

ÍNDEX

1	INTRODUCCIÓ	3
1.1	ANTECEDENTS.....	3
1.2	OBJECTE.....	3
1.3	ABAST.....	4
2	EL SISTEMA MODULAR DE DISSIPACIÓ: UN NOU DISSIPADOR D'ENERGIA	6
3	PRINCIPI DE FUNCIONAMENT DEL DISSIPADOR	8
4	CARACTERÍSTIQUES PRINCIPALS DEL SMD.....	11
5	ELEMENTS DEL SISTEMA DISSIPATIU.....	14
5.1	CONJUNT DISSIPATIU	14
5.2	DISSIPADOR	14
5.3	CONNECTOR	15
5.4	BRAÇ	16
6	DISSENY DEL SISTEMA MODULAR DE DISSIPACIÓ.....	17
6.1	VALORS DE DISSENY	17
6.2	DIMENSIONAMENT DEL MÒDUL.....	19
6.2.1	Model de predicció del desplaçament i força d'inici de plastificació	20
6.2.2	Model de Kasai i Popov per a la predicció de l'abonyegament	22
6.2.3	Resultats teòrics obtinguts a partir dels models.....	24
7	DISSENY DE LES UNIONS	27
8	ANÀLISI DELS PROTOTIPS	30
8.1	ANÀLISI PER ELEMENTS FINITS (AEF).....	30
8.2	SISTEMA MODULAR DE DISSIPACIÓ ESTÀNDARD	31
8.2.1	Modelització de la peça	31
8.2.2	Anàlisi dels resultats de la simulació.....	36
8.2.3	Comparativa entre model de predicció teòric i programa d'elements finits.....	43
8.3	COMPARATIVA ENTRE ELS PROTOTIPS.....	44

9	PROCÉS DE FABRICACIÓ DELS PROTOTIPS.....	49
10	RESUM DEL PRESSUPOST	51
11	CONCLUSIONS	52
12	RELACIÓ DE DOCUMENTS.....	54
13	BIBLIOGRAFIA.....	55

1 INTRODUCCIÓ

1.1 ANTECEDENTS

Avui en dia en el món de les estructures, el tema del moviment sísmic és un problema important. Hi ha localitats on l'actuació sísmica és suficientment elevada com per tenir-la en compte alhora de dissenyar els edificis que es projecten en aquelles zones. El sisme, al ser un fenomen natural difícil de preveure i irreparable, l'afany de buscar solucions i alternatives ha promogut a les persones a cercar noves idees per tal de neutralitzar els efectes que puguin produir a les estructures, així com també evitar les pèrdues de vides humanes que es puguin produir. El nou dissipador d'energia que es presenta en el present projecte, anomenat Sistema Modular de Dissipació (SMD) i ideat pel professor Xavier Cahís, n'és un exemple.

A partir de l'idea conceptual es realitzen les fases de desenvolupament del nou dissipador partint d'unes condicions inicials com són les característiques de la planta de l'edifici on es vol ubicar el sistema dissipatiu, els tipus d'elements, amb les seves dimensions, que componen el conjunt dissipador, el tipus d'instal·lació del dissipador dins de l'estructura, etc. El principi de funcionament del Sistema Modular de Dissipació parteix d'un dissipador assajat, amb una eficiència contrastada, anomenat Shear Link (Cahís F. X., 2001). La finalitat és acotar el gran ventall de possibilitats que pot oferir l'estudi del dissipador, focalitzant el projecte en l'anàlisi del nou dissipador en unes condicions determinades.

1.2 OBJECTE

El present projecte té com a objecte la definició, disseny, anàlisi del comportament i procés de fabricació d'un nou dissipador d'energia amb la finalitat de poder ser utilitzat en edificis sotmesos a situacions de moviment sísmic.

El principal objectiu és l'anàlisi del comportament del dissipador d'energia anomenat Sistema Modular de Dissipació. Per poder assolir aquest objectiu cal estudiar i conèixer les característiques principals i la forma de treballar del dissipador. A més a més, és de gran

importància el disseny del dissipador a partir del dimensionament dels diferents mòduls que el componen. El dimensionat es realitza partint d'uns valors de disseny inicials i en base a dos models de predicció: l'abonyegament i el principi de plastificació (Cahís F. X., 2001).

El comportament del dissipador s'analiza mitjançant el mètode d'elements finits utilitzant el programa ABAQUS. No obstant, es requereix d'un previ aprenentatge del funcionament del programa per poder realitzar la modelització i simulació del dissipador.

Per l'estudi del comportament cal tenir en compte que es tracta d'un dissipador modular, és a dir, que té la capacitat de tenir diferent nombre de mòduls en un mateix element i en diferent disposició. Per aquest motiu es realitzen tres prototips diferents que permeten deduir fàcilment el comportament del dissipador a partir del mòdul bàsic de dissipació, i de com es disposen aquests mòduls dins del propi dissipador modular. Es comprova que la forma de treballar dels prototips s'ajusta amb les característiques teòriques pròpies de cada un d'ells.

Finalment, s'estudia un possible procés de fabricació, que es considera el més apropiat segons l'estat de la tècnica, i la corresponent estimació econòmica per cada un dels prototips analitzats.

1.3 ABAST

L'abast d'aquest projecte contempla:

- Es presenta i es descriu un nou dissipador d'energia que s'anomenarà Sistema Modular de Dissipació (SMD). Es defineixen les principals característiques i el principi de funcionament del sistema dissipatiu. A més a més es fa una breu descripció dels elements que formen part del conjunt dissipador.
- Es realitza el disseny del SMD amb el dimensionament del mòdul bàsic de dissipació en base a dos models de predicció teòrics i a partir d'uns valors de disseny determinats.

- Es dissenyen les unions del dissipador amb els diferents elements que componen el sistema dissipatiu.
- A partir del programa d'elements finits ABAQUS es modelitzen i simulen tres prototips del SMD. Es fa una comparació entre els resultats obtinguts de l'inici de plastificació a partir dels models de predicció teòrics i del programa d'elements finits. A més a més, es realitza una comparativa entre les característiques teòriques dels tres prototips i els resultats obtinguts a partir del programa ABAQUS.
- S'estudia un possible procés de fabricació dels prototips i es fa una estimació econòmica dels costos de producció que se'n deriven.

2 EL SISTEMA MODULAR DE DISSIPACIÓ: UN NOU DISSIPADOR D'ENERGIA

En relació amb el desenvolupament del nou dissipador d'energia, és interessant conèixer els efectes causats a les estructures quan hi ha presència d'un moviment sísmic de certa magnitud. El sisme o terratrèmol, es produeix per l'alliberació sobtada d'una acumulació tensional originada pel moviment entre plaques tectòniques de l'escorça terrestre. Aquests moviments es poden produir en direcció vertical, horitzontal o en una combinació de les dues. L'energia alliberada, que es pot quantificar i que permet identificar la magnitud del sisme, genera ones de pressió que es transmeten en totes direccions per l'escorça terrestre. I quan arriben a una zona edificada, introdueixen una determinada quantitat d'energia als edificis, que comencen a vibrar i que poden patir greus danys en funció de l'energia introduïda i de les característiques constructives del propi edifici.

Hi ha zones en el món on els moviments sísmics són importants i els desplaçaments causats a les estructures són suficientment elevats per produir desperfectes considerables, i en zones poc desenvolupades, moltes pèrdues de vides cada any. Per aquest motiu, s'investiga i es desenvolupen millores i noves tecnologies referides al disseny sismorresistent per neutralitzar els efectes produïts.

El Sistema Modular de Dissipació (SMD) és un element estructural ideat i dissenyat amb la finalitat d'utilitzar-lo en edificis situats en zones sísmiques on poden ser sotmesos a moviments de terreny importants. La funció principal del dissipador és la de dissipar l'energia provinent del terreny i transmesa a l'edifici mitjançant la deformació plàstica per esforç tallant.

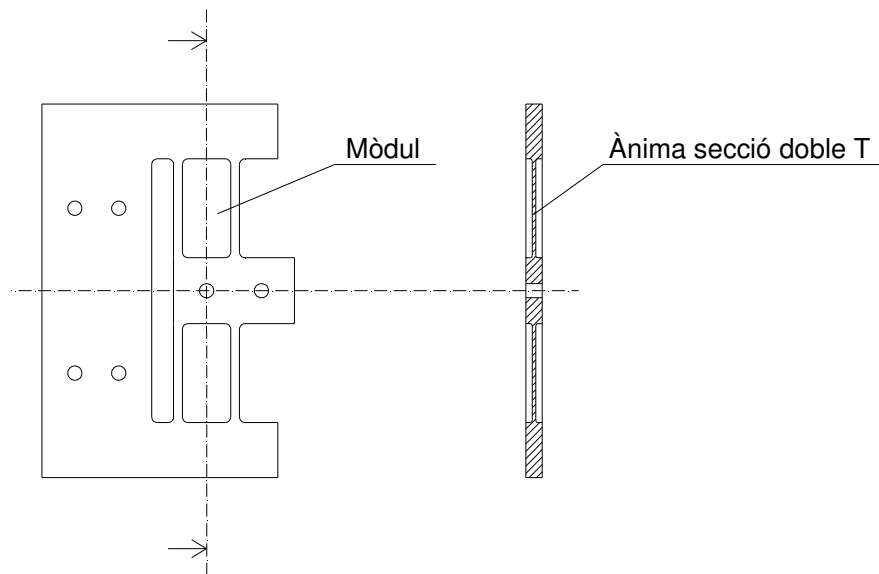


Figura 2.1. Sistema Modular de Dissipació (SMD)

Com es pot observar a la figura 2.1, el dissipador d'energia es compon de diversos mòduls que es caracteritzen per tenir una gruixa més prima que la resta del dissipador. Aquest fet permet que la dissipació d'energia tingui lloc a la zona dels mòduls mitjançant la deformació plàstica per esforç tallant. Aquesta deformació plàstica, i una racional distribució dels dissipadors als edificis, permet absorbir una quantitat important de l'energia introduïda pel moviment de l'edifici i possibilita evitar danys a l'estructura, que comportaria una despesa important en rehabilitació i, en casos extrems, la possible pèrdua de vides humanes.

Pel que fa al material i la forma del dissipador, aquest és fabricat a partir de xapa d'acer S235JR laminada en calent. Per obtenir la geometria i les dimensions requerides se sotmet la peça a diverses operacions de mecanitzat mitjançant màquines de Control Numèric. El capítol 9 d'aquest document fa referència al procés de fabricació emprat amb les diverses operacions que intervenen.

3 PRINCIPI DE FUNCIONAMENT DEL DISSIPADOR

L'actuació sísmica provoca un moviment del terreny que es transfereix a l'estructura dels edificis existents a la zona. Una conseqüència important que pot causar el desplaçament de l'estructura és el dany de la mateixa degut a l'aparició d'esforços indesitjats. Els pilars i les bigues han de suportar grans esforços però quan es produeix un moviment important de l'estructura, apareixen nous esforços degut al moviment lateral a la qual se sotmet i provoca que pilars i bigues treballin d'una manera diferent a la qual han estat dissenyats. També es produeix un moviment vertical, encara que en la majoria dels edificis no té efectes a menys que es tracti de bigues de gran llum, volats importants, etc. El sistema dissipatiu permet dissipar part de l'energia i d'aquesta manera intentar evitar els danys i la posterior rehabilitació dels elements estructurals afectats.

Cal tenir en compte però, que en alguns casos les estructures no han estat dissenyades per suportar sol·licitacions sísmiques. Edificis amb normes molt antigues, o edificis pensats només per càrregues gravitatòries, com els de parets estructurals amb obra de fàbrica de rajol o de pedra, en són alguns exemples. De totes maneres, hi ha edificis projectats per suportar l'acció sísmica concentrant la dissipació d'energia en detalls constructius dúctils de l'estructura, com poden ser els extrems de bigues en estructures hiperestàtiques. Aquest és un bon lloc i es pot aconseguir amb un bon armat tan longitudinal com transversal de confinament. No obstant, aquest disseny parteix que en cas d'acció sísmica severa es poden produir danys a l'estructura irreparables, però s'evita el col·lapse i la pèrdua de vides humanes. Els dissipadors, introduïts de forma racional, poden localitzar la dissipació i evitar els danys estructurals.

Tenint en compte les condicions inicials de les quals es parteix, una de les possibles disposicions (potser la més previsible) del sistema dissipatiu que permet absorbir els esforços i desplaçaments, és la seva col·locació en diagonal entre plantes de l'edifici, tal i com es mostra a la figura 3.1. És un conjunt format per uns elements que sustenten els dissipadors muntats entre plantes i que els transmeten els esforços provinents de l'estructura. Amb aquesta premissa es basa el disseny del dissipador SMD perquè pugui treballar en aquesta disposició.

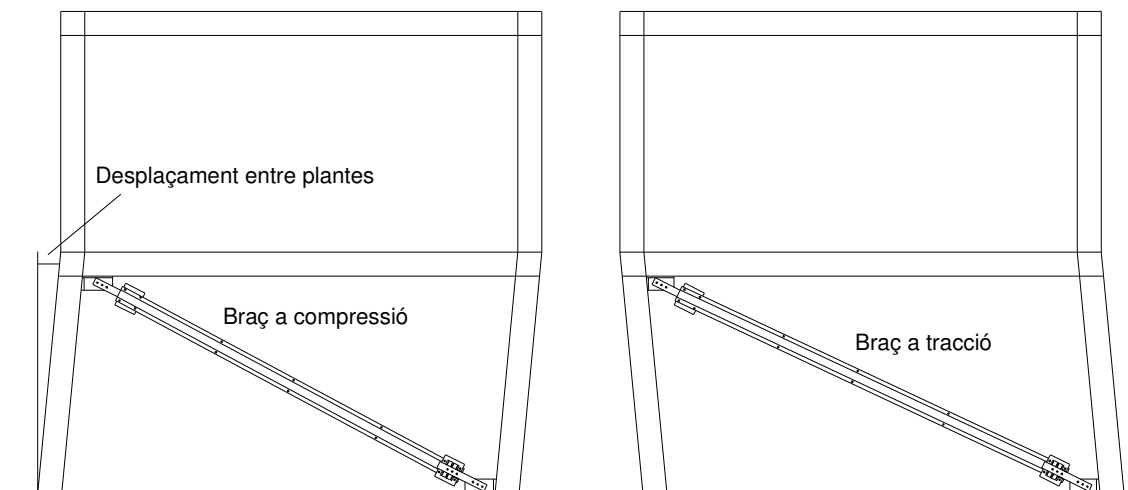


Figura 3.1. Disposició del sistema dissipatiu a l'estructura

S'observa a la figura 3.1 que quan es produeix un desplaçament de l'estructura, es genera un esforç axial, de tracció o de compressió a la barra diagonal de travat que conté el conjunt dissipatiu. Això es deu a que el desplaçament relatiu entre les dues plantes d'un edifici, degut a l'acció horitzontal del sisme, resulta limitat per l'acció de la barra, que forma part d'un sistema més rígid en front a les accions horitzontals que no pas l'estructura porticada sense diagonals.

Les forces laterals d'origen sísmic es transmeten, majoritàriament, a un element que fa de connector entre l'estructura i el dissipador, llavors es transmet cap al propi dissipador d'energia on es produeix la deformació plàstica. Aquest muntatge es disposa a cada extrem de la diagonal i la interacció entre els dos dissipadors es realitza a través d'un braç que els connecta. Aquest braç transmet d'un dissipador a l'altre els esforços i els desplaçaments generats a causa de les deformacions per tallant que pateixen. A la figura 3.2 es mostra el muntatge del conjunt dissipatiu esmentat. Com que és simètric es mostra la meitat per poder visualitzar millor el seu muntatge.

