

Resum

El present projecte tracta de satisfer un encàrrec rebut al Centre de Disseny d'Equips Industrials (CDEI-UPC) que consisteix en avaluar la viabilitat tècnica i dissenyar una pantalla dinàmica multiarticulada d'aturada de roques que superi en prestacions els sistemes de protecció contra desprendiments de roques existents al mercat.

Els desprendiments de roques suposen un problema seriós en carreteres i línies ferroviàries situades en zones muntanyoses, en les que sovint les obres d'habilitació de la zona creen talussos inestables a banda i banda. La seva importància augmenta en països muntanyosos com, per exemple, Suïssa o Andorra. El risc de desprendiments s'accentua en època de pluges. La caiguda d'una roca de grans dimensions sobre un nucli habitat o un vial de comunicació pot produir greus danys personals i materials.

En les zones en les que existeix el risc de caiguda de roques s'hi instal·len sistemes de protecció contra desprendiments. Aquests sistemes es classifiquen en pantalles estàtiques o pantalles dinàmiques, segons si els seus elements estan units rígidament o si, al contrari, es permet el moviment entre ells.

Les pantalles dinàmiques, gràcies als moviments que permet, són capaces d'aturar roques més grans o que cauen d'una major alçada, provocant unes forces similars sobre els seus components.

El concepte de pantalla multiarticulada ha estat desenvolupat pel client i encara va més enllà, ja que permet augmentar la deformació de la part estructural del sistema mitjançant el gir d'unes ròtules situades en els màstils que suporten la pantalla.

Una vegada analitzat el sistema, s'observa com la multiarticulació de la pantalla no permet una gran millora de les prestacions, ja que la major part del treball d'aturada de la roca el realitza la malla que dona continuïtat a la funció de protecció de la pantalla. A més, l'articulació del sistema fa aparèixer un important moment flector sobre els màstils que obliga al seu dimensionament desproporcionat.

Donat que la malla absorbeix la major part de l'energia es considera que, de cara a qualsevol nova alternativa, cal incidir més en la deformabilitat d'aquesta que en l'estructura. En aquest sentit, es considera interessant desenvolupar una malla fabricada amb teixit tècnic que permetria una major deformació. Es tracta d'una solució més lleugera i que permet emprar processos de fabricació més senzills i, a més, en cas d'incendi s'evapora, facilitant l'accés a la zona de perill a l'equip d'extinció d'incendis. Aquesta proposta va ser presentada al congrés Aplimatec'06 de Teixits Tècnics que es va celebrar a València el passat mes de maig de 2006.



Sumari

RESUM	1
SUMARI	3
INTRODUCCIÓ	5
A RESUM DE LA NORMATIVA	7
A.1 Introducció	7
A.2 Glossari general sobre desprendiments de roques	7
A.3 Glossari sobre sistemes de protecció contra desprendiments	8
A.4 Glossari sobre l'assaig	9
A.5 Definició de variables	11
A.6 Lloc d'assaig	12
A.7 La instal·lació	12
A.8 Descripció de l'assaig	13
A.8.1 Assaig preliminar a): energies petites	13
A.8.2 Assaig preliminar b): energia 50% (al mig de la secció)	14
A.8.3 Assaig principal c) amb el 100% de l'energia (al mig de la secció)	14
A.8.4 Característiques dels assajos per a cada categoria	15
A.9 Forma del cos d'assaig	16
A.10 Informe de l'assaig	16
A.11 Dimensionament dels ancoratges i de la base	17
A.12 Factor de seguretat	17
B LA PATENT	19
C ANÀLISI UNIDIMENSIONAL DEL SISTEMA	27
C.1 Hipòtesi de funcionament del sistema	29
C.2 Representació gràfica del comportament del sistema	33
C.3 Representació gràfica de la distribució de l'energia dissipada	35
C.4 Resultats obtinguts	36
C.5 Conclusions	36
D SIMULACIÓ EN 2D DEL SISTEMA	37
D.1 Hipòtesis	37
D.2 Metodologia	39
D.3 Model geomètric	39



D.4 Model físic	41
D.5 Model numèric	42
D.5.1 Dissipador lineal	42
D.5.2 Les ròtules	42
D.5.3 La malla	43
D.6 Definició de paràmetres	44
D.6.1 Paràmetres d'entrada.....	44
D.6.2 Paràmetres de sortida.....	44
D.7 Primera anàlisi	46
D.7.1 Caracterització del sistema	46
D.7.2 Resultats obtinguts.....	46
D.7.3 Conclusions. Validació del model	47
D.8 Anàlisi exploratòria del model	48
D.8.1 Metodologia de prova utilitzada	48
D.8.2 Valors de prova i resultats obtinguts.....	48
D.8.3 Conclusions	52
D.9 Anàlisi comparativa.....	52
D.10 Conclusions.....	54
E ARTICLE: TEIXITS TÈCNICS EN PANTALLES DINÀMIQUES	55
BIBLIOGRAFIA	67
Referències bibliogràfiques	67



Introducció

Aquest document té com a objectiu facilitar al lector la comprensió tècnica del desenvolupament del projecte. Està destinat a un lector expert en l'àmbit de l'enginyeria mecànica i el desenvolupament de producte. Recull documents emprats en el desenvolupament del projecte que no es troben a l'accés del lector, les metodologies d'anàlisi i simulació del sistema i els resultats que se'n deriven.



A Resum de la normativa

Existeixen poques normatives que regulin aquest tipus d'aplicacions. No obstant, es considera interessant tenir en compte de cara al disseny la normativa d'homologació definida pel govern suís, doncs és la darrera que ha estat publicada i permet oferir unes garanties d'aplicació.

Com a material de consulta durant l'anàlisi del sistema, el seu disseny i prototipatge, s'ha realitzat una transcripció resumida del text, que s'adjunta a continuació.

A.1 Introducció

Aquesta norma ha estat publicada per l'Agència Suïssa de Medi Ambient, Boscos i Paisatges (SAEFL) i l'Institut Federal Suís de Recerca (2001) [1].

Per tractar de desenvolupar un criteri comú per avaluar i escollir sistemes de protecció contra desprendiments, es disposa de dos grans instruments: el lloc d'assaig Lochezen a Walenstad (Suïssa) i la norma que es resumeix en aquest punt. Gràcies a aquests elements, les persones responsables de la seguretat en comunitats, podran prendre decisions amb la informació necessària per escollir la mesura més adequada a cada cas.

A.2 Glossari general sobre desprendiments de roques

A continuació es defineix el vocabulari general sobre desprendiments de roques necessari per entendre aquest document:

- **Desprendiment de roques** (*Rockfall, blockfall*). Caiguda de rocs (diàmetre inferior a 50cm) i blocs (diàmetre superior a 50cm), en que el volum total no excedeix els 100m³.
- **Allau de roques** (*Rock avalanche*). Caiguda d'una massa de roques que es fraccionen en blocs i pedres durant la caiguda i l'impacte, en que la interacció entre els components no té una influència decisiva en la dinàmica del procés.
- **Esllavissada de roques** (*Rock slide*). Caiguda de grans masses de roques mostrant una certa coherència amb la estructura original del roc, en que l'alta velocitat aconseguida i el mecanisme de transport està caracteritzat per la interacció entre els components.



- **Mesura de protecció activa.** Mesura de protecció que contraresta l'esdeveniment natural de forma activa, reduint els efectes, o redueix de forma substancial el perill de que es produeixi. En són exemples: els sistemes de protecció contra desprendiments i les xarxes que sustenten al terreny roques de gran volum.
- **Mesura de protecció passiva.** Mesura de protecció que redueix el mal sense afectar de forma activa l'esdeveniment natural. N'és exemple el desenvolupament de planificacions de control del terreny.
- **Esdeveniment normal.** Un esdeveniment normal és un desprendiment de roques amb una intensitat que correspon a una periodicitat d'uns 30 anys. Un esdeveniment normal està definit, generalment, en base a les roques i els indicis observats en el terreny.
- **Esdeveniment excepcional.** Un esdeveniment excepcional es caracteritza per ser un desprendiment de roques molt poc habitual i d'una intensitat extrema, que és difícil d'aturar de forma satisfactòria.

