. Precio de la electricidad ahora." Web en línia:  
<https://www.tarifadeluz.com>