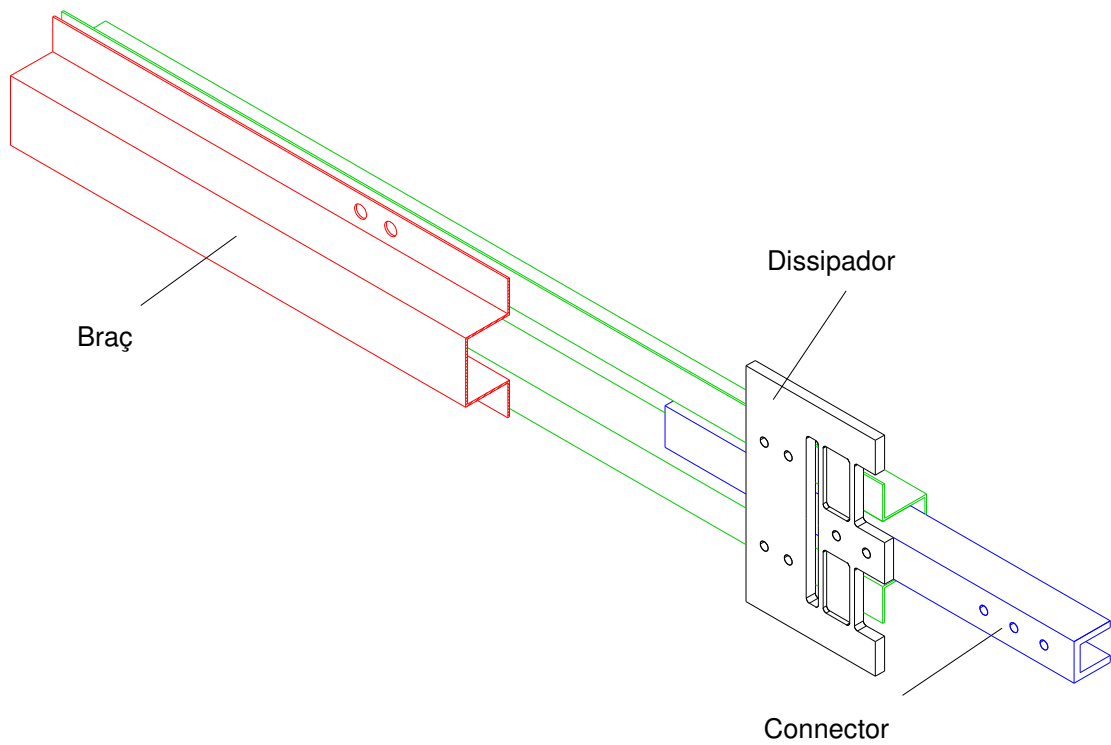


Figura 3.2. Conjunt dissipatiu

El dissipador d'energia es deforma plàsticament per tallant si l'acció de la força axial és suficientment elevada com perquè es superi el límit elàstic del material. La figura 3.3 mostra com treballa el dissipador al sotmetre el braç a càrregues axials de tracció – compressió, que es transformen en esforç tallant a la zona dissipativa del dissipador.

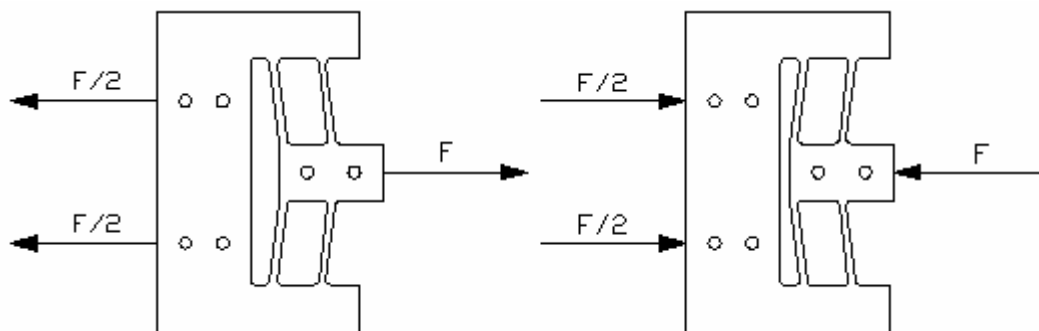


Figura 3.3. Mode de treball del Sistema Modular de Dissipació

4 CARACTERÍSTIQUES PRINCIPALS DEL SMD

El Sistema Modular de Dissipació té unes característiques diferenciadores respecte altres dissipadors existents. La principal característica, tal i com diu el propi nom del dissipador, és que permet una forma de treball modular en un element compacte. És a dir, permet variar el nombre de mòduls segons les condicions requerides en cada cas específic, i per tant tenir forces variables en un sol element sense haver de canviar les dimensions bàsiques del mòdul bàsic de dissipació. A més a més, hi ha la garantia que el material en tots els mòduls del dissipador és el mateix, per la qual cosa la seva capacitat guarda proporcionalitat amb el nombre de mòduls. La figura 4.1 mostra la possibilitat de tenir dissipadors amb diferent nombre de mòduls, permetent tenir un element compacte amb mòduls de dissipació d'iguals dimensions i mateix material.

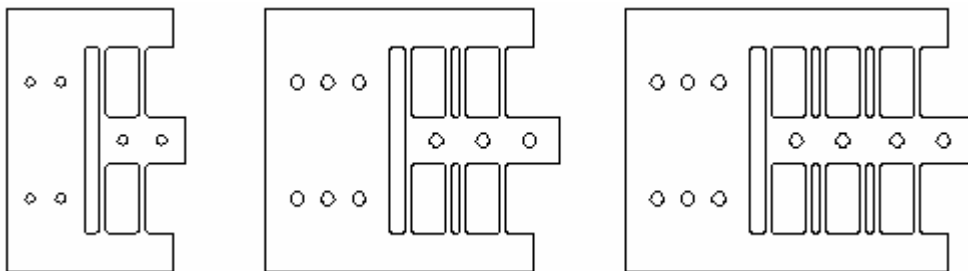


Figura 4.1. Variabilitat en el nombre de mòduls

L'avantatge principal d'aquesta característica del dissipador es pot observar a la figura 4.2. En el primer cas es mostra el SMD estàndard, format per dos mòduls bàsics de dissipació. Per aconseguir un desplaçament δ provocat per la deformació per tallant dels mòduls, és necessari aplicar una força F de tracció o compressió determinada. Si s'observa el segon cas corresponent al SMD en paral·lel format per 4 mòduls, la força requerida per obtenir el mateix desplaçament δ és $2F$, és a dir, el doble de força que el cas anterior. Per tant, aquest fet demostra que la capacitat del dissipador guarda proporcionalitat amb el nombre de mòduls.

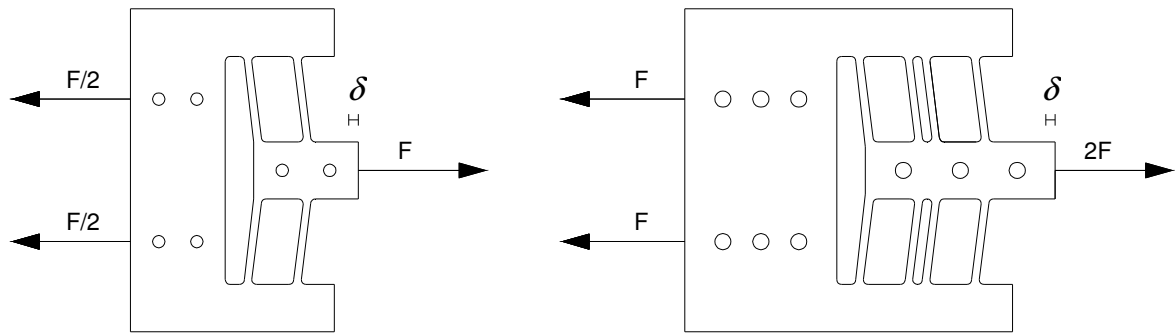


Figura 4.2. Comparació entre el SMD Estàndard i SMD en paral·lel

Quan es realitza la instal·lació del sistema de dissipació, cal tenir en compte la tria adequada del tipus de dissipador necessari per muntar a l'edifici. El motiu d'interès pel qual es col·loquen dissipadors és que quan es produeix un moviment en l'estructura degut a l'actuació sísmica, el conjunt dissipatiu treballa i per tant els dissipadors aprofiten l'energia per deformar-se plàsticament. Per a que es produeixi aquest fet, els esforços que es transmeten al dissipador han de ser el suficientment elevats com perquè es produeixi la plastificació dels mòduls. Per aquest motiu és important saber el nombre de mòduls que es vol que tingui el dissipador, ja que amb l'augment en sèrie del nombre de mòduls augmenta la força necessària per a obtenir el mateix desplaçament.

Una altra característica particular del dissipador és que permet la seva connexió en sèrie en una sola peça. Es tracta d'un element que s'ha patentat ja que es aplicable a altres sistemes de dissipació i que no hi ha antecedents a l'estat de la tècnica actual. Com es mostra a la figura 4.3 es poden connectar diversos dissipadors i amb diferent nombre de mòduls.

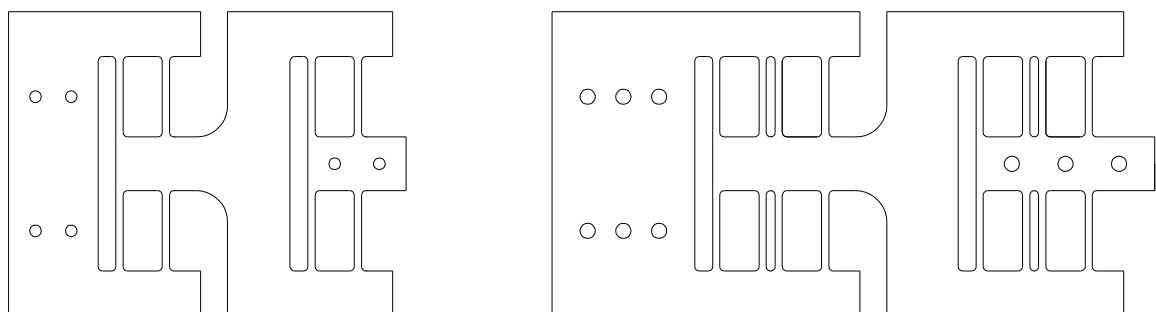


Figura 4.3. SMD en sèrie

L'avantatge principal d'aquesta connexió és que permet augmentar la flexibilitat i capacitat de dissipació del sistema tot mantenint la força de plastificació. A la figura

4.4 es mostra una comparació entre el dissipador SMD estàndard format per 2 mòduls i el dissipador SMD en sèrie format per 4 mòduls. En el cas del dissipador estàndard s'aplica una força axial F per obtenir un cert desplaçament δ a partir de la deformació dels mòduls. El cas del dissipador en sèrie, aplicant la mateixa força F que en el cas anterior, s'obté un desplaçament 2δ , és a dir, el doble de desplaçament que en el cas anterior. Com es pot observar a la figura 4.4, el dissipador en sèrie és una adaptació del dissipador estàndard, és a dir, està format en un sol element per dos SMD estàndard de manera que s'augmenta la flexibilitat del sistema dissipatiu.

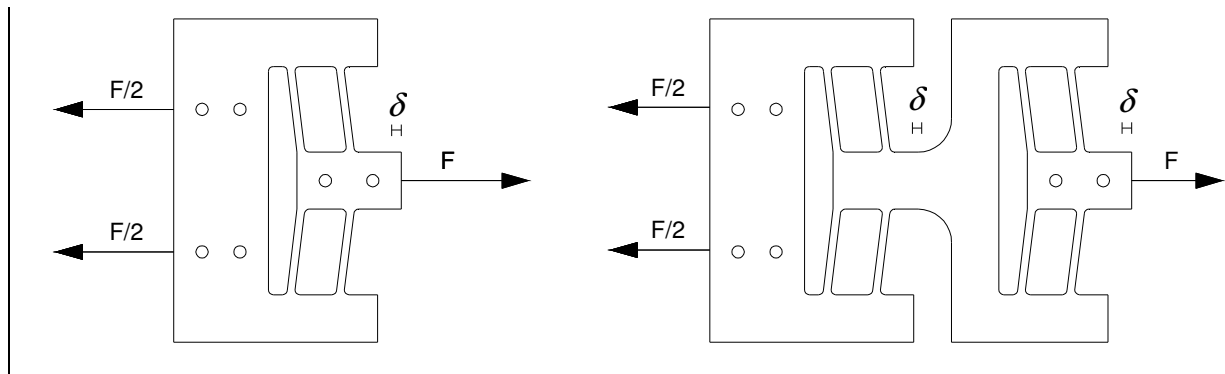


Figura 4.4. Comparació SMD Estàndard i SMD en sèrie

Una característica important del dissipador és el seu material. Es requereix d'un acer dúctil, i de baix límit elàstic. Això permet dissenyar els mòduls bàsics de dissipació amb gruixos de paret més grans, evitant el seu abonyegament sense necessitat de la presència de rigiditzadors a la zona on es produeix la deformació per tallant. El gruix de les parets dels mòduls ha de garantir que no es produeixin aquests abonyegaments ja que comportaria una disminució de la capacitat dissipativa. La ductilitat és necessària perquè sense no hi ha energia dissipada.

El dissipador, al ser un element compacte fabricat d'una sola peça, no té presència de soldadura a la zona dissipativa que podria facilitar la ruptura fràgil i exigiria un control de qualitat de les zones soldades.

5 ELEMENTS DEL SISTEMA DISSIPATIU

El disseny del nou dissipador parteix d'unes condicions inicials. Algunes de les condicions de partida són la forma geomètrica del mòdul bàsic de dissipació (Cahís F. X., 2001) i els tipus d'elements estructurals que el sostenen. Aquests últims són els encarregats de transmetre al dissipador els esforços generats pel moviment de l'estructura. El conjunt de tots aquests elements, juntament amb els dissipadors, formen el sistema dissipatiu que va instal·lat en forma de diagonals, entre plantes de l'edifici. Així doncs, en aquest capítol es descriuen els components que formen part del conjunt dissipatiu, és a dir, el dissipador, el connector i el braç.

5.1 CONJUNT DISSIPATIU

A la figura 3.1 es mostra el conjunt dissipatiu, integrat dins d'un conjunt que forma part del sistema de travat i dissipació d'energia d'una estructura porticada plana. A la figura 3.2 es pot veure el disseny de la barra de travat que inclou el dissipador d'energia. Es compon de dos dissipadors instal·lats als extrems del sistema, connectats a l'estructura pels connectors formats per dos perfils U i connectats entre ells per un braç que consta de dos perfils omega casats.

Els connectors només fan d'elements que permeten unir dues parts de l'estructura amb moviments relatius importants (com és el cas de dues plantes de l'edifici), i han de garantir l'estabilitat del conjunt a compressió. El dissipador és l'únic element que pot plastificar, mentre que la resta dels elements estan dissenyats per mantenir un comportament lineal i elàstic, i estable, sense vinclament.

5.2 DISSIPADOR

A l'esquerra de la figura 5.2 es mostra la forma geomètrica del dissipador de la qual parteix el desenvolupament del projecte. La idea conceptual del dissipador permet conèixer la forma de treballar i el comportament que ha de tenir. Amb la finalitat d'optimitzar el dissipador es duen a terme una sèrie de canvis a la seva forma i les seves dimensions, tal i com es mostra a la dreta de la figura 5.2. Aquests canvis són fruit del dimensionament dels

mòduls bàsics de deformació, de l'anàlisi del seu comportament i del disseny de les unions amb els elements estructurals que el sostenen. Per a saber més informació sobre l'evolució del dissipador inicial al final es pot consultar a l'Annex A.