A.3 Glossari sobre sistemes de protecció contra desprendiments

A continuació es defineix el vocabulari sobre sistemes de protecció contra desprendiments necessari per entendre aquest document:

- **Sistema de protecció contra desprendiment.** Conjunt format per xarxes, màstils i tensors (cables).
- **Xarxes.** Element d'unió que actua com una superfície o membrana.
- **Cables de marc.** Elements d'unió que serveixen per transmetre les forces de la xarxa als màstils, a les ròtules i als tensors.
- **Màstils.** Formen part del conjunt estructural suportant els cables de marc i les xarxes.
- **Tensors.** Es tracta de cables que es fixen a la part superior del talús i que serveixen per transmetre les forces dels màstils als ancoratges.
- **Frens.** Elements que es munten sobre els tensors i que absorbeixen energia.
- **Ancoratges.** Element d'unió que transmet els esforços dels tensors i els màstils al terra.



A.4 Glossari sobre l'assaig

A continuació es defineix el vocabulari emprat per a descriure l'assaig de sistemes de protecció contra desprendiments necessari per entendre aquest document:

- **Cursa:** correspon a l'allargament necessari per frenar (distància b) el cos d'assaig, fins que aquest inverteix el sentit de la seva velocitat.
- **Categoria energètica:** Els kits de protecció contra desprendiments es divideixen en 9 categories en funció de l'energia que suporten a l'assaig d'homologació.
- **Test d'energia:** Energia cinètica del cos d'assaig en el moment d'impactar amb la xarxa (test principal c) 100%).
- **Test de mitja energia:** Energia cinètica del cos d'assaig en el primer contacte amb la xarxa (test parcial b) 50%).
- **Altura de la xarxa:** Alçada h_v abans d'aplicar cap càrrega al centre de la seva secció, mesurat amb un angle recte respecte de la superfície del terra.
- **Altura residual útil:** Alçada h_n després d'aplicar càrrega al centre de la secció mesurada amb un angle recte respecte del terra.
- **Cos d'assaig:** Bloc de formigó amb forma de cub truncat en els seus vèrtexs, amb una dimensió truncada un terç de la longitud de les arestes.

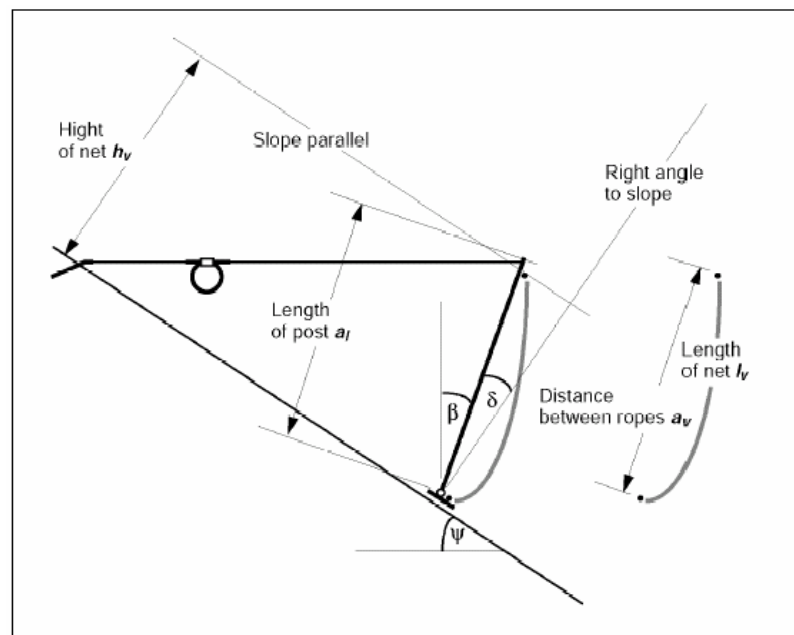


Fig. A.1. Esquema de pantalla dinàmica abans d'un impacte.



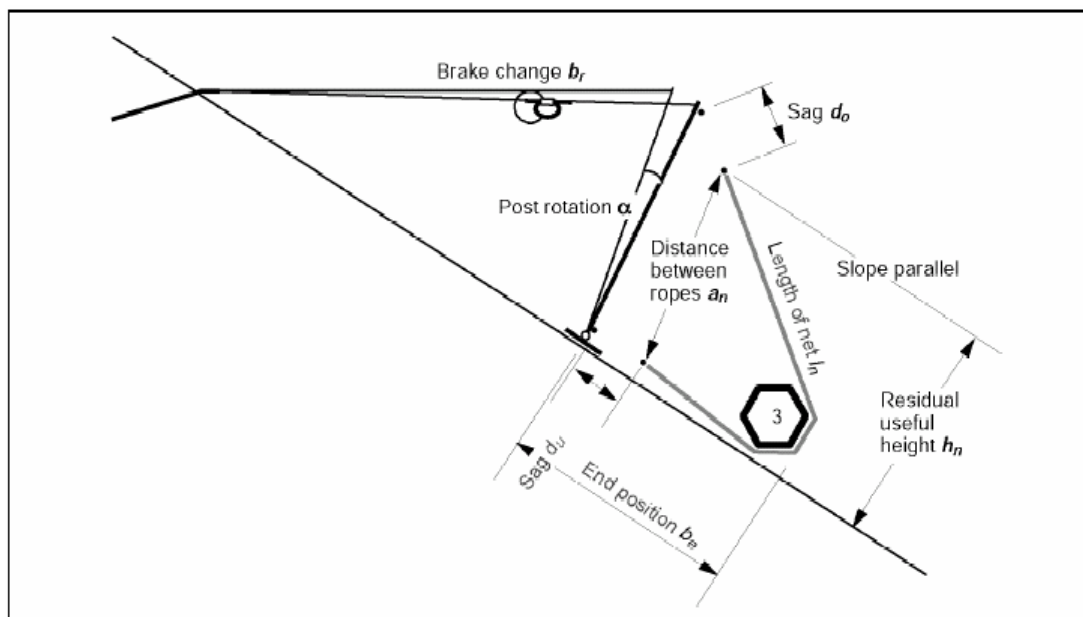


Fig. A.2. Esquema de pantalla dinàmica després d'un impacte.

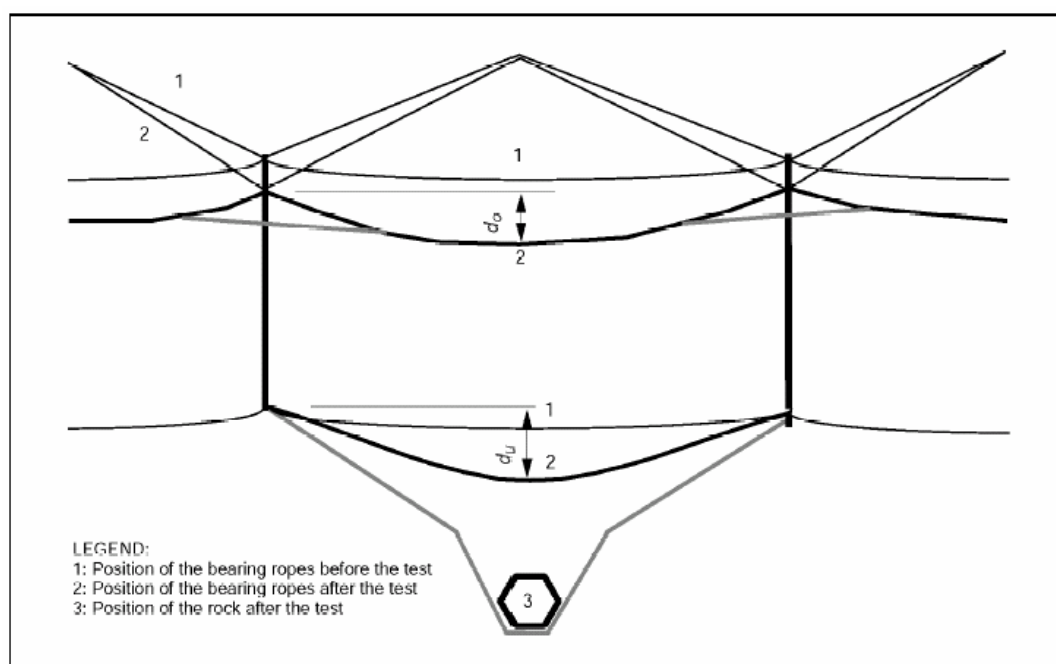


Fig. A.3. Esquema en planta de pantalla dinàmica abans i després d'un impacte.