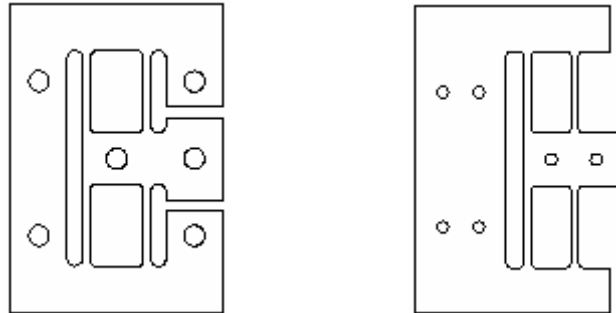


Figura 5.2. Evolució en la geometria del dissipador

5.3 CONNECTOR

El connector és el nom que pren en aquest cas l'element estructural format per dos perfils U. Són perfils laminats i fabricats en acer, lleugers i que tenen la principal funció de sostenir el dissipador i transmetre-li els esforços generats pel moviment de l'estructura a causa de l'actuació sísmica. Per una banda, van muntats a cara i cara del dissipador i per l'altra banda es munten a l'estructura de l'edifici. El nombre de connectors considerats pel muntatge del sistema dissipatiu instal·lat entre plantes d'un edifici és de dos, un a cada extrem de la diagonal, encara que podria haver-hi només un connector a un sol extrem.

Les dimensions dels perfils U depenen bàsicament del tipus de dissipador que s'utilitza en el muntatge del conjunt dissipatiu i del disseny de les unions cargolades entre el dissipador i connector. Per tant, en cada projecte que es dugui a terme el muntatge d'un conjunt dissipatiu com aquest caldrà estudiar els elements necessaris per fer factible el sistema. En aquest cas, com a condició de partida pels posteriors càlculs desenvolupats es consideren uns perfils U de 60x50x8 mm. Al plànol 1004 del document Plànols hi figura el connector considerat amb les seves dimensions.

5.4 BRAÇ

El braç consta de dos perfils omega, laminats, molt lleugers i fabricats en acer. Els perfils es munten a cada cara del dissipador i la unió es resol mitjançant cargols.

La funció principal del braç és la de connectar ambdós dissipadors col·locats als seus extrems, i tenir la capacitat de suportar la força de compressió necessària perquè els dissipadors desenvolupin la seva funció dissipativa, sempre mantenint l'estabilitat del conjunt. A més a més, té la funció d'estabilitzar el conjunt ja que l'espai interior del braç fa de guia als connectors, de manera que l'orientació axial del conjunt es mantingui inalterable.

Les dimensions dels perfils omega depenen de les característiques de les plantes de l'edifici a estudiar, del disseny de les unions cargolades i del tipus de dissipador utilitzat en el muntatge del conjunt dissipador. El dissipador condiona tant la situació del cargols al perfil omega, i per tant l'amplada del perfil, com la capacitat mínima del braç a compressió. En aquest projecte, com a condició de partida es consideren uns perfils omega de 4 mm de gruix. Al plànol 1005 del document Plànols hi figura el braç considerat amb les seves dimensions.

6 DISSENY DEL SISTEMA MODULAR DE DISSIPACIÓ

Pel disseny del dissipador es tenen en compte una sèrie d'aspectes, entre els quals hi han els valors de disseny i el dimensionament del mòdul bàsic de dissipació. Els valors de disseny són les condicions de partida per les quals es regeix el dimensionat dels mòduls del dissipador.

6.1 VALORS DE DISSENY

Com a paràmetres de disseny del dissipador es troben la força de plastificació i la seva capacitat de deformació, mantenint-se estable i plastificant. La força és una variable que depèn molt de la pròpia estructura i del sisme esperat. El desplaçament màxim és una variable molt més previsible, com es veurà a continuació.

Per definir el desplaçament entre plantes que es pot demanar al dissipador, la tipologia estructural i materials estructurals emprats, així com la geomètria del propi edifici són els condicionants més importants. En aquest cas s'ha partit d'un edifici de forjats reticulars sobre pilars de formigó armat, amb 3 metres entre plantes (H) i 6 metres entre pilars (L). A la figura 6.1 es mostra un croquis de la planta definida i el desplaçament entre plantes D generat pel propi moviment de l'estructura. El sistema de forjats reticulars sobre suports és bastant flexible en front les accions laterals. En aquestes estructures comença a haver inici de plastificació de les armadures quan el desplaçament entre plantes està per sobre de l'1% de l'alçada de la planta. D'aquesta manera es pot projectar per un desplaçament màxim entre plantes de l'1%, i per tant, en plantes de 3 metres d'alçada, el desplaçament màxim entre plantes de 30 mm és acceptable.

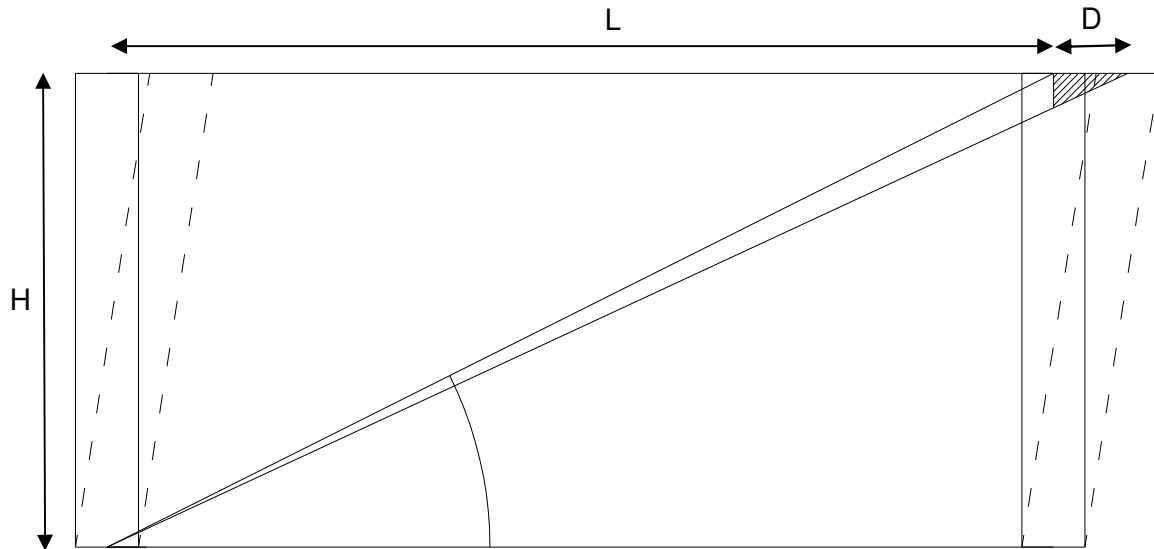


Figura 6.1. Croquis de la planta

Per a una millor anàlisi dels paràmetres del croquis, a la figura 6.2 es mostra un zoom del triangle ombrejat. Per relació d'angles, el triangle ombrejat es divideix en dos triangles rectes que es relacionen tots per l'angle α . Degut a que el desplaçament entre plantes D és molt petit en comparació amb la longitud L de la planta, es considera menyspreable la variació produïda en l'angle α quan ha tingut lloc el desplaçament. Per tant, es considera una α constant i d'aquesta manera es pot trobar el desplaçament total $d_{T\text{dissipadors}}$ que es produeix en els dissipadors instal·lats a la diagonal de la planta.

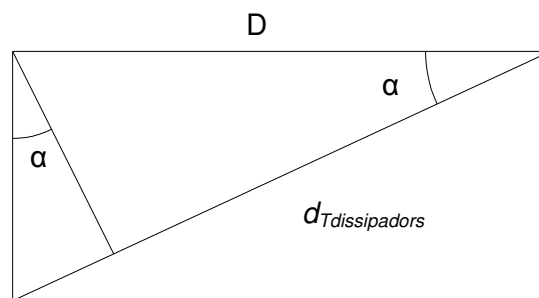


Figura 6.2. Zoom del triangle ombrejat

Aplicant el Teorema de Pitàgores en triangles rectangles, s'obtenen les següents equacions:

$$\alpha = \arctg \frac{H}{L} \quad (\text{Eq.6.1})$$

$$d_{T\text{dissipadors}} = D \cdot \cos \alpha \quad (\text{Eq.6.2})$$

On els paràmetres H, L i D són valors coneguts. Per tant, mitjançant l'equació 6.2 s'obté que el desplaçament total generat als dissipadors muntats a la diagonal de la planta és aproximadament 27 mm. S'ha suposat que el desplaçament entre plantes produeix una deformació que es concentra en el dissipador. A la realitat, si realment es volen reduir danys estructurals (limitar el desplaçament entre plantes) s'ha de preveure i reduir al màxim la part de desplaçament degut a comportament elàstic dels elements de la barra diagonal i els desplaçaments indesitjables per toleràncies excessives en les connexions cargolades.

Considerant que en el conjunt dissipatiu instal·lat hi ha muntat un dissipador a cada extrem del braç connector, quan es produeixen esforços axials de tracció o compressió el valor del desplaçament que li correspon a cada dissipador és de la meitat. Per tant cada dissipador ha de poder deformar-se $d_m = 13,5$ mm per garantir el requeriment de l'1% de desplaçament entre plantes.

D'altra banda cal tenir en compte que quan es produeix l'actuació sísmica, es genera un moviment de va i ve al dissipador de manera que arriben de manera cíclica esforços axials de tracció i compressió. Per aquest motiu, el desplaçament degut a la deformació que ha de permetre el dissipador al passar de l'estat de deformació màxima amb tracció de la barra a deformació màxima amb compressió de la barra diagonal (o viceversa) és de 27 mm. Aquest valor és molt important tan pel que fa a la ductilitat requerida al dissipador com a efectes d'estabilitat de l'ànima (evitar el seu abonyegament) tal com es veurà a l'apartat següent.

6.2 DIMENSIONAMENT DEL MÒDUL

Pel compliment dels valors de disseny descrits a l'apartat anterior es realitza el dimensionament del mòdul bàsic del Sistema Modular de Dissipació mitjançant models de predicció del seu comportament.

Per una banda, es proposen una sèrie d'expressions pel càlcul del desplaçament i la força d'inici de plastificació basant-se amb la teoria de resistència de materials per a bigues rectes a flexió. D'altra banda, s'adopta el model de Kasai, K and Popov, E. P. (1986) per a la predicció de l'abonyegament del mòdul. Tenint en compte els resultats d'un estudi realitzat a la tesis doctoral "Development of a new energy dissipator for seismic design. Numerical

analysis and experimental validation of its behavior. (Cahís F. X., 2001)", ambdós models són vàlids per poder realitzar el dimensionat del mòdul.

Cal tenir en compte que el gruix de l'ànima del mòdul ha de ser suficient per evitar l'abonyegament de la mateixa, ja que comportaria una disminució de la seva capacitat de dissipació. Les dimensions del mòdul han de ser les adients per a poder complir el desplaçament entre plantes de l'1%.

6.2.1 Model de predicció del desplaçament i força d'inici de plastificació

Pel càlcul del desplaçament d_e que es produeix als dissipadors sota comportament elàstic, i en el cas límit el desplaçament d'inici de plastificació, es planteja una expressió que té en compte la deformació per flexió i tallant. Se suposa que l'ànima de la secció doble T del mòdul resisteix la totalitat de l'esforç tallant i que la distribució d'aquest últim és uniforme.

$$d_e = \left[\frac{H^3}{12EI} + \frac{H'}{A_w G} \right] V \quad (\text{Eq.6.3})$$

- On
- H: Alçada de la zona de la secció en doble T del dissipador
 - E: Mòdul de Young
 - I: Moment d'inèrcia de la secció transversal respecte l'eix de flexió
 - H': Alçada de l'ànima descomptant l'amplada total dels rigiditzadors
 - A_w : Àrea de la secció transversal
 - G: Mòdul elàstic a tallant
 - V: Esforç tallant

La figura 6.3 mostra els paràmetres principals per a dimensionar la geometria del mòdul, així com també els esforços que intervenen al produir-se el desplaçament en el dissipador, l'esforç tallant i el moment flector.

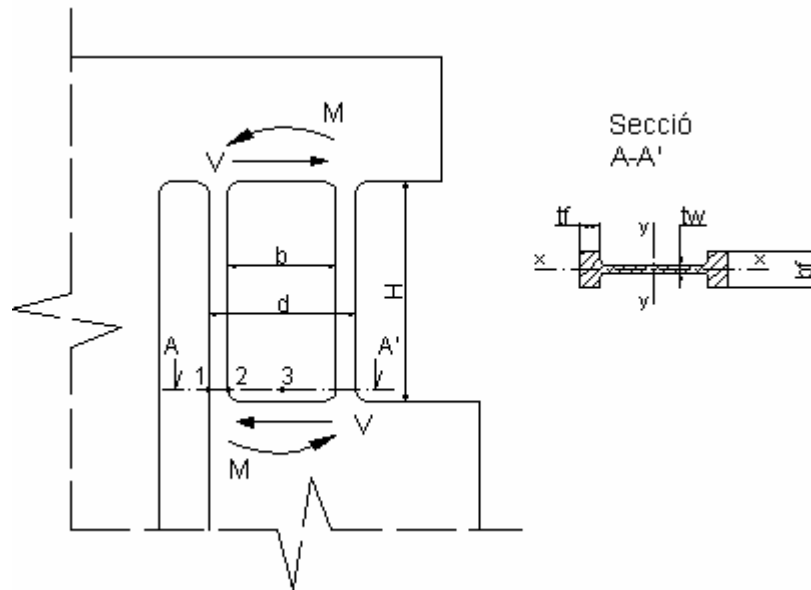


Figura 6.3. Detall del mòdul del Sistema Modular de Dissipació

Les tensions normals i tangencials causades pel moment flector i l'esforç tallant respectivament, es poden determinar a partir de les fórmules de la flexió i del tallant (Gere et al, 1986) referents a la teoria de bigues rectes a flexió.

$$\sigma = \frac{M x}{I} \quad (\text{Eq.6.4})$$

$$\tau = \frac{V S}{I t_w} \quad (\text{Eq.6.5})$$

Per a determinar l'inici de plastificació del mòdul s'adopta el criteri de Von Mises aplicat a la secció A-A' de la figura 6.3. La plastificació comença a tenir lloc quan la tensió de Von Mises equival a la tensió del límit elàstic del material del dissipador.

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sigma_{vm} \quad (\text{Eq.6.6})$$

$$\sigma_{vm} = \sigma_y \quad (\text{Eq.6.7})$$

On σ_{vm} és la tensió de Von Mises i la σ_y el límit de fluència del material.

6.2.2 Model de Kasai i Popov per a la predicció de l'abonyegament

Kasai, K and Popov, E. P. (1986) van desenvolupar un model per a la predicció de l'abonyegament en seccions en doble T sotmeses a flexió simple i plastificació per tallant. Tenint en compte els resultats de la tesis doctoral (Cahís F. X., 2001), el model és vàlid per utilitzar-lo al dissipador SMD. Els paràmetres que varen establir són els següents:

$$\tau_w = \frac{V}{A_w} \quad (\text{Eq.6.8})$$

$$\gamma = \frac{d}{H} \quad (\text{Eq.6.9})$$

On τ_w és la tensió tallant mitja a l'ànima amb el supòsit que aquesta última resisteix tot l'esforç tallant, i γ és la deformació o distorsió angular que es mostra a la figura 6.4. A partir de la corba $\tau_w - \gamma$ (figura 6.5) els autors defineixen γ_m com la diferència màxima entre un valor de la deformació angular i qualsevol valor aconseguit anteriorment. Els valors corresponents a l'inici d'abonyegament de l'ànima s'identifiquen com $\tau_{w,b}$ i $\gamma_{m,b}$. És a dir, quan la deformació angular produïda al mòdul del dissipador assoleix el valor de $\gamma_{m,b}$, es pot produir abonyegament a l'ànima del mòdul.

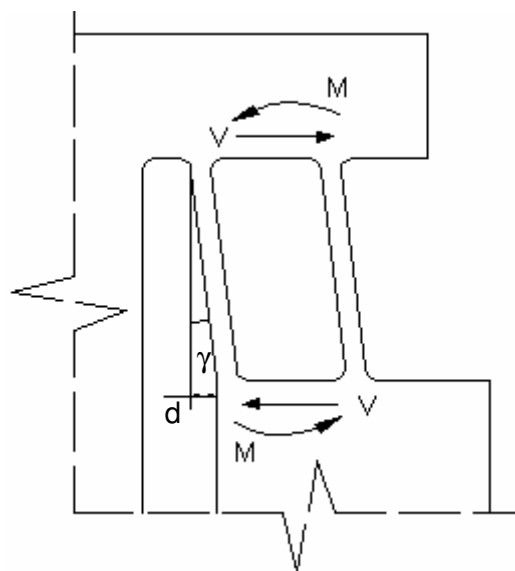


Figura 6.4. Detall del mòdul del Sistema Modular de Dissipació

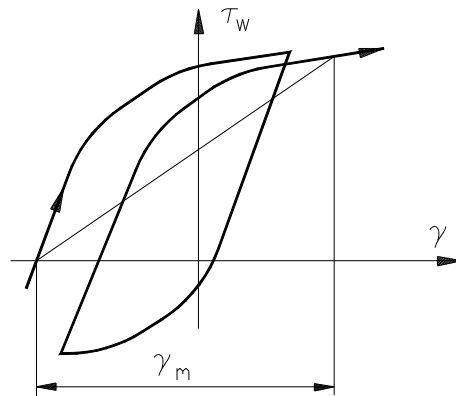


Figura 6.5. Relació histerètica entre la deformació angular i la tensió tallant mitja a l'ànima

Kasai, K and Popov, E. P. (1986) varen deduir una expressió que permet predir l'abonyegament, assumint un valor de 0,3 pel coeficient de Poisson:

$$\gamma_{m,b} = 8.7 K_s (\alpha) \left(\frac{1}{\beta} \right)^2 \quad (\text{Eq.6.10})$$

L'equació 6.11 permet el càlcul del desplaçament necessari per iniciar l'abonyegament a l'ànima del mòdul.

$$d_{m,b} = \gamma_{m,b} \cdot H' \quad (\text{Eq.6.11})$$

6.2.3 Resultats teòrics obtinguts a partir dels models

La taula 6.1 mostra els valors que prenen els paràmetres de la figura 6.3, que defineixen la geometria del mòdul bàsic de dissipació. Aquests valors s'obtenen realitzant varis càlculs, descrits a l'apartat B.1 del capítol B del document Annexos,,tenint en compte la deformació amb comportament estable i sense degradació que es pot exigir al dissipador i que s'ha justificat a l'apartat 6.1.

Dades geomètriques del mòdul	Valors (mm)
H	90
d	60
b	44
b_f	15
t_f	8
t_w	3

Taula 6.1. Valors de la geometria del mòdul bàsic de dissipació

Tenint en compte aquestes dades geomètriques del mòdul i utilitzant les equacions expressades als models de predicció descrits a l'apartat anterior, es calculen el desplaçament d_e i la força V_y d'inici de plastificació, i el desplaçament d'inici d'abonyegament $d_{m,b}$. Per a més informació sobre els càlculs realitzats es pot consultar l'apartat B.1 del capítol B del document Annexos.

El desplaçament d'inici de plastificació produït a un mòdul del dissipador és $d_e = 0,197$ mm. Tal i com es mostra a la figura 6.6, abans d'assolir aquest valor de desplaçament la deformació del dissipador és elàstica i es pot considerar lineal, encara que a la realitat la tensió de límit de proporcionalitat sol ser una mica inferior a la d'inici de plastificació. A partir de 0,197 mm es produeix deformació plàstica i la proporcionalitat es perd.

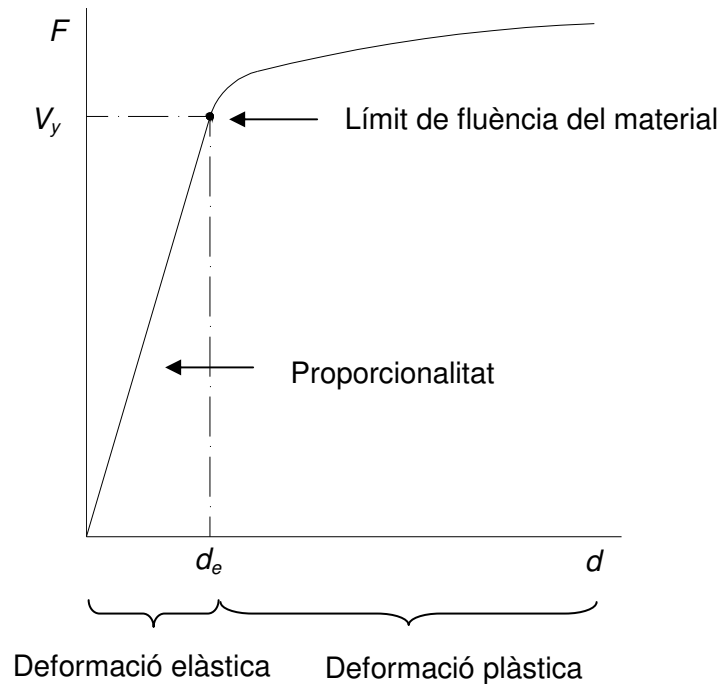


Figura 6.6. Corba Força - Desplaçament

El valor de l'esforç tallant V_y necessari per iniciar la deformació plàstica del mòdul, és a dir, per generar el desplaçament de 0,197 mm, és de 19600 N. La plastificació s'inicia al centre de l'ànima del mòdul.

El desplaçament d'inici d'abonyegament $d_{m,b}$ a un mòdul del dissipador és de 37,56 mm. Per evitar l'abonyegament de l'ànima del mòdul cal que es compleixi l'expressió de l'equació 6.12, sabent que cada dissipador ha de permetre un desplaçament d_m de 13,5 mm al produir-se esforços axials de tracció o de compressió. Per tant, el desplaçament generat al dissipador al passar de l'estat de tracció al de compressió o viceversa és del doble, de 27 mm, tal i com s'esmenta a l'apartat 6.1 del capítol 6 referent als valors de disseny.

$$d_{m,b} \geq 2 \cdot d_m \quad (\text{Eq.6.12})$$

essent d_m el desplaçament que es produeix a banda i banda del dissipador partint des d'un estat de no deformació.

Al complir-se l'expressió es considera que els valors escollits per les dimensions del

mòdul bàsic de dissipació són correctes, tenint en compte les condicions de partida i la validesa dels models de predicció descrits.

No obstant, l'abonyegament del mòdul no és l'única limitació a tenir en compte pel desplaçament màxim, també cal tenir present la capacitat pròpia de deformació plàstica. El material del mòdul del dissipador té una ductilitat que ja ha estat experimentada en altres projectes anteriors (Cahís F. X., 2001), amb més informació a l'apartat B.1 de l'Annex B. En comportament histerètic la deformació angular màxima que s'assolia a banda i banda del dissipador partint de l'estat de no deformació, era aproximadament 0,1551 radianys. A partir d'aquest valor es pot calcular el desplaçament màxim a banda i banda del dissipador prenent l'expressió de l'equació 6.9. Sabent que el paràmetre H del mòdul bàsic de dissipació del SMD pren un valor de 90 mm, el desplaçament màxim en cada sentit és de 13,96 mm i de 27,92 mm passant des de l'estat de tracció al de compressió o viceversa.

Per tant, el límit del desplaçament màxim que pot tenir el mòdul el marca el més restrictiu dels valors obtinguts del desplaçament d'inici d'abonyegament $d_{m,b}$ i del desplaçament màxim de plastificació del material del mòdul $d_{m,p}$. En aquest cas, el marca la capacitat de deformació plàstica del material ja que el valor obtingut de 27,92 mm és lleugerament inferior als 37,56 mm corresponents al desplaçament d'inici d'abonyegament.

Val a dir que aquest valor està força al límit dels 27 mm requerits, però també s'ha de tenir en compte que a les condicions d'assaig va haver-hi molt cicles (increments d'1 mm per cicle) i això comporta un menor desplaçament màxim últim que una situació sísmica real, caracteritzada per unes poques incursions en règim plàstic elevades i la resta de menor amplitud.

Finalment, es corrobora que els valors escollits per les dimensions del mòdul bàsic de dissipació són correctes. Els mòduls dels dissipadors es podran deformar suficientment per permetre el desplaçament requerit entre plantes sense que aparegui abonyegament o ruptura.

7 DISSENY DE LES UNIONS

Al capítol 5 referent als elements del sistema dissipatiu s'esmenta que les unions del dissipador amb els perfils del connector i del braç es realitzen mitjançant cargols. Val a dir que totes les unions que es realitzen en un sistema estructural s'han de projectar de manera que li permetin aconseguir un nivell de seguretat idoni, un bon comportament en servei i durabilitat, i han de ser capaces de resistir almenys els esforços previstos en elles en l'anàlisi global del sistema.

La disposició de les unions s'estudia per a que amb el menor nombre possible d'elements, els esforços existents es transmetin en les condicions més correctes que es puguin aconseguir i de manera que es redueixin al mínim els esforços secundaris.

Al present projecte s'analitzen tres tipus de prototips del Sistema Modular de Dissipació (SMD). Aquests són el SMD Estàndard, el SMD en paral·lel i el SMD en sèrie. Les característiques de cada un d'ells s'esmenten al capítol 4 d'aquest document (definides a les figures 4.2 i 4.4). Els muntatges entre els tres tipus de dissipadors analitzats amb els elements que els hi transmeten els esforços són iguals. Els tres prototips es basen en mòduls bàsics de dissipació iguals als descrits a l'apartat 6.2.3 del capítol 6. Per tant, tenen un tallant d'inici de plastificació i una deformació de plastificació iguals a nivell de mòdul bàsic. La combinació dels mòduls bàsics en diferents formats, dins de cada un dels tres dissipadors, dona lloc a diferències de la força o del desplaçament a nivell del dissipador en conjunt, que determinen un dimensionat específic a les seves unions.

Cada un dels tres tipus de dissipadors requereix d'un nombre i unes dimensions determinades de cargols. El disseny d'aquestes unions es basa en la resistència a tallant de les seccions dels cargols i en la resistència a l'aixafament de les xapes d'unió. La disposició dels forats al dissipador ha de complir amb les disposicions constructives de la normativa aplicada (Código técnico de la Edificación). Per a més informació sobre la normativa aplicada i els càlculs de les unions cargolades als tres tipus de prototips es pot consultar a l'Annex B.

En el cas del SMD Estàndard, la unió entre el dissipador i els perfils U del connector requereix de dos cargols col·locats en sèrie. D'altra banda a la connexió entre el dissipador i

els perfils omega del braç es requereix de quatre cargols, dos col·locats a la part superior i dos a l'inferior. En aquesta connexió es necessiten més cargols degut a que hi ha problemes d'aixafament dels forats dels perfils omega del braç, que tenen un menor espessor.

Els forats corresponents a la connexió del dissipador amb el connector estan situats a l'eix de simetria del dissipador de manera que es transmeti la força repartida per igual a les seves parts superior i inferior. Els forats superiors i inferiors de la unió entre el dissipador i el braç, estan situats a la mateixa distància respecte l'eix de simetria del dissipador i alineats amb el centre dels mòduls superiors i inferiors respectivament. D'aquesta manera s'aconsegueix que el moment flector a la meitat dels mòduls bàsics de dissipació sigui aproximadament nul (només hi ha tallant). Aquest fet és important ja que permet els mateixos moments flectors als dos extrems de cada mòdul bàsic de plastificació, tal com es produeix en el Shear Link (Cahís F. X.,2001), i fa que no es propiciï la plastificació d'una meitat del dissipador o que s'accentuï la deformació per flexió, que no és la desitjada.

En ambdues connexions els cargols utilitzats són mètrics 12 de grau 10.9 amb les corresponents femelles i volanderes, i per tant els diàmetres dels forats, tenint en compte les toleràncies, són de 13 mm. Per a més informació sobre les característiques tècniques dels cargols, femelles i volanderes es pot consultar a l'Annex D. A la figura 7.1 es mostra la disposició i les dimensions dels forats al SMD Estàndard.

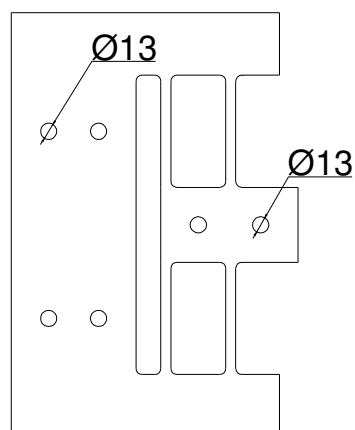


Figura 7.1. SMD Estàndard

Respecte el SMD en paral·lel, la seva unió amb el connector consta de tres cargols col·locats en sèrie. A la connexió entre el dissipador i el braç es requereix de sis cargols, tres col·locats a la part superior i tres a l'inferior. En aquest cas també es deu a problemes

d'aixafament ja que els forats dels perfils omega del braç tenen un espessor més petit. De la mateixa manera que en el SMD Estàndard, els forats estan situats a l'eix de simetria en el cas de la unió amb el connector, i a una certa distància respecte l'eix de simetria del dissipador en el cas de la connexió amb el braç. En ambdues connexions els cargols utilitzats són mètrics 16 de grau 10.9 i per tant els forats tenen un diàmetre de 17 mm. A la figura 7.2 es mostra la disposició i les dimensions dels forats al SMD en paral·lel.

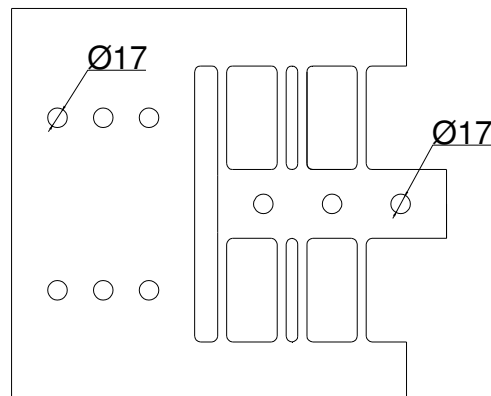


Figura 7.2. SMD en paral·lel

Per últim hi ha les unions entre SMD en sèrie i els elements connector i braç. En aquest cas, el nombre i les dimensions dels cargols coincideixen amb els del SMD Estàndard degut a que ambdós dissipadors plastifiquen a la mateixa força. Per tant es col·loquen dos cargols M12 de grau 10.9 en sèrie a la unió del dissipador amb el connector i quatre cargols M12 de grau 10.9 a la connexió amb el braç. A la figura 7.3 es mostra la disposició dels forats al SMD en sèrie.