A.5 Definició de variables

Per tal d'avaluar el comportament del sistema, aquesta norma defineix els següents paràmetres, que es troben assenyalats a les figures Fig. A.1, Fig. A.2 i Fig. A.3:

- $\alpha(^{\circ})$ Rotació de la barra=diferència entre les posicions de la barra abans i després de l'aplicació de l'esforç.
- $\beta(^{\circ})$ Angle que forma la barra amb la vertical.
- $\delta(^{\circ})$ Angle que forma la barra i la perpendicular al terra.
- $\Psi(^{\circ})$ Inclinatoria del terra respecte de l'horitzontal.
- $a_1(\mathbf{m})$ Longitud de la barra.
- $a_n(\mathbf{m})$ Distància entre cables=distància mínima entre els cables (que suporten la malla) superior i inferior després de l'impacte.
- $a_s(\mathbf{m})$ Distància entre dues barres consecutives.
- $a_v(\mathbf{m})$ Distància entre cordes=distància mínima entre els cables abans de l'impacte.
- $b_e(\mathbf{m})$ Posició final del bloc d'assaig després de l'impacte.
- $b_r(\mathbf{m})$ Increment de longitud patida pels dissipadors.
- $b_s(\mathbf{m})$ Longitud de la distància de frenada del cos d'assaig .
- $d_o(\mathbf{m})$ Deformació del cable superior al centre de la secció.
- $d_u(\mathbf{m})$ Deformació del cable inferior al centre de la secció.
- $h_n(\mathbf{m})$ Alçada útil residual = Altura de la xarxa després de l'impacte.
- $h_v(\mathbf{m})$ Altura de la xarxa abans de l'impacte, mesurada en angle recte respecte del sòl.
- $l_n(\mathbf{m})$ Longitud de la xarxa entre els cables superiors i inferiors, després de l'impacte (a la posició final).
- $l_v(\mathbf{m})$ Longitud de la xarxa entre els cables superiors i inferiors, abans de l'impacte.
- $s(\mathbf{m})$ Longitud de l'aresta del cos d'assaig.
- $t_s(\mathbf{s})$ Temps de frenada= temps que triga el cos d'assaig en recórrer la distància de frenada.



A.6 Lloc d'assaig

Els assajos d'homologació es fan a la cantera de Lochenzen. El banc de proves que s'hi ha instal·lat per a realitzar les homologacions té la següent forma:

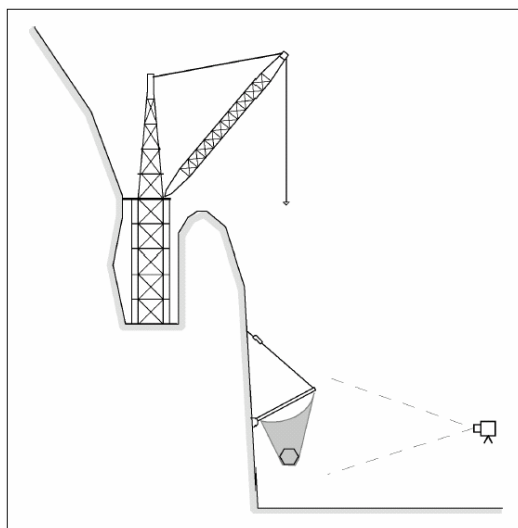


Fig. A.4. Esquema de la cantera d'assaig a Lochenzen (Suïssa).

A.7 La instal·lació

Les pantalles dinàmiques es munten a una altura de 15m respecte del terra, amb les barres col·locades en uns ancoratges ràpids preparats sobre la roca. La inclinació de les barres és de 30° respecte del pla horitzontal, mentre que els cables que les suporten estan a 40° .

Les pantalles dinàmiques consisteixen normalment de 3 seccions amb una distància entre barres de 10m. Així, hi ha instal·lades 4 barres i tres xarxes entre elles.

Les longituds de les barres depenen de l'energia de la categoria en qüestió. Els assajos es duen a terme amb la longitud mínima de les barres. Un cop superats els assajos, no obstant, està permès fabricar les barreres amb longituds 1,5 vegades superiors a les homologades.



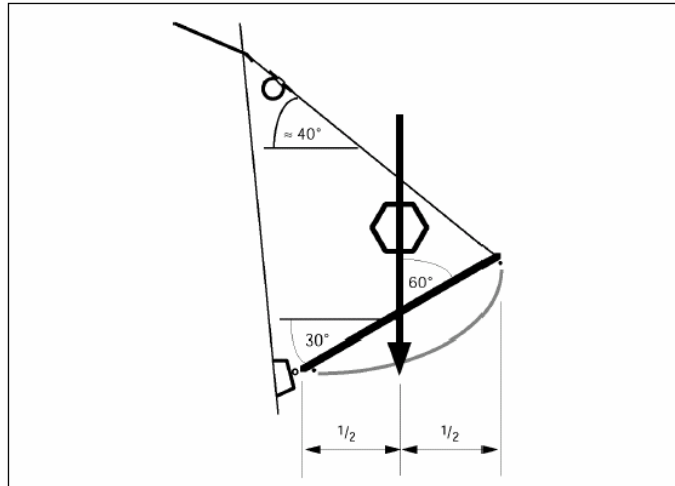


Fig. A.5. Esquema del muntatge per l'assaig.

A.8 Descripció de l'assaig

Els kits de protecció contra desprendiments estan classificats en 9 categories, segons l'energia que poden dissipar entre 100 kJ a 5.000 kJ. Aquestes energies estan referides al test d'energia. Una estructura ha de superar tots els assajos parcials de la seva categoria per poder ser homologada.

A.8.1 Assaig preliminar a): energies petites

Els assajos preliminars serveixen en primer lloc per a comprovar les deformacions de la malla col·locada, mentre que només uns pocs cables o anelles de la xarxa estan sotmesos a esforç amb els petits cossos d'assaig.

L'impacte es produeix a 25 m/s. Els cossos que s'han de fer servir són:

Nombre de cossos	Dimensions	Massa total	Energia
5	10x10x10 cm	12 kg	3,8 kJ
3	20x20x20 cm	59 kg	18 kJ
1*	50x50x50 cm	300 kg	94 kJ

*: Els kits de categories 1 i 2 no estan sotmesos a aquest assaig.

Taula A.1. Característiques del cos d'assaig per a l'assaig preliminar a).

Després d'aquest assaig no està permès fer reparacions a la pantalla.



A.8.2 Assaig preliminar b): energia 50% (al mig de la secció)

Aquests assajos serveixen per establir el cost de manteniment, la forma de funcionar de la pantalla i la longitud de frenada a mitja càrrega.

El cos d'assaig previst per aquesta energia es deixa caure sobre el centre de la secció amb una velocitat d'impacte de 25 m/s.

Les següents dades es prenen de l'assaig:

- Deformació dels cables, elements dissipadors, barres i xarxes.
- Altura final del cos d'assaig.
- Danys que pateixen els elements estructurals.
- Temps de frenada (t) i màxima distància de frenada b_s , així com el punt inferior en que el cos d'assaig canvia el sentit de moviment.

Després d'aquest assaig és possible que calgui fer alguna reparació (estan permeses).

A.8.3 Assaig principal c) amb el 100% de l'energia (al mig de la secció)

Aquest assaig es realitza amb l'energia cinètica a homologar que serà transformada en treball de deformació de la pantalla dinàmica. Tant la capacitat resistent de l'estructura com la capacitat de deformació ha de ser provada.

El cos d'assaig previst per aquesta energia es deixa caure sobre el centre de la secció central amb una velocitat d'impacte de 25 m/s.

Abans de l'assaig, es registren les posicions de cada element de l'estructura.

Els següents valors es registren després del test:

- Deformació dels cables, elements de dissipació, barres i xarxes.
- Altura del cos d'assaig.
- Danys soferts pels elements del sistema.
- Temps d'aturada i distància de terra a la que es produeix, així com la distància de terra a la que el bloc canvia de sentit de desplaçament.

La distància màxima de frenada ha de ser menor a l'especificada per la norma.

Després de l'impacte, **l'altura h_n de la xarxa a la secció mitjana ha de ser**, com a mínim, **l'especificada per la norma** (abans de retirar el bloc d'assaig).



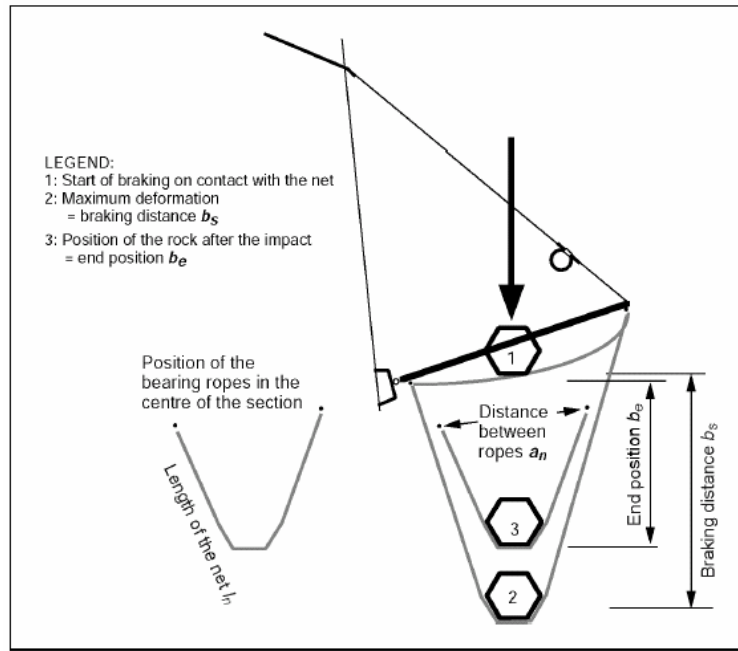


Fig. A.6. Esquema dels paràmetres a mesurar durant l'assaig.

A.8.4 Característiques dels assajos per a cada categoria

Una pantalla dinàmica serà classificada en una o altra categoria segons si supera els assajos d'aquesta categoria o no. Les característiques que té l'assaig per a cada categoria són les següents:

Categoria	Longitud de la barra (m)	Assaig parcial b) 50%			Assaig principal c) 100%				
		Energia (kJ)	Massa del cos d'assaig (kg)	Longitud de l'aresta s (m)	Energia (kJ)	Massa del cos d'assaig (kg)	Longitud de l'aresta s (m)	Distància de frenada màxima admissible b_s (m)	Alçada mínima de la xarxa h_n (m)
1	1,5	50	160	0,41	100	320	0,52	4,0	0,90
2	2,0	125	400	0,56	250	800	0,70	5,0	1,20
3	3,0	250	800	0,70	500	1.600	0,88	6,0	1,80
4	4,0	375	1.200	0,80	750	2.400	1,01	7,0	1,80
5	5,0	500	1.600	0,88	1.000	3.200	1,11	8,0	2,40
6	6,0	750	2.400	1,01	1.500	4.800	1,27	9,0	2,40
7	7,0	1.000	3.200	1,11	2.000	6.400	1,40	10,0	3,00
8	8,0	1.500	4.800	1,27	3.000	9.600	1,60	12,0	3,60
9	9,0	2.500	8.000	1,51	5.000	16.000	1,90	15,0	4,20

Taula A.2. Característiques de l'assaig segons la categoria.



A.9 Forma del cos d'assaig

L'assaig definit per aquesta norma es realitza deixant caure un cos de formigó de forma cúbica amb els cantells truncats, com es mostra a la figura següent.

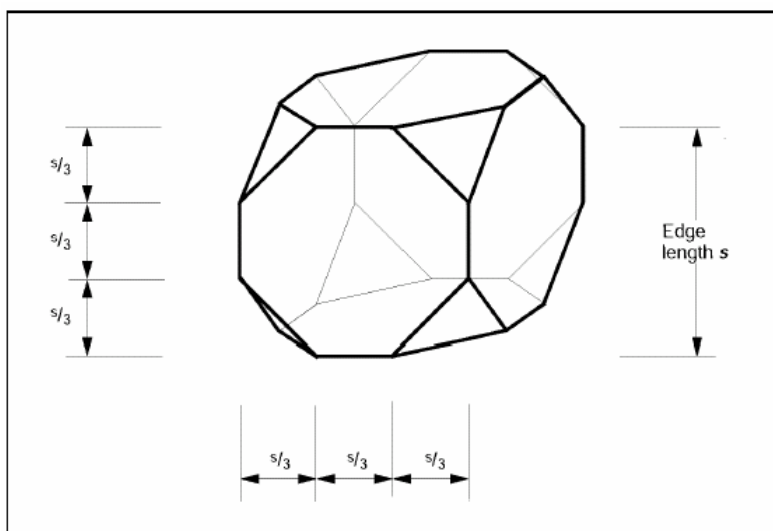


Fig. A.7. Esquema amb la forma del cos d'assaig.

A.10 Informe de l'assaig

L'informe de l'assaig conté tota la informació i els protocols dels assajos a) fins al d), que han de contribuir a la decisió en la seva homologació. Els protocols s'indiquen a continuació:

- Dimensions de la pantalla dinàmica i una imatge esquemàtica de cadascun dels principals components de l'estructura.
- Protocol de l'assaig a): consisteix en una breu descripció dels resultats del test.
- Protocol de l'assaig b): conté informació dels canvis geomètrics, les mesures de força, comentaris sobre el vídeo de l'impacte i un resum del cost de les reparacions.
- Protocol de l'assaig c): conté informació dels canvis geomètrics, les mesures de força, comentaris sobre el vídeo i un resum dels danys produïts.
- Protocol del test d): consisteix en una breu avaluació dels criteris no mesurables (disseny, sostenibilitat,...).



A.11 Dimensionament dels ancoratges i de la base

No existeix un mètode precís per a calcular les forces als ancoratges i a la base que resultin de la conversió de l'energia cinètica d'una roca en energia de deformació de l'estructura. No obstant cal trobar un punt de partida per al dimensionament dels ancoratges i la base, i unes dades fiables s'obtenen de les mesures dels assajos d'homologació. Per tenir en compte la caiguda vertical del cos d'assaig, les forces de frenada a la roca, els temps de frenada (entre 0,3 i 0,9 s) es veuen incrementats en aproximadament un 10 o 25% en relació amb la frenada horitzontal. Depenent del temps, la força de frenada pot tenir grans diferències.

A.12 Factor de seguretat

Les forces mesurades a l'assaig d'homologació no inclouen les condicions més exigents d'una caiguda vertical, ja que contempnen els efectes de la posició centrada en què impacta el cos d'assaig sobre la xarxa. Esforços excèntrics a prop de les barres o a prop dels cables que suporten la xarxa faran que alguns elements hagin de suportar esforços superiors de dimensions desconegudes.

Aquesta és la raó per la què les forces màximes mesurades a l'assaig principal s'hauran de sobredimensionar (augmentant-les un 30%). Aquestes forces s'introduiran posteriorment en els càlculs de càrregues estàtiques.

Càrrega estàtica equivalent Q_e =força màxima mesurada $F_{màx}$ *1,3

Finalment, el valor amb que es dimensionaran els elements resulta d'aplicar un altre coeficient corrector. Cal tenir en compte que hi haurà instants en què alguns elements no treballaran o ho faran de forma més intensa. Per a tenir en compte aquest efecte, s'augmentarà un 30% la força estàtica equivalent.

Càrrega de disseny $Q_d=Y_Q*Q_e$

Y_Q =factor de sobrecàrrega per l'efecte temporal (=1,3)



B La patent

Donat que aquest projecte es centra en l'avaluació d'un sistema patentat, es considera adjuntar necessari incloure la patent desenvolupada pel client per permetre una major comprensió per part del lector.

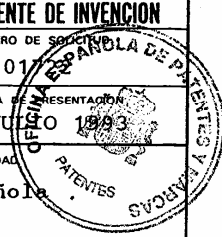
Donat que els resultats que s'han obtingut en aquest projecte no afavoreixen els interessos del client, es considera adequat no publicar el nom del client i per això ha estat ocultat del document de la patent. Es vol remarcar que tot i que s'hagi ocultat el nom del client no es fa amb cap intenció de no reconèixer la seva autoria sobre la patent.