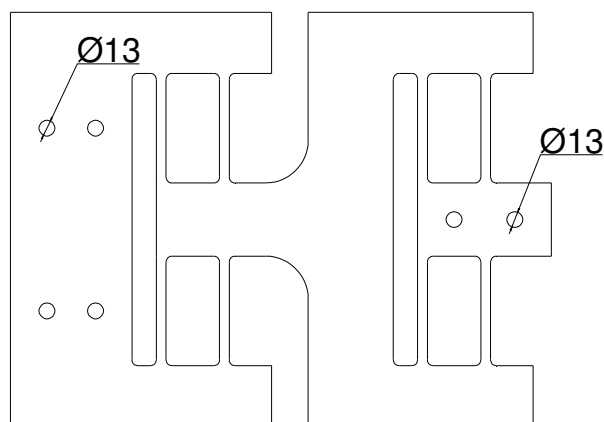


Figura 7.3. SMD en sèrie

8 ANÀLISI DELS PROTOTIPS

En aquest capítol s'analitza el Sistema Modular de Dissipació sota comportament mecànic mitjançant el programa d'anàlisi per elements finits anomenat ABAQUS. Per a l'anàlisi de les característiques més importants del dissipador, esmentades en el capítol 4, es realitza l'estudi de tres tipus de prototips: el SMD estàndard, el SMD en paral·lel i el SMD en sèrie.

A partir dels resultats obtinguts del SMD Estàndard s'analitzen els punts on es produeix plasticitat, esmentant les uniformitats de tensions i deformacions en els mòduls. A més a més, es realitza una comparació entre els desplaçaments i les forces d'inici de plastificació obtinguts a partir del model teòric i de l'anàlisi per elements finits.

D'altra banda es fa una comparació entre els resultats obtinguts dels tres tipus de prototips analitzats a partir del programa d'element finits. Es comparen les respostes numèriques de cada prototip amb els paràmetres de comportament determinats per procediments simplificats.

8.1 ANÀLISI PER ELEMENTS FINITS (AEF)

Aquest apartat introdueix el programa utilitzat i el mètode d'anàlisi per elements finits per tenir una idea general del funcionament i les possibilitats que ofereix.

Els programes d'AEF calculen solucions aproximades a problemes d'anàlisi que puguin ser representats mitjançant equacions diferencials. En termes d'enginyeria, aquests programes permeten reduir significativament el temps de disseny d'un producte ja que possibiliten l'estalvi de moltes fases d'assajos dels prototips dels productes. En alguns casos concrets s'arriba a suplir del tot aquesta fase de proves. La possibilitat de poder realitzar l'anàlisi d'un producte per elements finits, permet un estalvi econòmic en termes de fabricació de prototips i preparació d'assaigs.

Existeixen varis programes aptes per a dur a terme càlculs d'elements finits. En el cas

de l'anàlisi del Sistema Modular de Dissipació s'utilitza l'ABAQUS.

El Mètode dels Elements Finites consisteix en transformar un sistema físic real, continu, que té un nombre infinit d'incògnites, en un altre sistema discret, mitjançant un procés de mallat. És a dir, en un model amb un nombre finit d'incògnites relacionades entre si per elements de nombre i mida finites. És important intuir com serà el comportament del sistema real modelitzat per tal de saber si els resultats obtinguts a partir de l'anàlisi són fiables o no. Pot haver-hi casos en que la modelització no sigui fiable amb el comportament real que té el sistema.

Un model creat pel Mètode d'Elements Finites està format per Elements i Nodes que defineixen el mallat. Un Element és una representació matemàtica matricial, anomenada matriu de rigidesa, de la interacció entre els graus de llibertat d'un conjunt de nodes. Pot ser puntual, lineal, superficial, volumètric, etc. Estan connectats entre si a través dels nusos que permeten la transferència d'informació d'un element als altres elements als quals està connectat.

Un Node és una localització en l'espai d'un punt, determinat per les seves coordenades en X, Y i Z. Cada node té uns certs graus de llibertat que serien els moviments possibles que disposa (girs o desplaçaments), i està afectat per determinades accions del sistema com poden ser forces, desplaçaments imposats, condicions de contorn, etc. En el cas del dissipador estudiat, les condicions de contorn inclouen desplaçaments i restriccions a diferents nusos.

8.2 SISTEMA MODULAR DE DISSIPACIÓ ESTÀNDARD

8.2.1 Modelització de la peça

Per l'anàlisi del Sistema Modular de Dissipació Estàndard, amb el programa d'elements finits, s'aprofita la simetria respecte l'eix longitudinal del dissipador per simplificar el model i analitzar-ne la meitat, imposant a la zona de l'eix de simetria les condicions pertinents. El model, tant mateix, s'analitza en 2D a través d'elements 2D, amb la condició d'estat de tensions pla.. D'aquesta manera es pot obtenir una simulació més ràpida del model ja que no conté tants nodes i elements al seu mallat com tindria la peça sencera o en

tres dimensions, possibilitant l'obtenció d'un mallat més fi.

El dibuix del dissipador estàndard introduït al programa ABAQUS es mostra a la figura 8.1. Les dimensions del mòdul del dissipador són les obtingudes a l'apartat 6.2.3 del capítol 6 i els diàmetres dels forats per on passen els cargols són els obtinguts al capítol 7. El disseny del contorn de la peça ve determinat d'una banda per les dimensions del mòdul i dels forats, i d'altra banda per les característiques pròpies del dissipador. Els valors de les cotes que permeten dibuixar el contorn del dissipador es mostren al plànol 1001 SMD Estàndard del document Plànols.

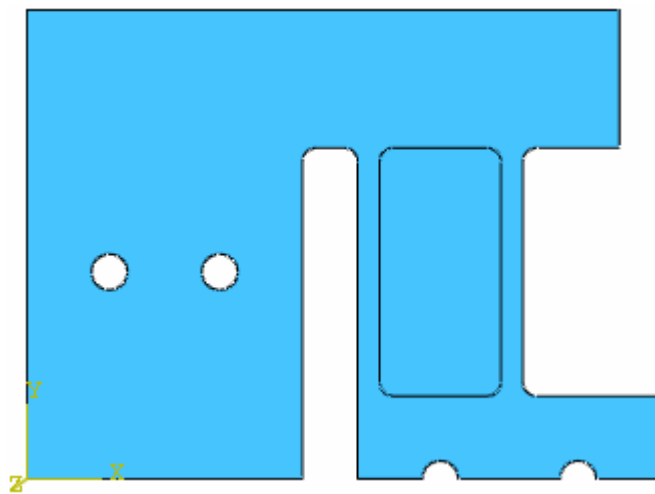


Figura 8.1. Model del SMD Estàndard introduït al programa

Un cop definides la forma i les dimensions de la peça es procedeix a l'assignació del material. El material del dissipador és acer S235JR. L'equació tensió – deformació o equació constitutiva del material, que pot definir el seu comportament, es pot assumir com a bilineal amb un comportament inicialment elàstic i amb un posterior comportament plàstic a partir de la tensió de plastificació (figura 8.2). La zona plàstica té un pendent per incloure un cert enduriment del material i afavorir la convergència numèrica. El pendent de la part elàstica, o mòdul de Young E , pren per valor 210000 MPa i el Coeficient de Poisson és 0,3 (típics de l'acer). S'adopta com a tensió de fluència del material σ_y el valor de la tensió del límit elàstic característic de l'acer, en aquest cas de 235 MPa.

Cal dir, però, que el sentit del límit elàstic característic a partir del percentil 5% (95% de possibilitat de ser superat), tant important per assolir estructures segures convencionalment, es perd a l'hora de dissenyar els dissipadors. Els dissipadors cal

projectar-los més aviat amb valors de tensió de plastificació realistes i amb poca dispersió, ja que la dissipació no es pot produir en càrregues més elevades de les projectades, perquè es podria sobrecarregar l'estructura per sobre del desitjat.

El mòdul de Young relaciona, mitjançant l'expressió de l'equació 8.1, la tensió σ i la deformació unitària ε que pateix el material quan el seu comportament és elàstic. Per tant, l'increment de tensió en el material guarda proporcionalitat amb l'increment de deformació unitària que pateix.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{Eq.8.1})$$

A partir d'aquesta equació es pot deduir la deformació unitària ε_y que pateix el dissipador quan la tensió produïda equival al límit elàstic del material σ_y .

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} = \frac{235}{210000} = 0,001119 \approx 1120\mu \quad (\text{Eq.8.2})$$

D'altra banda per definir la corba de la part plàstica es considera que amb una deformació unitària 20 vegades superior a la deformació unitària del límit elàstic obtinguda a l'equació 8.2, el pendent de la recta és 300 vegades inferior al mòdul de Young del material. D'aquesta manera s'obté la corba bilineal tensió - deformació del material utilitzada per fer la simulació del dissipador.

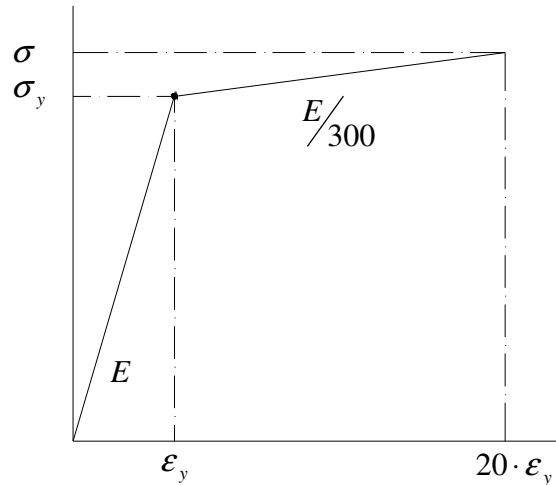


Figura 8.2. Corba bilineal Tensió – Deformació unitària del material

Al ser el dissipador una peça sòlida amb diferents gruixos, es creen i s'assignen dues seccions. A l'apartat 6.2.3 del capítol 6 es defineix un gruix del dissipador de 15 mm i un gruix dels mòduls de 3 mm.

Com que es vol simular el desplaçament que pateix el dissipador al deformar-se elàstica i plàsticament, es creen una sèrie de condicions de contorn. A l'analitzar la meitat del dissipador degut a la seva simetria, cal definir en primer lloc que els punts que formen l'eix de simetria de la peça no es desplacen en l'eix Y i no giren respecte l'eix Z . Es restringeixen aquests dos moviments tal i com es mostra a la figura 8.3, essent l'eix Y el vertical i l'eix Z el perpendicular al pla de la figura.

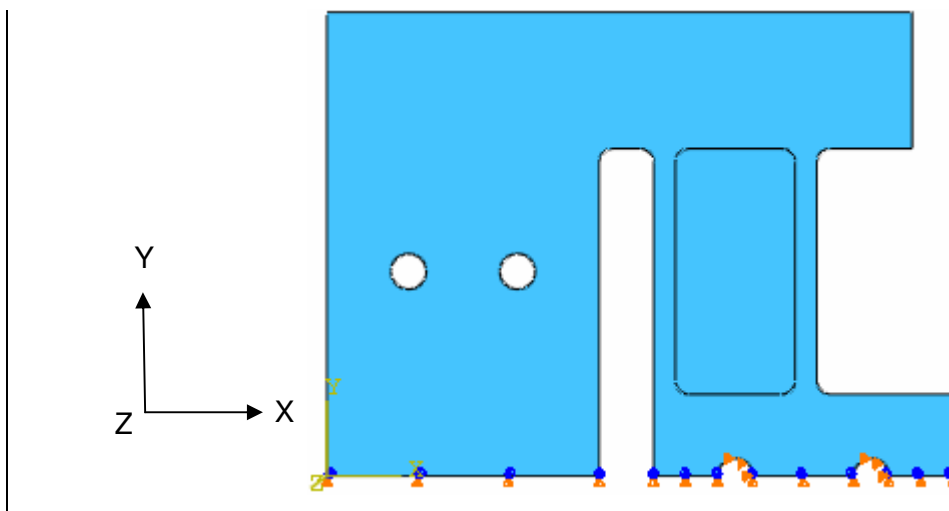


Figura 8.3. Condicions de contorn a l'estat inicial

D'altra banda, es defineixen els desplaçaments que pateixen els punts dels forats on es transmeten els esforços axials provinents del connector i del braç, i generats pel moviment de l'estructura. En aquest cas analitzat s'assigna un desplaçament 0 en direcció X als forats on es colla el connector, i es considera un desplaçament respecte l'eix X de 3 mm als forats on es colla el braç, generant un esforç axial de tracció. S'ha considerat un desplaçament molt inferior al que pot tenir el dissipador perquè interessa bàsicament veure com es comporta fins que la plastificació s'extén uniformement. S'ha vist que amb aquest desplaçament es més que suficient, i fer-lo augmentar-lo comporta superar problemes de convergència considerables, i que s'ha considerat innecessari. La figura 8.4 mostra la direcció i el sentit del desplaçament assignat als forats.

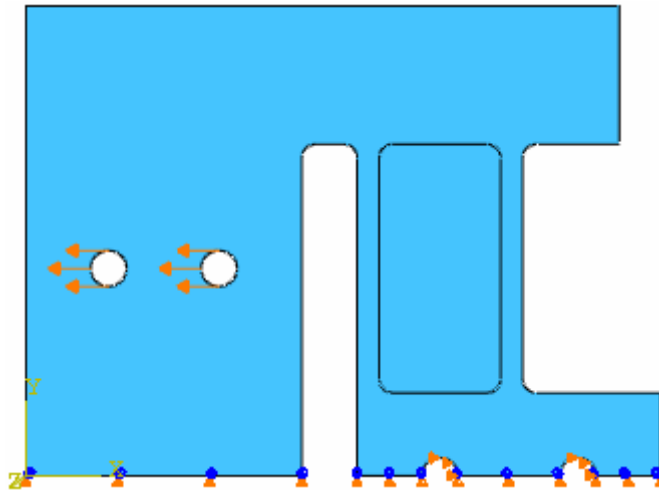


Figura 8.4. Condicions de contorn a l'estat final

Per poder analitzar a posteriori el comportament del dissipador al ser sotmès al desplaçament de 3 mm anteriorment esmentat, es malla la peça amb elements de forma quadrada tal i com s'observa a la figura 8.5. El tipus d'element és un sòlid 2D de 4 nusos, amb plasticitat i tensió plana. Al ser de més interès la resposta en els mòduls del dissipador, el mallat creat en aquesta zona és més fi que a la resta. D'aquesta manera s'obté més precisió en els resultats obtinguts a partir de la simulació.

Un cop definits tots els passos anteriors, es finalitza la fase de modelització del dissipador i es realitza la seva simulació.

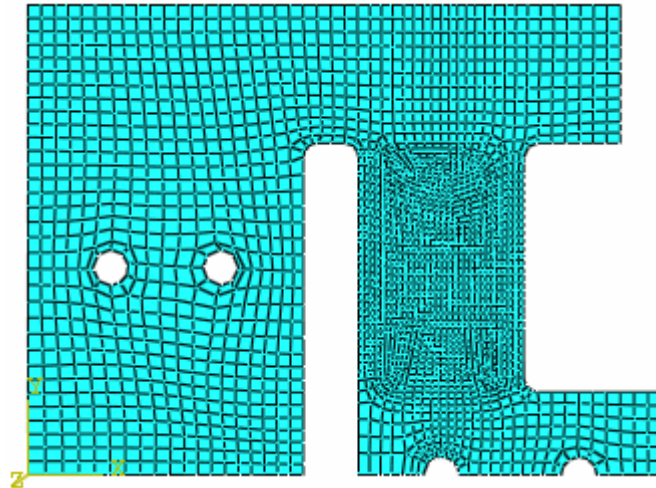


Figura 8.5. Mallat del dissipador

8.2.2 Anàlisi dels resultats de la simulació

El primer anàlisi que es porta a terme és la resposta del dissipador sota l'estat de tensions de Von Mises mostrat a la figura 8.6. D'aquesta manera es poden veure les zones on es produeixen les tensions equivalents més elevades i per tant on es produeix la plasticitat del material.