R-7080-5-II

REGISTRO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL ESPAÑA

DATOS DE PRIORIDAD			A1	PATENTE DE INVENCIÓN
31) NUMERO	32) FECHA	33) PAIS		
---	---	---		
				21) NUMERO DE SOLICITUD 9301
				22) FECHA DE PRESENTACIÓN 30 JUNIO 1953



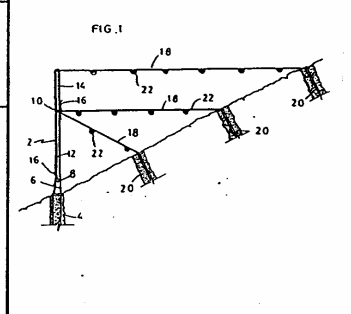
71) SOLICITANTE(S)
ANTONIO CASADO Y CIA. S.A. S.A. C. Y. C. S.A. española
 DOMICILIO
 Avda. Icària, 139, 1ª 08005-Barcelona

72) INVENTOR(ES)
 Sr. Antonio Casado Casado

73) TITULAR(ES)

11) N.º DE PUBLICACION	15) FECHA DE PUBLICACION	16) PATENTE DE LA QUE ES DIVISIONARIA	GRAFICO (SOLO PARA INTERPRETAR RESUMEN)

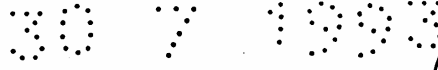
51) Int. Cl.
 E01F 7/00



64) TITULO
 "Pantalla para desprendimientos de rocas"

67) RESUMEN (APORTACION VOLUNTARIA, SIN VALOR JURIDICO)
 Pantalla para desprendimientos de rocas, que comprende: una alineación de postes anclados en un terreno y una malla reforzada que se extiende entre postes; cada poste dispone de dos o más articulaciones que permiten su deformación, y cada poste está relacionado con unos tirantes aptos para experimentar una deformación. Los tirantes están sólidamente fijados en el poste y en el propio terreno,
 Figura 1.





- 2 -

PANTALLA PARA DESPRENDIMIENTOS DE ROCAS

DESCRIPCION

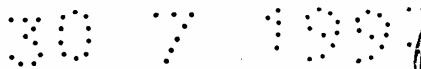
5

La invención se refiere a una pantalla para
desprendimientos de rocas, que comprende: una alineación
de postes dotados de una base fuertemente anclada en un
10 terreno; y una malla reforzada que se extiende entre
postes contiguos.

Loa mayores problemas que pueden presentarse en
Ingeniería Civil son de origen geológico o geotécnico. En
concreto, en obras lineales el principal problema es la
15 inestabilidad de los taludes, sobre todo en terrenos ro-
cosos degradados, ya que independientemente de la pen-
diente dada al talud, seguirán desprendiéndose bloques
que pueden llegar a pesar varias toneladas. Si la velo-
cidad de descenso, función de la inclinación y de la al-
20 tura, puede llegar a ser de decenas de kilómetros por ho-
ra, no es difícil prever el peligro que supone.

En la actualidad las barreras de protección
suelen ser elementos que simplemente se interponen en el
camino del bloque hacia la calzada y evitan que éste lle-
gue a la misma. Esta solución presenta dos inconvenientes
25 alternativos: si se busca una resistencia elevada, se
presenta un problema de impacto visual ocasionado por la
aparatosidad de la barrera necesaria; si por el contrario
se quiere tener poco impacto visual, la barrera resultan-
30 te ofrece poca resistencia. Estas barreras habitualmente
conocidas son el resultado de una concepción estática de
la barrera, entendiéndose como tal que la disipación de
la energía de impacto de una roca se produce mediante la
absorción directa de la misma por la propia barrera, ya
35 que tiene impedido su movimiento.





- 3 -



Ultimamente también se han dado a conocer barreras que incluyen postes que poseen una única articulación cercana a la base del poste; con ello una parte de la energía de impacto se absorbe con el movimiento de la barrera ocasionado por el impacto. No obstante, estas barreras con una sola articulación no dan una respuesta suficientemente satisfactoria a los problemas planteados.

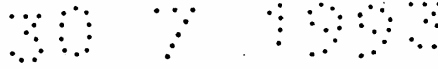
La invención se propone superar los inconvenientes aludidos. Esta finalidad se alcanza con una barrera del tipo descrito al principio que está caracterizada porque cada poste dispone de por lo menos dos articulaciones que definen tramos del poste y que permiten su deformación, y porque para cada poste existen unos tirantes, sólidamente fijados en el poste y en el propio terreno, que son aptos para experimentar una deformación.

La disipación de la energía transferida a la barrera por el bloque desprendido se consigue mediante elementos deformables elásticamente, situados en las articulaciones, la propia malla, los tirantes u otro componente de la barrera. Si se esperan grandes impactos, puede no ser suficiente sólo con estos elementos, debiéndose entonces colocar algún otro elemento que alcance una deformación plástica hasta la rotura si así fuese necesario, con lo que la energía disipada será mayor que si sólo hubieran habido deformaciones elásticas.

Otras ventajas y características de la invención se aprecian a partir de la siguiente descripción, en la que sin ningún carácter limitativo, se relata un modo preferente de realización de la invención, haciendo mención de los dibujos que se acompañan. Las figuras muestran:

Fig. 1, una vista esquemática de un modo de realización de un poste que forma parte de la barrera objeto de la invención, apareciendo seccionada el anclaje del poste y de los tirantes y en la situación anterior a





- 4 -



la recepción de bloques desprendidos.

Fig. 2 a Fig. 4, sendas vistas esquemáticas análogas a la anterior, en diferentes grados de deformación del poste y de los tirantes.

5 La barrera comprende una pluralidad de postes 2, dispuestos según una alineación que habitualmente determina una línea quebrada y que están anclados en el suelo del talud por medio de una cimentación de hormigón 4. Entre los postes se extiende una malla reforzada convencional que no aparece representada.

10 En la inmediación de la base 6 del poste 2 se encuentra una primera articulación 8, mientras que en un lugar sensiblemente más elevado se encuentra una segunda articulación 10, las cuales definen unos tramos 12 y 14; en la representación solamente aparecen dos articulaciones, si bien no se excluye la posibilidad de la existencia de otras. Preferentemente cada articulación 8,10 dispone de un resorte 16 que tiende a mantener en una misma alineación recta los tramos contiguos 12 y 14; estos resortes también coadyuvan en la disipación de la energía de impacto. En caso que el bloque recogido no tenga un peso demasiado grande y que la configuración del talud lo permita, la recuperación del resorte conduce a que el poste recupere su inicial posición recta.

20 La barrera comprende también unos tirantes 18 que preferentemente están también anclados en otras cimentaciones de hormigón 20. Preferentemente, uno de los tirantes está unido al extremo superior del poste y uno o más tirantes están unidos a la segunda articulación 10, debido principalmente a que en esta articulación es donde el poste 2 alcanza una mayor deformación.

30 Los citados tirantes 18 son aptos para experimentar una deformación elástica; esta deformación se consigue mediante diversos sistemas, entre los que se pueden citar los convencionales bucles-freno 22, o bien un sis-



30 7 1990

- 5 -



tema de amortiguador elástico, también conocido, que se intercala en un tirante; o bien un freno de cortante, que también forma parte del estado de la técnica. Se omiten representaciones de los sistemas referidos por su indicada condición de ya conocidos.

5

La invención también prevé la posibilidad de la existencia de otros elementos disipadores de energía incorporados a la malla o al propio poste o a la base del mismo, y estos disipadores de energía, en su deformación, pueden tener un comportamiento elástico o plástico.

10

En las figuras 2 a 4 se muestran las posiciones que alcanza el poste 2 y los tirantes 18 en distintos casos de deformación por impacto.

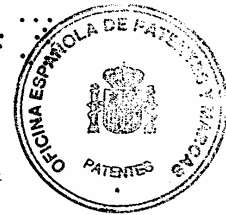
15



30 7 100

- 6 -

REIVINDICACIONES



- 5 1.- Pantalla para desprendimientos de rocas, que comprende: una alineación de postes dotados de una base fuertemente anclada en un terreno; y una malla reforzada que se extiende entre postes contiguos, caracterizada porque cada poste dispone de por lo menos dos articulaciones que definen tramos del poste y que permiten su deformación, y porque para cada poste existen unos tirantes, sólidamente fijados en el poste y en el propio terreno, que són aptos para experimentar una deformación.
- 10 2.- Pantalla según la reivindicación 1, caracterizada porque dicha deformación es elástica.
- 15 3.- Pantalla según la reivindicación 1, caracterizada porque dicha deformación es plástica.
- 4.- Pantalla según una de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizada porque dicha deformación es parcialmente elástica y parcialmente plástica.
- 20 5.- Pantalla según una de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizada porque una de dichas articulaciones se encuentra en la proximidad de dicha base del poste.
- 6.- Pantalla según una de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizada porque cada articulación dispone de un resorte que tiende a mantener en una misma alineación recta los dos tramos contiguos a la articulación.
- 25 7.- Pantalla según una de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizada porque por lo menos uno de dichos tirantes dispone de por lo menos un bucle freno.
- 30 8.- Pantalla según una de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizada porque por lo menos uno de dichos tirantes dispone de por lo menos un amortiguador.
- 9.- Pantalla según una de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizada porque por lo menos uno de dichos tirantes dispone de por lo menos un freno de cortante.
- 35



307 1993

- 7 -



10.- Pantalla según una de las reivindicaciones 1 a 9, caracterizada porque dicha malla reforzada es deformable elástica o plásticamente, por lo menos parcialmente.

5

11.- Pantalla según una de las reivindicaciones 1 a 10, caracterizada porque por lo menos uno de dichos postes es deformable elástica o plásticamente, por lo menos parcialmente.



C Anàlisi unidimensional del sistema

Aquesta simulació del sistema té com a objectiu obtenir resultats que permetin entendre el mecanisme d'aturada de roques i acotar els valors dels principals paràmetres disseny. Amb aquests resultats, es podrà realitzar un primer disseny que permeti una anàlisi més detallada per tal d'optimitzar el temps de disseny i simulació del sistema.

A l'hora de realitzar aquesta simulació s'ha considerat que l'efecte del conjunt de la pantalla dinàmica sobre la roca es pot reduir a una dimensió (la cursa de frenada de la roca) i el següent sistema:

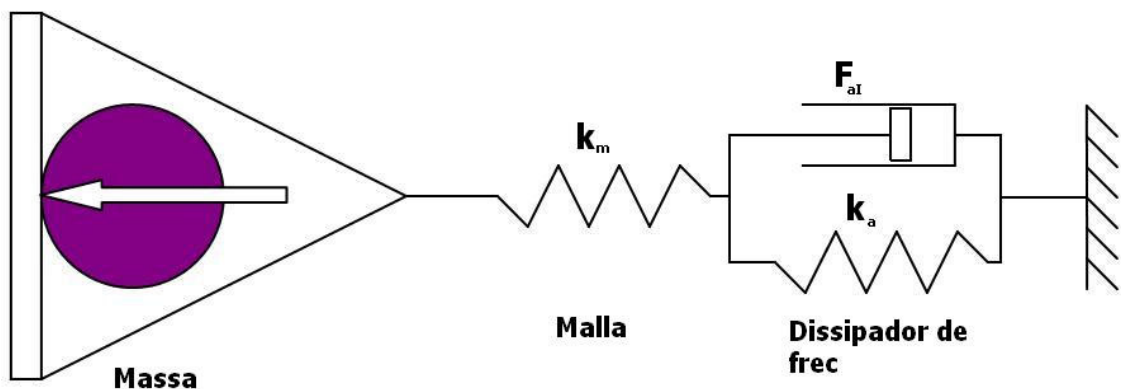


Fig. C.1. Model de simulació unidimensional.

El sistema es modela com una disposició en sèrie de:

- Un element rígid sobre el que impacta la roca.
- Una molla que es modela com una molla.
- Un dissipador de freqüència que es modela com la combinació en paral·lel d'una molla i un amortidor de freqüència sec.
- Un ancoratge, que no és més que un punt fix respecte el que es deforma el conjunt.



La corba de comportament teòric del dissipador s'ha modelat a partir de les corbes de caracterització que apareixen a l'apartat 5 de la memòria (Fig.5.9, 5.11 i 5.15). Es considera que, de forma ideal, el dissipador no es comença a deformar fins que es supera una força llindar (que pot ser nul·la) i a partir d'aquí ho fa d'una forma proporcional a la força que se li aplica. En exhaurir-se la cursa, el dissipador encara és capaç de suportar un increment de força, tot i no deformar-se més. A partir d'aquesta modelització s'obté la següent corba característica:

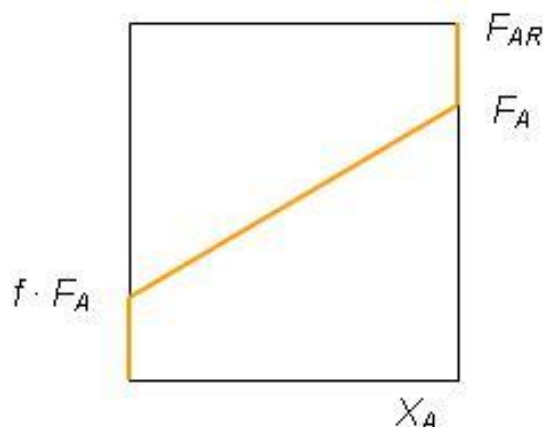


Fig. C.2. Corba característica ideal d'un dissipador d'energia.

Les variables d'entrada d'aquest sistema són:

- La rigidesa de la molla (k_m)
- El nombre de dissipadors en sèrie (z_{as}).
- El nombre de conjunts sèrie que es troben en paral·lel (z_{ap}).
- La fracció de força final que cal per a començar a moure el dissipador (ξ).
- La força màxima que pot suportar un dissipador (F_a).
- L'allargament màxim que pot patir un dissipador (x_a).

Les variables de sortida a analitzar són:

- L'energia absorbida per la molla (E_m).
- L'energia absorbida pel dissipador (E_a).



- L'energia absorbida per la molla de forma reversible, és a dir, sense que el dissipador hagi absorbit energia ($E_{m\emptyset}$).
- L'allargament total del sistema (x).
- La força màxima a la que està sotmès el sistema (F).

C.1 Hipòtesi de funcionament del sistema

A partir del model definit es dissenya un cicle ideal de funcionament format pels següents estats i transicions.

A) Primer punt: el repòs ($F=0$)

En aquest moment tots els elements del sistema es troben en repòs, amb força nul·la per a tots ells.

Gràficament:

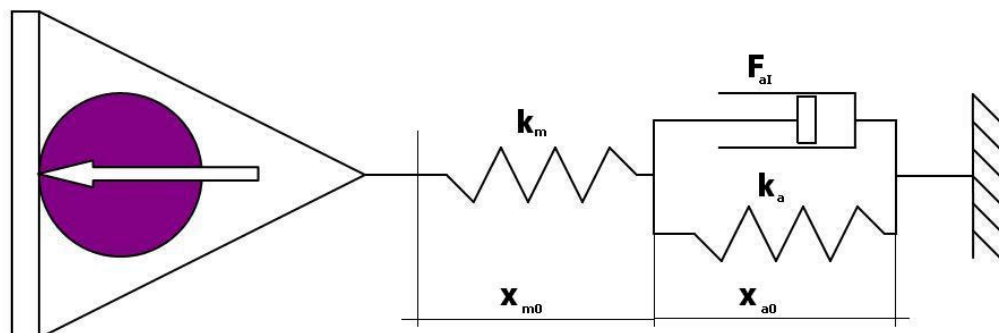


Fig. C.3. Model de simulació unidimensional en posició de repòs.

A - B) Primera etapa: treballa la molla ($F < F_{aI} = \xi \cdot F_a$)

Una vegada s'ha produït l'impacte, la molla comença a deformar-se i, en conseqüència, augmenta la força que suporta. Aquesta etapa dura fins que la molla suporta una força igual a la força mínima de desplaçament del dissipador ($\xi \cdot F_a$).

En aquesta primera fase de l'impacte, els paràmetres de sortida tenen la forma següent:

$$\text{Força: } F = \sqrt{2 \cdot K_M \cdot E} \quad (\text{Eq. C.1.})$$



$$\text{Desplaçament: } x = \frac{F}{K_M} \quad (\text{Eq. C.2.})$$

$$\text{Energia: } E = \frac{F^2}{2 \cdot K_M} \quad (\text{Eq. C.3.})$$

Gràficament:

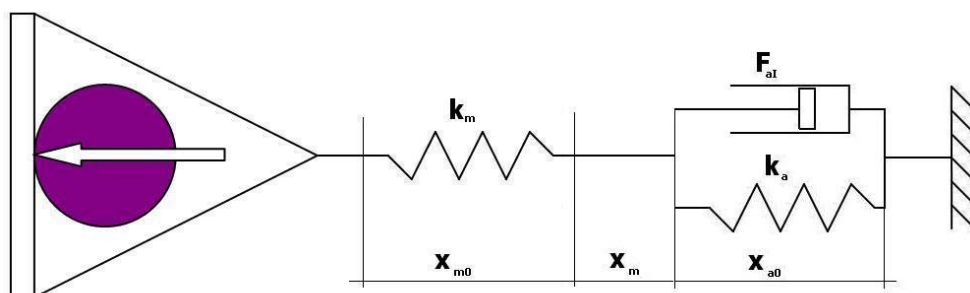


Fig. C.4. Model de simulació unidimensional en la fase de deformació de la malla.