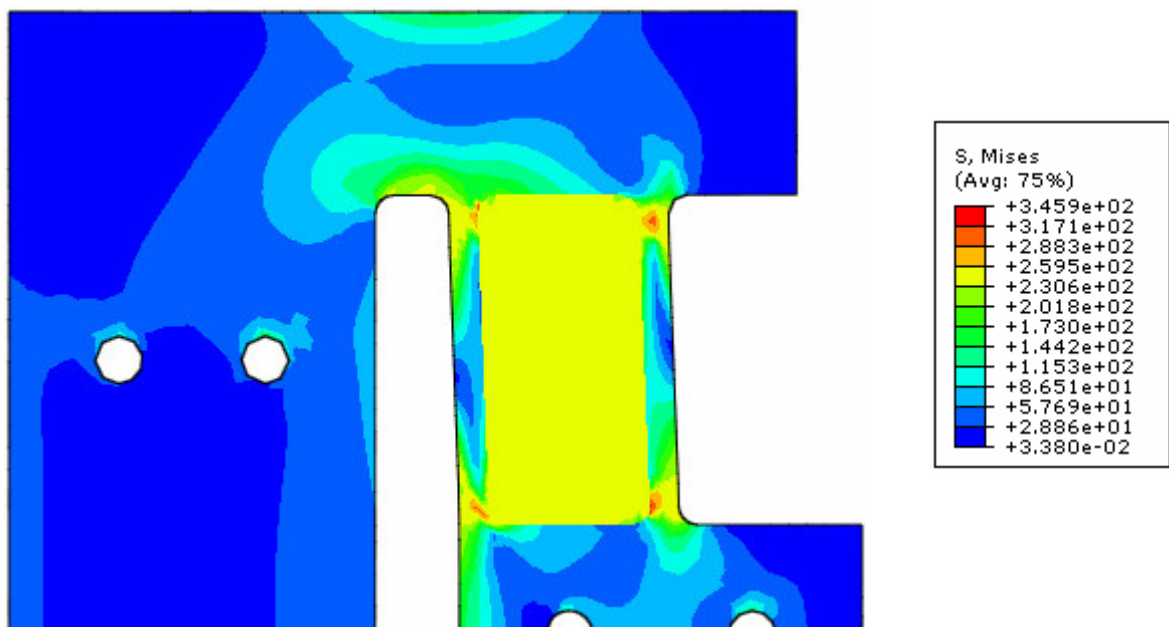


Figura 8.6. Dissipador sota l'estat de tensions de Von Mises amb un desplaçament de 3 mm a tracció

Per analitzar el comportament que té el dissipador al produir-se el desplaçament de 3 mm, es detallen les tensions creades amb diferents colors. A simple vista s'observa que les tensions més elevades tenen lloc a la zona del mòdul, representades pels colors groc, taronja i vermell. Aquest aspecte és important ja que interessa que la plastificació tingui lloc a aquesta zona, dissenyada expressament per dissipar l'energia transmesa al dissipador.

L'inici de la plastificació del mòdul es produeix al seu centre, a tota l'extensió de l'ànima. Com es pot apreciar amb el predomini del color groc, el mòdul es caracteritza per tenir una uniformitat de tensions. Aquest fet és important, ja que és desitjable que el mòdul dissipï per tallant i uniformement perquè permet dissipar molta energia amb petits desplaçaments del dissipador.

Observant els valors de les tensions de Von Mises (expressades en MPa) mostrats a la figura 8.6, es veu que amb el desplaçament generat de 3 mm, el material del mòdul plastifica degut a que les tensions assolides són més elevades que el límit elàstic del material. Cal esmentar que el material és acer S235JR i per tant el límit elàstic és 235 MPa.

També és important analitzar el que succeeix a la zona superior del dissipador. Es tracta d'un cantell rígid encarregat de transmetre els esforços provinents dels forats cap al mòdul. Aquesta part ha de ser el suficientment rígida per evitar que es vincli i es deformi plàsticament. No interessa que es pugui produir un punt de concentració de tensions amb possible formació de fissures. En aquest cas, els valors de les tensions assolides en aquesta zona no són excessivament elevades.

Altres zones on es produeixen tensions molt elevades i deformacions plàstiques, és a les ales de les seccions en doble T situades als extrems del mòdul. Aquestes zones han de plastificar necessàriament per permetre la deformació de l'ànima del dissipador a tallant. Aquestes deformacions són inevitables però no són desitjables ja que en punts molt específics i petits es concentren tensions molt elevades que poden provocar la formació de fissures, i una possible ruptura del material. Per aquest motiu, per disminuir la concentració de tensions, es disposa de zones radiades als extrems del dissipador.

El següent anàlisi té en compte el desplaçament i la força d'inici de plastificació del mòdul del dissipador. En primer lloc és interessant observar quins són els desplaçaments generats a les diferents zones del dissipador al finalitzar la simulació del model, havent aplicat el desplaçament de 3 mm.

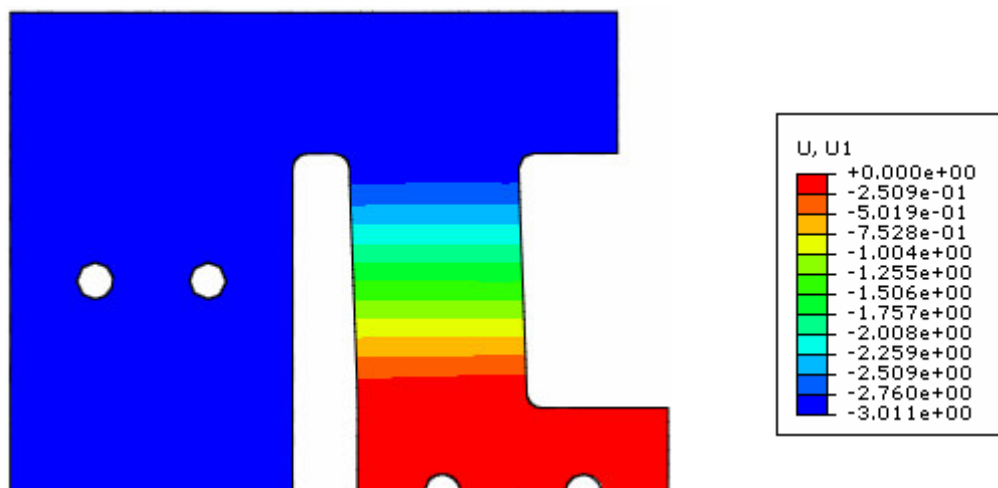


Figura 8.7. Variacions de desplaçament produïts al dissipador

Mitjançant el requadre adjunt de la figura 8.7, s'observa que la zona vermella és la definida amb un desplaçament nul i on es troben els forats on es colla el connector. D'altra banda, la zona blava correspon al desplaçament de 3 mm produït per la deformació del mòdul. També es poden observar les variacions de desplaçament que es formen al llarg del mòdul del dissipador, representades amb diferents colors. Aquest gradient de desplaçament al llarg de la zona dissipativa és pràcticament constant, reafirmant la distribució uniforme de la deformació plàstica en el cos dissipatiu. Aquesta zona és on interessa que es produeixi la plastificació del material i es caracteritza per tenir una secció de menys gruix, exactament de 3 mm en comparació dels 15 mm de la resta del dissipador.

En segon lloc interessa obtenir els valors de les forces exteriors que es produeixen al dissipador. Per calcular-les se sumen les forces de reacció, donades en la direcció X pel programa d'elements finits, a les zones on es posen les limitacions de desplaçament de 0 i de 3 mm, indicades amb els requadres de la figura 8.8.

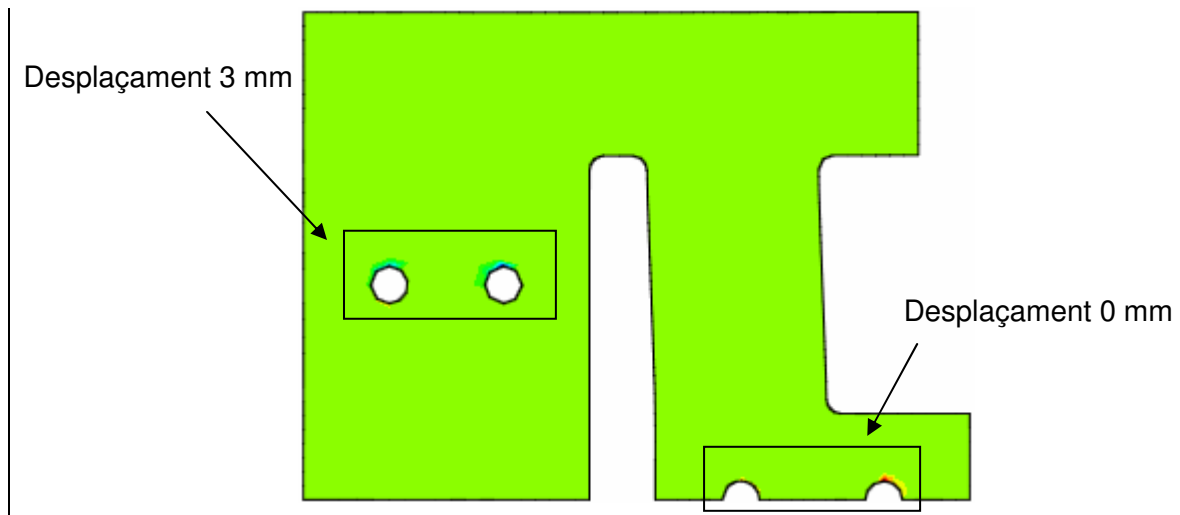
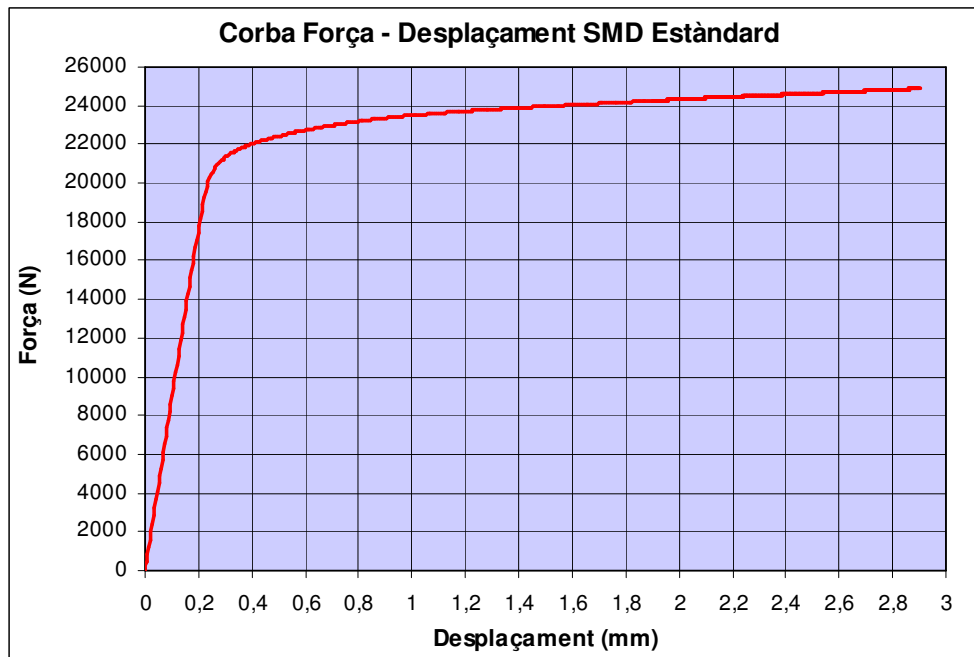


Figura 8.8. Forces de reacció als forats del dissipador

Per una banda es calcula la suma de les forces de reacció a la zona dels forats amb desplaçament nul. A partir dels valors obtinguts del programa d'elements finits, el valor de la suma és de 24870 N. Aquesta força ha de coincidir amb la suma de les forces de reacció obtingudes a la zona dels forats amb desplaçament de 3 mm, perquè hi hagi equilibri de forces en direcció X.

Per altra banda es realitza una gràfica força – desplaçament, prenent com a força la suma de les forces de reacció obtingudes als forats amb desplaçament de 3 mm, i com a desplaçament el generat a la zona del mòdul. D'aquesta manera es poden obtenir la força i el desplaçament d'inici de plastificació del mòdul sense tenir en compte les deformacions a la zona dels forats i a la zona elàstica del dissipador.

Observant els resultats obtinguts a partir del programa, la suma de les forces de reacció a aquests forats és de 24870 N coincidint amb el valor anterior. A continuació es mostra la gràfica força – desplaçament esmentada.



La corba es caracteritza per tenir un primer tram on la deformació del material és elàstica, i un segon on la deformació és plàstica. Com es pot observar, la primera part de la corba és una recta on les forces de reacció guarden proporcionalitat amb el desplaçament que es produeix. El límit d'aquesta recta coincideix amb el punt de fluència del material, que indica els valors de la força i el desplaçament d'inici de plastificació del mòdul bàsic de dissipació, que forma part de la meitat del dissipador analitzat. Aquests valors corresponen aproximadament a una força de 19600 N i un desplaçament de 0,22 mm. A partir d'aquest punt la proporcionalitat es perd i es produeix un canvi de pendent a la corba, provocant que amb poca variació de força es generi un desplaçament al dissipador molt més elevat.

Cal tenir en compte que al programa d'elements finits s'analitza la meitat del dissipador degut a la seva simetria. Per aquest motiu, la força d'inici de plastificació V_y del Sistema Modular de Dissipació Estàndard és el doble de l'especificada anteriorment, és a dir, de 39200 N. Això és degut a que el dissipador consta de dos mòduls i per assolir el desplaçament de 0,22 mm en que s'inicia la deformació plàstica, cal realitzar dues vegades la força d'inici de plastificació d'un mòdul. A la figura 8.9 es mostra el SMD Estàndard amb els paràmetres que intervenen a l'inici de la plastificació.

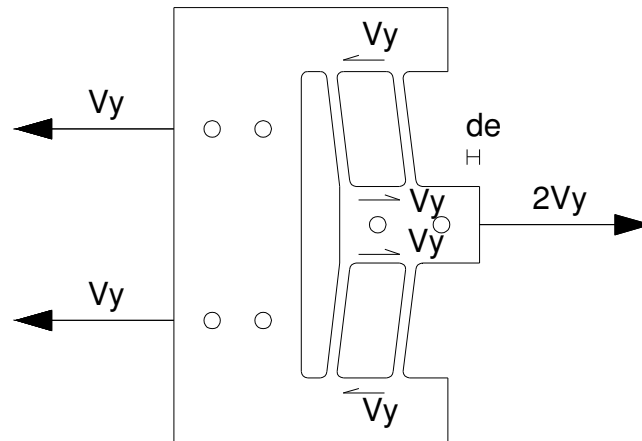


Figura 8.9. Paràmetres d'inici de plastificació al SMD Estàndard

Finalment es realitza el mateix procediment de modelització i simulació del dissipador però aplicant el desplaçament de 3 mm en sentit contrari, és a dir, produint esforços axials de compressió. I es comprova que el dissipador es comporti de la mateixa que el cas anterior on s'apliquen esforços axials de tracció.