B) Segon punt: comença a treballar el dissipador ($F=F_{ai}$)

En aquest moment el dissipador pateix una força que és exactament aquella que la pot fer moure. Aquest punt és interessant, ja que indica quin és la màxima energia que es podrà dissipar sense que el sistema entri en deformació permanent, és a dir, sense que actuï el dissipador.

Les característiques del sistema en aquest punt són:

$$\text{Força: } x_1 = \frac{F_{AI}}{K_M} \quad (\text{Eq. C.4.})$$

$$\text{Desplaçament: } x = \frac{F}{K_M} + \frac{(F - F_{AI}) \cdot x_A}{(1 - \xi) \cdot F_A} \quad (\text{Eq. C.5.})$$

$$\text{Energia: } F_{AI} = \sqrt{2 \cdot K_M \cdot E_1} \quad (\text{Eq. C.6.})$$



B-C) Segona fase: treballen en sèrie malla i dissipador ($F_{aI} < F < F_a$)

En aquesta fase treballen tant el dissipador com la malla. Els dos elements estaran sotmesos a la mateixa força i es deformaran com calgui per complir en tot moment aquesta propietat.

En aquesta fase de l'impacte, els paràmetres de sortida tenen la forma següent:

$$\text{Força: } F = \sqrt{\frac{K_M \cdot (2 \cdot (1 - \xi) \cdot F_A \cdot E - X_A \cdot F_{AI}^2)}{(1 - \xi) \cdot F_A + K_M \cdot X_A}} \quad (\text{Eq. C.7.})$$

$$\text{Desplaçament: } X = \frac{F}{K_M} + \frac{(F - F_{AI}) \cdot X_A}{(1 - \xi) \cdot F_A} \quad (\text{Eq. C.8.})$$

$$\text{Energia: } E = \frac{F^2}{2 \cdot K_M} + \frac{(F^2 - F_{AI}^2) \cdot X_A}{2 \cdot (1 - \xi) \cdot F_A} \quad (\text{Eq. C.9.})$$

Gràficament:

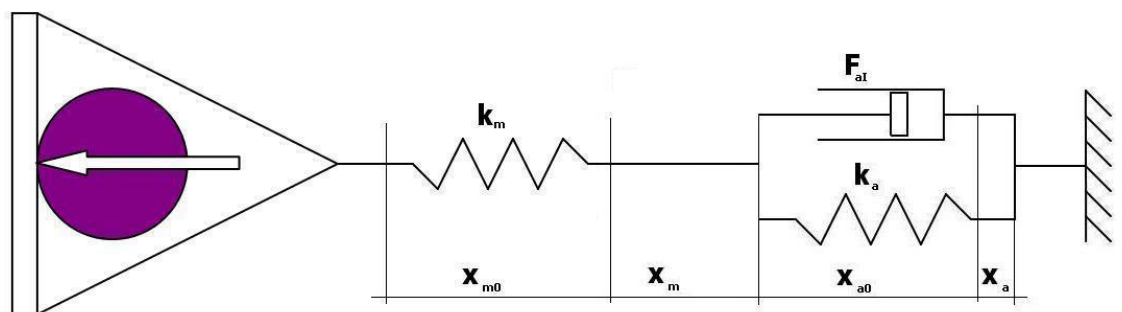


Fig. C.5. Model de simulació unidimensional en la fase de deformació de malla i dissipador.

C) Tercer punt: s'exhaureix la cursa del dissipador ($F = F_a$)

En aquest moment, el dissipador queda exhaurit.

Les característiques del sistema en aquest punt són:



Força: $F = F_A$ (Eq. C.10.)

Desplaçament: $x = \frac{F_A}{K_M} + x_A$ (Eq. C.11.)

Energia: $E = \frac{F_A^2}{2 \cdot K_M} + \frac{(1 + \xi) \cdot F_A \cdot x_A}{2}$ (Eq. C.12.)

C-D) Tercera fase: treballa només la malla, fins a ruptura ($F > F_a$)

Un cop exhaurit el dissipador i fins que no s'arriba al mínim entre la força de ruptura de la malla i el dissipador, torna a treballar només la malla.

En aquestes condicions, els paràmetres de sortida tenen la forma següent:

Força: $F = \sqrt{K_M \cdot (2 \cdot E - (1 + \xi) \cdot F_A \cdot x_A)}$ (Eq. C.13.)

Desplaçament: $x = \frac{F}{K_M} + x_A$ (Eq. C.14.)

Energia: $E = \frac{F^2}{2 \cdot K_M} + \frac{(1 + \xi) \cdot F_A \cdot x_A}{2}$ (Eq. C.15.)

Gràficament:

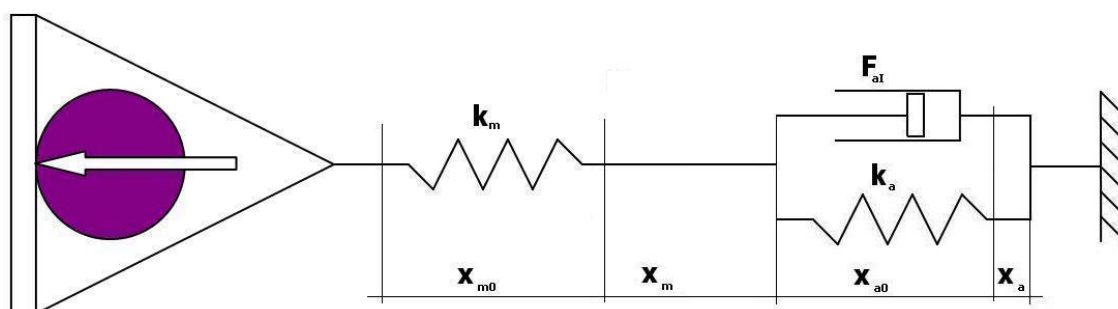


Fig. C.6. Model de simulació unidimensional en la fase prèvia a ruptura.



D) Quart punt: ruptura ($F=F_R$)

En aquest moment s'arriba a la força de ruptura i el conjunt deixa de treballar. Si s'ha assolit aquest punt, el sistema serà incapaç de dissipar més energia i, per tant, trencarà. Evidentment, no és un punt desitjable, però cal saber l'energia que es pot dissipar abans de que el sistema es trenqui.

Les característiques del sistema en aquest punt són:

$$\text{Força: } F = F_R = \min(F_{Rm}, F_{Ra}) \quad (\text{Eq. C.16.})$$

$$\text{Desplaçament: } x = \frac{F_R}{K_M} + x_A \quad (\text{Eq. C.17.})$$

$$\text{Energia: } E = \frac{F_R^2}{2 \cdot K_M} + \frac{(1 + \xi) \cdot F_A \cdot x_A}{2} \quad (\text{Eq. C.18.})$$

C.2 Representació gràfica del comportament del sistema

Gràficament, la representació de la força respecte a la deformació del sistema és la següent:

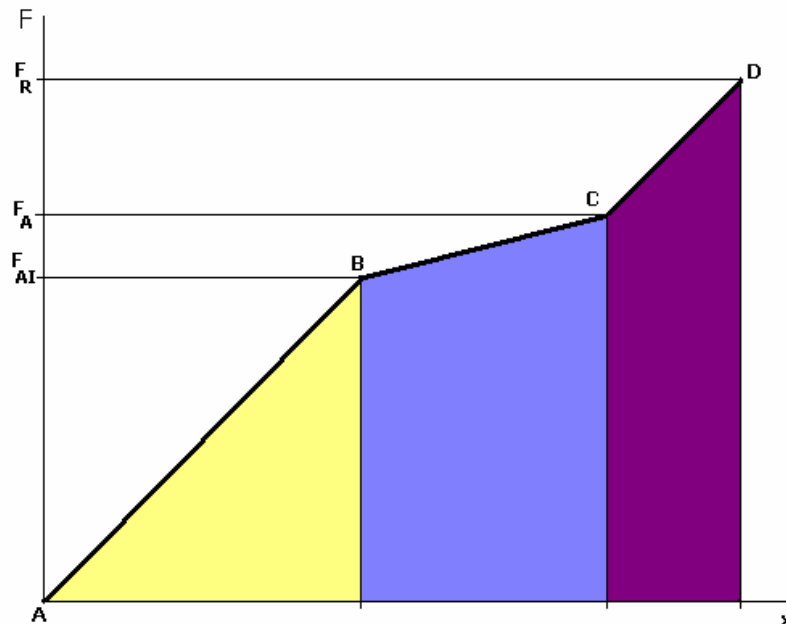


Fig. C.7. Gràfic força-desplaçament genèric per al model unidimensional.