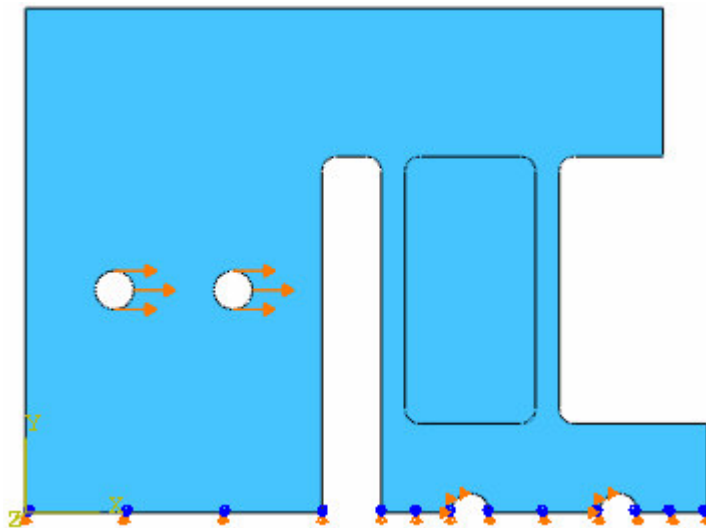


Figura 8.10. SMD Estàndard sotmès a esforços axials de compressió

Com s'observa a la figura 8.11 l'estat de tensions generat al dissipador és igual o semblant que l'obtingut en el cas del primer model implementat. Hi ha uniformitat de tensions a la zona del mòdul i zones on les tensions són molt elevades degut a una concentració de tensions.

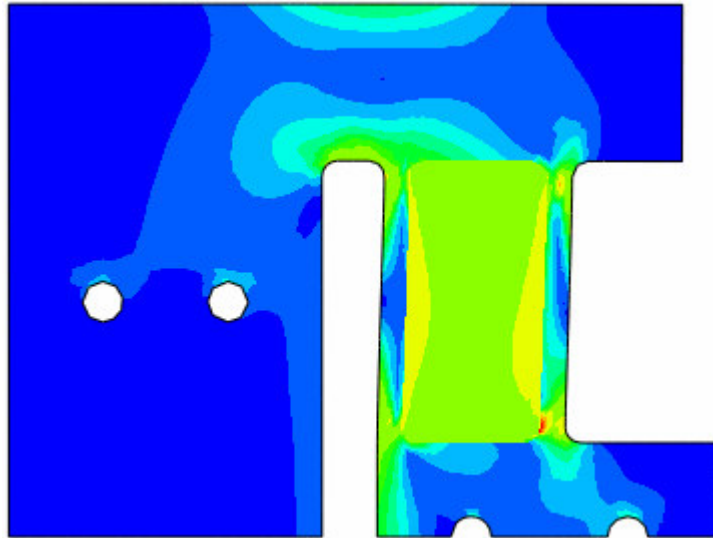
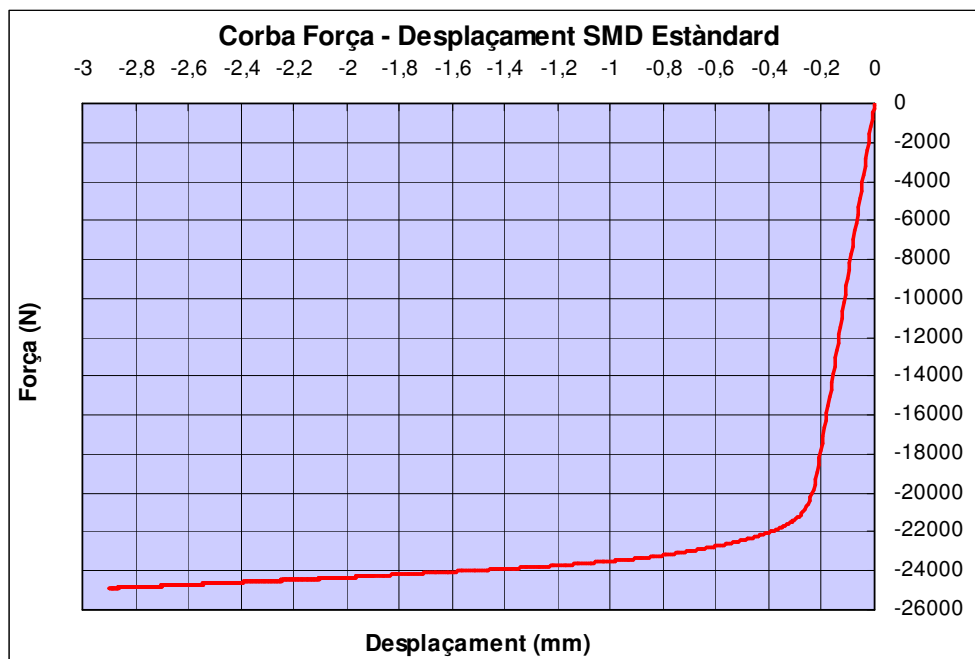


Figura 8.11. SMD Estàndard sota l'estat de tensions de Von Mises amb desplaçament de 3 mm a compressió

D'altra banda la corba força – desplaçament obtinguda als forats on s'imposen els 3 mm de desplaçament a compressió, és idèntica que l'anterior però amb els valors de desplaçament i força negatius.



8.2.3 Comparativa entre model de predicció teòric i programa d'elements finits

En aquest apartat es realitza una comparació entre els valors obtinguts del desplaçament i la força d'inici de plastificació del mòdul a partir del model de predicció teòric, determinats a l'apartat 6.2.3 del capítol 6, i dels resultats de l'anàlisi realitzat amb el programa d'elements finits determinats a l'apartat anterior.

En els dos procediments realitzats, els resultats obtinguts es basen en un únic mòdul ja que tant el model de predicció com el dissipador analitzat mitjançant l'ABAQUS contenen un sol mòdul. Per tant es pot realitzar la comparativa següent:

Valors d'inici de plastificació	Desplaçament (mm)	Força (N)
Model teòric	0,197	19560
Programa elements finits	0,22	19600

Taula 8.1. Paràmetres d'inici de plastificació

Observant els valors de la taula es pot veure que les forces obtingudes són molt semblants. Per tant, les expressions de la flexió (Eq. 6.4) i del tallant (Eq. 6.5) referents a la teoria de bigues rectes a flexió, juntament amb el criteri de Von Mises (Eq. 6.6), són adients pel càlcul de la força d'inici de plastificació.

Respecte els valors del desplaçament, la diferència és força petita, al voltant del 10%. L'expressió simplificada del desplaçament d'inici de plastificació (Eq. 6.3), basada en la teoria bàsica de resistència de materials a flexió, compleix bastant bé amb el resultat obtingut a partir del model analitzat al programa d'elements finits.

És interessant saber que els resultats obtinguts a partir del programa s'ajusten bastant bé amb els valors teòrics obtinguts a partir dels model. D'aquesta manera es pot veure que el comportament del dissipador és el desitjat.

8.3 COMPARATIVA ENTRE ELS PROTOTIPS

El Sistema Modular de Dissipació es caracteritza per ser un dissipador modular, és a dir, que partint d'un mateix mòdul bàsic de dissipació, només variant el nombre de mòduls i la seva disposició, es poden dissenyar dissipadors amb diferents prestacions en quan a la força i el desplaçament de plastificació. Per aquest motiu s'analitzen mitjançant el programa d'elements finits dos varietats del dissipador estàndard, el SMD en paral·lel i el SMD en sèrie. Les característiques dels tres tipus de prototips que s'analitzen estan definides al capítol 4.

En aquest apartat es comparen les seves respostes numèriques amb els paràmetres de comportament determinats per procediments simplificats.

El procediment de modelització de les dues varietats del dissipador estàndard es realitza de la mateixa manera que el definit a l'apartat 8.1.1. Un cop feta la simulació dels dos models, es pot observar a les figures 8.12 i 8.13 els dissipadors en paral·lel i en sèrie sota l'estat de tensions de Von Mises respectivament, havent aplicat a cada un d'ells un desplaçament de 3 mm a tracció.

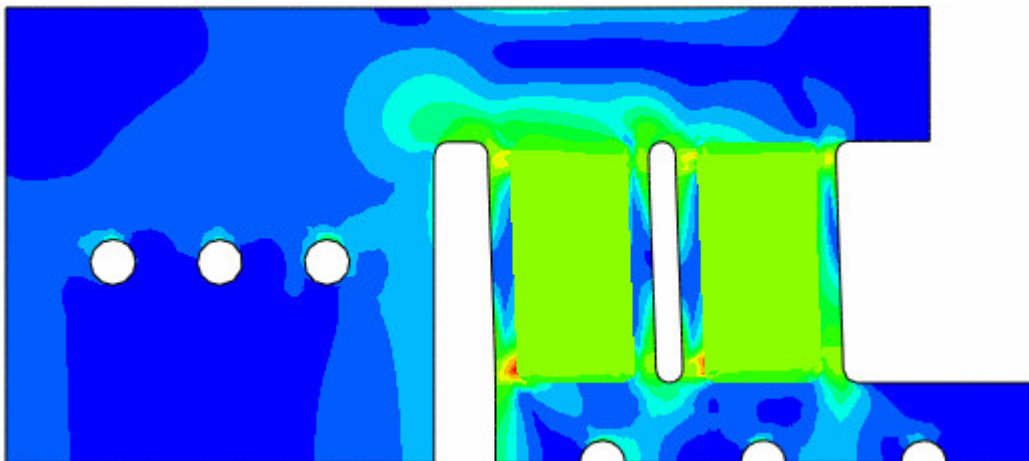


Figura 8.12. SMD en paral·lel sota l'estat de tensions de Von Mises amb desplaçament de 3 mm a tracció

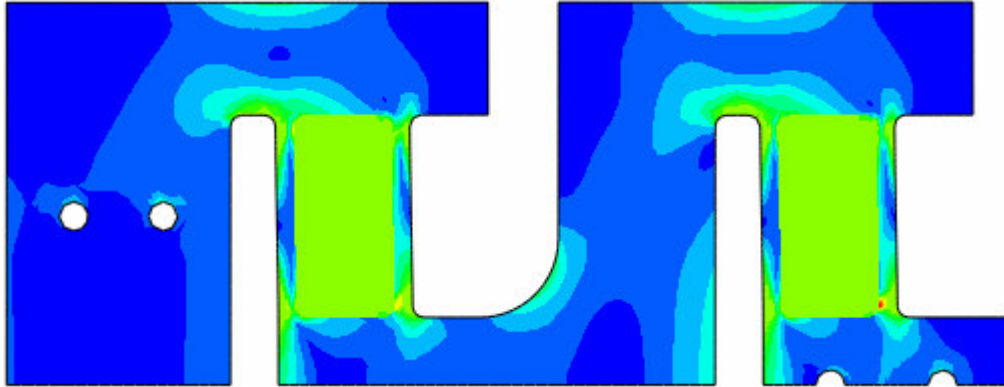
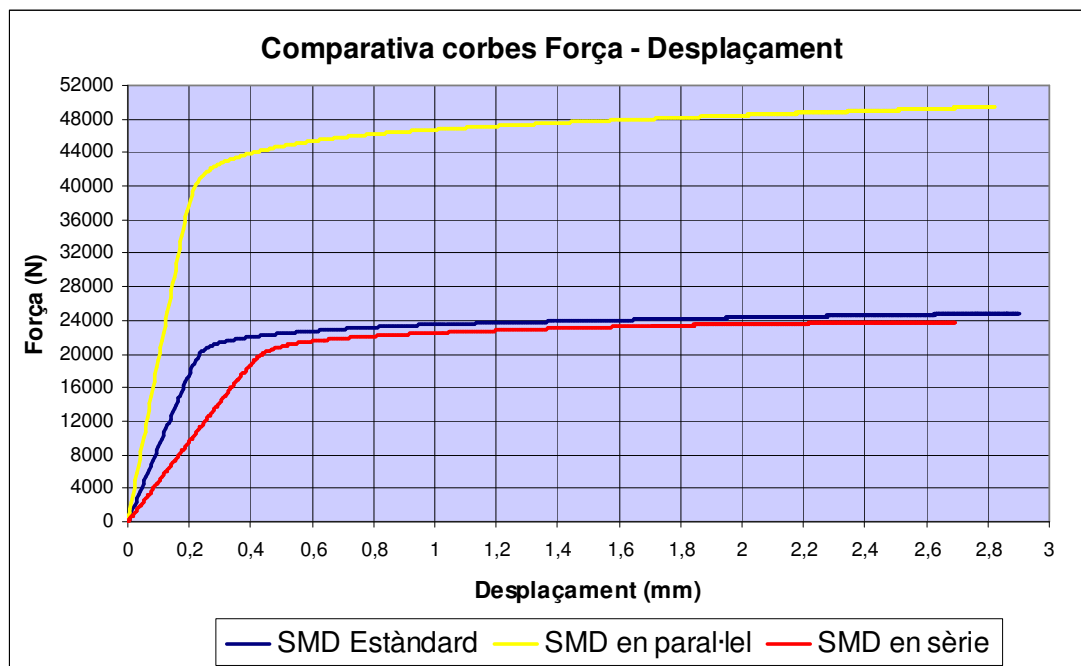


Figura 8.13. SMD en sèrie sota l'estat de tensions de Von Mises amb desplaçament de 3 mm a tracció

Es compleix de la mateixa manera que al dissipador estàndard, la uniformitat de tensions a la zona dels mòduls i possible concentració de tensions als seus extrems amb presència de plastificació. És important que la dissipació d'energia mitjançant la deformació plàstica per esforç tallant tingui lloc a la zona dels mòduls, ja que interessa que treballi el més eficientment possible.

Seguidament es realitza una gràfica força – desplaçament per comparar els tres tipus de prototips, i així determinar les característiques principals i les relacions que tenen entre ells. D'igual manera que a la gràfica anterior, la força considerada a cada dissipador és la suma de les forces de reacció obtingudes als forats amb desplaçament de 3 mm i com a desplaçament el generat a la zona dels mòduls. D'aquesta manera s'obtenen les forces i els desplaçaments d'inici de plastificació dels mòduls de cada dissipador, sense tenir en compte les deformacions a les zones dels forats i a les zones elàstiques. Per una millor visualització apareixen les tres corbes a la mateixa gràfica.



Per una millor representació dels valors més significatius de les corbes, es mostra una taula amb els valors aproximats dels desplaçaments i forces d'inici de plastificació de cada un dels tres tipus de dissipadors analitzats. Com que els models analitzats són les meitats simètriques de cada dissipador, cal multiplicar la força obtinguda per dos ja que en realitat el nombre de mòduls és del doble que el simulat.

Valors d'inici de plastificació	Desplaçament (mm)	Força model(N)	Força real (N)
SMD Estàndard	0,22	19600	39200
SMD en paral·lel	0,21	39200	78400
SMD en sèrie	0,42	19600	39200

Taula 8.2. Valors d'inici de plastificació dels tres prototips analitzats

Aquests resultats obtinguts haurien de ser coherents amb els esquemes del Sistema Modular de Dissipació, mostrats a la figura 8.14, on es mostra la força de plastificació i el desplaçament teòric corresponent, suposant la deformació concentrada als mòduls bàsics de dissipació, despreciant la deformació elàstica de la resta del dispositiu.

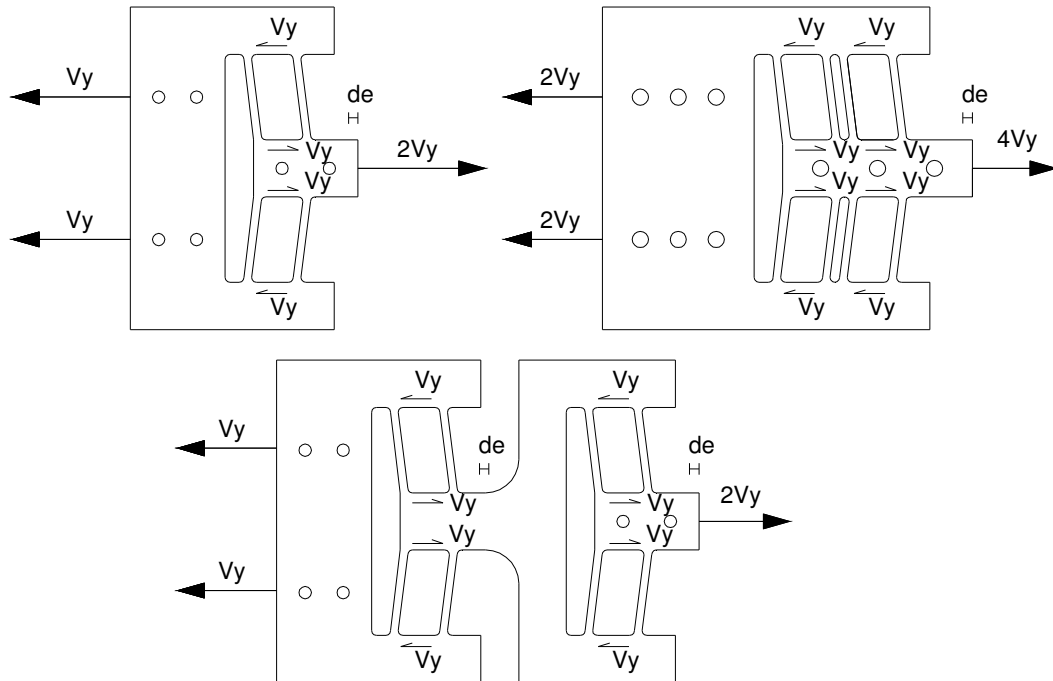


Figura 8.14. Característiques del Sistema Modular de Dissipació

Els paràmetres d_e i V_y són el desplaçament i la força d'inici de plastificació respectivament. Acord amb la figura 8.14 es compleixen les següents relacions entre els tres tipus de dissipadors:

- Comparant el SMD estàndard amb el SMD en paral·lel, per iniciar la plastificació es genera un mateix desplaçament d_e en ambdós dissipadors però es requereix el doble de força $4V_y$ en el cas del dissipador en paral·lel.
- Comparant el SMD estàndard amb el SMD en sèrie, per iniciar la plastificació s'aplica una mateixa força $2V_y$ en ambdós dissipadors però es genera el doble de desplaçament $2d_e$ en el cas del dissipador en sèrie.

En efecte si s'observen els resultats obtinguts a partir del programa d'elements finits, esmentats a la taula 8.2, les característiques principals del dissipador es compleixen. En primer lloc, la força d'inici de plastificació del SMD en paral·lel equival a 78400 N, essent el doble del valor de força de 39200 N corresponent al dissipador estàndard. I d'altra banda, el valor de desplaçament generat al SMD en sèrie aplicant una força de 39200 N és de 0,42 mm, essent aproximadament el doble del valor del desplaçament en el cas del dissipador estàndard aplicant la mateixa força.

Finalment es mostren les figures 8.15 i 8.16 que representen els desplaçament generats a les diferents zones dels dissipadors.

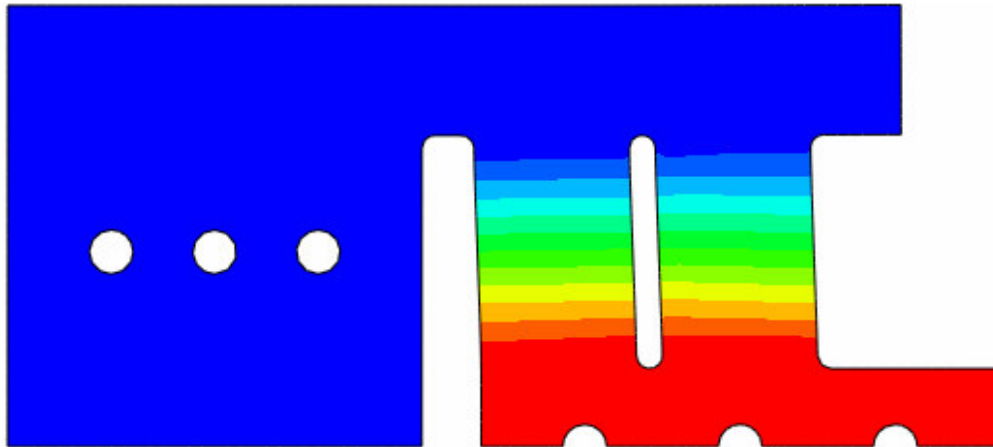


Figura 8.15. Variacions de desplaçament al SMD en paral·lel

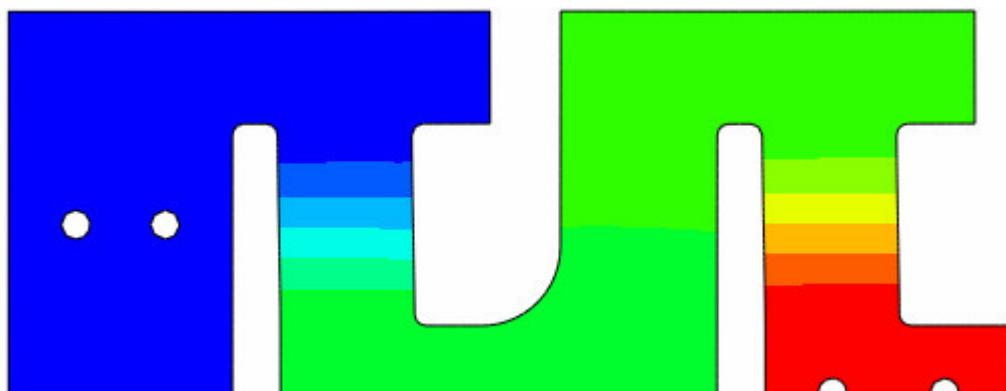


Figura 8.16. Variacions de desplaçament al SMD en sèrie

El SMD en paral·lel es comporta d'igual manera que l'estàndard, desplaçament nul a la zona dels forats on es colla el connector, desplaçament de 3 mm a la zona blava corresponent a la part més rígida del dissipador, i variacions de desplaçament a la zona dels mòduls. El SMD en sèrie, al estar compostat per dos dissipadors estàndard disposats en sèrie, no hi ha desplaçament a la zona dels forats on s'imposa el desplaçament 0, es generen variacions de desplaçament a la zona dels mòduls, i descomponent el dissipador en dos, el desplaçament generat a la zona blava és de 3 mm essent el doble del desplaçament de la zona verda, ambdós corresponents a les parts més rígides del dissipador.

9 PROCÉS DE FABRICACIÓ DELS PROTOTIPS

En aquest capítol s'esmenten els diferents processos que es realitzen per dur a terme la fabricació dels tres tipus de prototips del Sistema Modular de Dissipació analitzats i desenvolupats al present projecte.

Primer de tot cal definir el tipus de material utilitzat pel dissipador SMD. Es fabrica a partir de xapa d'acer S235JR laminada en calent, estandarditzada amb un gruix de 15 mm. Per obtenir la geometria de la peça, paral·lelisme entre les dues cares i les seves dimensions es realitzen diverses operacions de mecanitzat mitjançant màquines de Control Numèric.

Les operacions de tall que es duen a terme per la fabricació dels tres tipus de prototips són el planejat, el contornejat, i el mecanitzat de ranures i caixeres. La màquines utilitzades per realitzar les operacions són una màquina làser de control numèric pel contornejat de la peça i una fresadora de control numèric per les operacions restants.

Planejat

Les xapes d'acer utilitzades per fabricar el dissipador tenen un gruix determinat, però això no garanteix que les dues cares de les xapes siguin el suficientment paral·leles per complir unes toleràncies mínimes. Interessa que el gruix del dissipador sigui constant. Per aquest motiu es realitza l'operació de planejat a les dues cares de les xapes abans de fer les altres operacions de mecanitzat.

El planejat és l'aplicació més freqüent del fresat i té com a objectiu aconseguir superfícies planes. La fresa utilitzada és de tipus plat de 63 mm de diàmetre, de plaquetes de metall dur (widia) perquè permeten la seva reposició de forma més ràpida i perquè poden treballar a velocitats de tall elevades. Es treballa frontalment i el mecanitzat d'ambdues cares es realitza amb una sola passada.

Contornejat

Un cop planejada la xapa es procedeix a donar la forma exterior del dissipador, és a dir, el contorn. Aquesta operació es realitza per tall amb làser. El làser (Light Amplification by Stimulated of Radiation) és un dispositiu que utilitza un efecte de la mecànica quàntica, l'emissió induïda o estimulada, per generar un feix de llum coherent d'un medi adequat i amb el tamany, la forma i la puresa controlades. Amb el gruix que té el dissipador es pot obtenir un bon acabat, amb les superfícies ben polides.

Ranures i caixeres

La següent operació de mecanitzat és per formar les ranures i les caixeres presents a cada tipus de dissipador. Com a ranures hi ha els forats passants i les caixeres es realitzen a partir d'una operació de buidat a banda i banda dels dissipadors per formar els mòduls bàsics de dissipació. En aquestes operacions la fresa utilitzada és una de tipus cilíndrica, formada per dos dents i amb un diàmetre de 10 mm. La forma de treballar d'aquesta fresa és semblant a la d'una broca, però amb un poder de tall major.

A partir de cada una de les operacions de tall dutes a terme per la fabricació dels dissipadors s'obtenen uns temps de tall. El temps total de fabricació és la suma dels temps de tall de cada operació realitzada. Aquest paràmetre és important per poder determinar els costos derivats del procés de fabricació de les peces. També cal tenir en compte el cost econòmic que representa la programació dels processos CAD-CAM. A l'apartat B.3 de l'Annex B es mostren els càlculs dels temps de tall de les operacions per cada un dels tres tipus de prototips analitzats al present projecte. D'altra banda a l'Annex C es mostra una estimació dels costos de fabricació dels prototips.

10 RESUM DEL PRESSUPOST

El cost d'execució d'aquest projecte ascendeix la quantitat de DEU MIL TRENTA CINC EUROS AMB QUINZE CÈNTIMS (10035,15 €), que sumant-li el 15% en concepte de costos indirectes i el 16% d'IVA, s'obté un pressupost total del projecte de TRETZE MIL CENT QUARANTA - SIS EUROS (13146 €).

Al document pressupost es desglossen els preus unitaris corresponents a l'execució del projecte.

Signat

Jordi Janer Felisart

15 d'abril del 2008

11 CONCLUSIONS

L'objectiu principal d'aquest projecte final de carrera ha estat analitzar el comportament del dissipador d'energia anomenat Sistema Modular de Dissipació. Els resultats obtinguts satisfan els requeriments inicials i s'ha comprovat, mitjançant anàlisis per elements finits, que el dissipador té el comportament esperat i que compleix les característiques teòriques definides.

S'ha dissenyat un mòdul bàsic de dissipació comú pels tres tipus de dissipadors analitzats, el SMD Estàndard, el SMD en paral·lel i el SMD en sèrie. El disseny del mòdul bàsic s'ha basat en models fonamentats en la teoria de flexió de bigues pel que fa a determinació de deformacions elàstiques i força d'inici de plastificació, i en el model de Kasai K. i Popov E.P per determinar la deformació del dissipador que propicia la inestabilitat de l'ànima (abonyegament).

Mitjançant el programa d'elements finits ABAQUS s'ha modelat el Sistema Modular de Dissipació Estàndard i s'ha comprovat que els resultats obtinguts referents a l'inici de plastificació del mòdul bàsic s'ajusten als resultats dels models teòrics. D'altra banda també s'ha modelat amb el programa ABAQUS les altres dos varietats del Sistema Modular de Dissipació, el SMD en paral·lel i el SMD en sèrie. S'han comparat els resultats dels tres tipus de dissipadors entre si i s'ha comprovat que el comportament del Sistema Modular de Dissipació s'ajusta amb les característiques principals del dissipador. Per obtenir el mateix desplaçament, el SMD en paral·lel requereix del doble de força que el SMD Estàndard ja que disposa del doble de dissipadors col·locats en paral·lel. D'altra banda, amb el SMD en sèrie s'obté el doble de desplaçament que amb el SMD Estàndard aplicant la mateixa força perquè està compost per dos SMD Estàndard en sèrie.

L'oportunitat de treballar amb un programa d'elements finits ha estat una experiència formadora i molt enriquidora a nivell personal. L'estudi i l'anàlisi del projecte m'ha permès veure que les eines numèriques i els models simples són elements importants per dissenyar, i que aquests es complementen entre si. D'altra banda he experimentat que les eines numèriques, a partir d'una bona aproximació, permeten assolir una millor proximitat al problema que els models simples.

Pel que fa a la fabricació, el disseny del dissipador permet fabricar-lo en una sola peça amb un procés de fresat implementable en CAD-CAM. Els costos derivats són força elevats ja que es requereix de moltes hores de màquina i es produeix un desgast d'eines important. Per tant, el disseny i la tecnologia de mecanitzat són aspectes que es poden millorar del procés i que incidirien decisivament en el preu.

El present projecte s'ha centrat en l'estudi i l'anàlisi del comportament del dissipador sense analitzar el muntatge del sistema dissipatiu amb l'estructura, ni el comportament sobre les possibles inestabilitats dels elements que connecten amb el dissipador. Aquests aspectes podran ser tractats en possibles treballs futurs. També seria interessant poder fer assajos amb prototips reals per comprovar que els resultats obtinguts s'ajustin als resultats dels models teòrics i a les característiques pròpies del dissipador.

Signat

Jordi Janer Felisart

15 d'abril del 2008

12 RELACIÓ DE DOCUMENTS

DOCUMENT NÚM. 1. MEMÒRIA I ANNEXOS

ANNEX A. EVOLUCIÓ DEL SISTEMA MODULAR DE DISSIPACIÓ

ANNEX B. CÀLCULS

ANNEX C. ESTIMACIÓ ECONÒMICA PROCÉS DE FABRICACIÓ

ANNEX D. INFORMACIÓ TÈCNICA

DOCUMENT NÚM. 2. PLÀNOLS

DOCUMENT NÚM. 3. PLEC DE CONDICIONS

DOCUMENT NÚM. 4. ESTAT D'AMIDAMENTS

DOCUMENT NÚM. 5. PRESSUPOST

13 BIBLIOGRAFIA

Cahís, F.X. (2001). *Development of a new energy dissipator for seismic design. Numerical analysis and experimental validation of its behavior*, Ph. D Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain.

Kasai, K and Popov, E. P. (1986) "Cyclic Web Buckling Control for Shear Link Beams", *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, vol. 112, num. 3, pp. 505-523.

Código Técnico de la Edificación, "*Documento Básico SE-A. Seguridad estructural. Acero*" BOE 25/01/08.

ABAQUS. User's manual, Version 6.7. 2007.

<http://www.esutil.com/>