Existeixen dos casos particulars que es considera interessant presentar. Es tracta dels comportaments extrems del dissipador.

- 1) El dissipador és de frec sec pur ($\xi=1$)

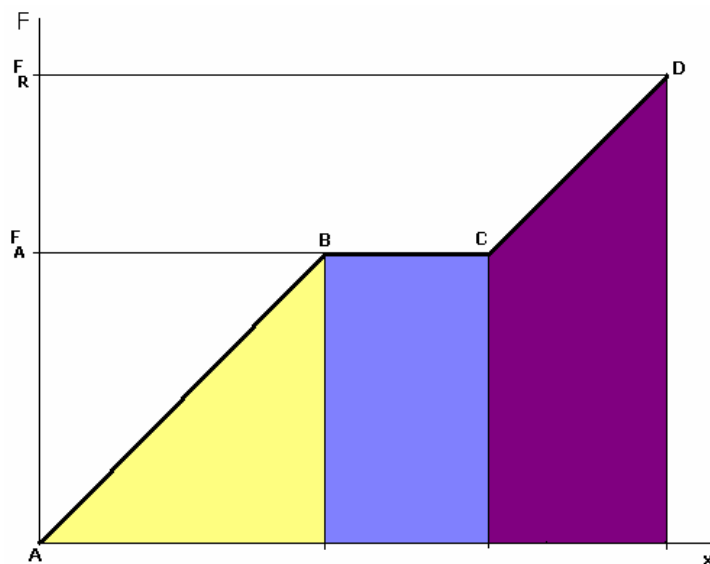


Fig. C.8. Gràfic força-desplaçament per a un dissipador de frec sec pur.

- 2) El dissipador és una molla ($\xi=0$)

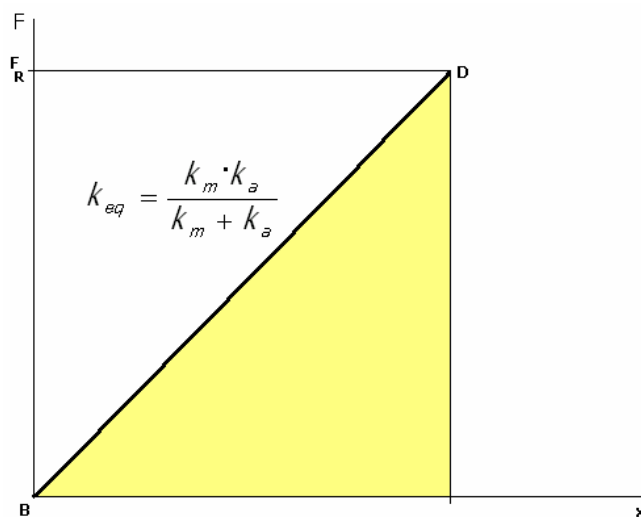


Fig. C.9. Gràfic força-desplaçament per a un dissipador tipus molla (proporcional).



C.3 Representació gràfica de la distribució de l'energia dissipada

D'altra banda, també existeix la possibilitat de representar l'energia dissipada en el sistema i, el que és més important, la seva distribució.

De forma general, el sistema absorbeix:

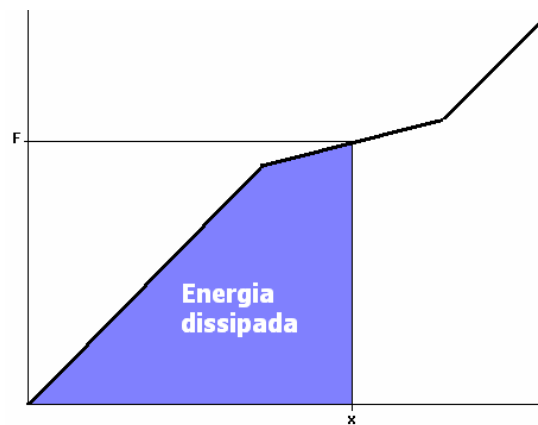


Fig. C.10. Gràfic energia dissipada a partir de la força aplicada.

Per poder observar la distribució d'aquesta energia en els dos tipus de sistema, es pot fer la següent representació, molt més visual:

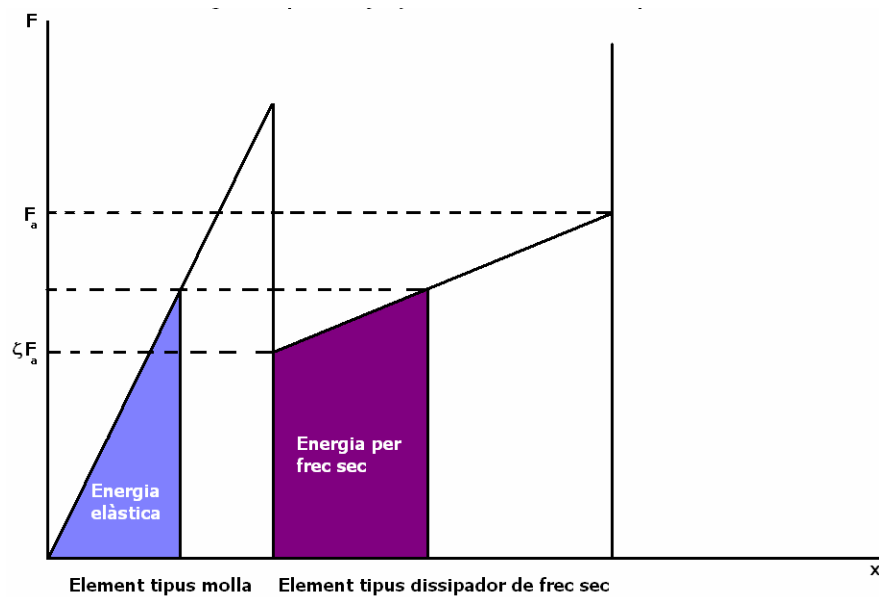


Fig. C.11. Gràfic energia elàstica i plàstica dissipada a partir de la força aplicada.



C.4 Resultats obtinguts

S'han fet algunes combinacions intuïtives per tal d'obtenir resultats que permetin avaluar el comportament del sistema. En tots ells s'ha realitzat una prova a partir d'una energia a dissipar de 5.000kJ.

Els resultats i la configuració del sistema amb què es produeixen són els següents:

K_m (kN/m)	Z_{ap}	Z_{as}	ξ	F_a (kN)	X_a (m)	E_m (%)	E_a (%)	$E_{m\emptyset}$ (%)	X (m)	F (kN)
200	6	0	-	-	-	100	0	100	7,07	1.414
200	6	1	0,25	1.200	0,8	88	12	4,5	7,43	1.327
200	6	2	0,25	1.200	1,6	76	24	4,5	7,76	1.233
200	6	3	0,25	1.200	2,4	66,8	33,2	4,5	8,06	1.156
150	0	0	-	-	-	100	0	100	8,16	1.225
200	0	0	-	-	-	100	0	100	7,07	1.414
250	0	0	-	-	-	100	0	100	6,32	1.581
200	6	2	0,25	1.200	1,6	76	24	4,5	7,76	1.233
200	6	2	0,8	1.200	1,6	69,2	30,8	46,1	7,32	1.176
250	6	0	-	-	-	100	0	100	6,32	1.581
250	6	2	0,25	1.200	1,6	76	24	3,6	7,11	1.378

Taula C.1. Resultats de l'anàlisi unidimensional del sistema.

C.5 Conclusions

Per establir conclusions cal analitzar diversos dels paràmetres del sistema, com ara:

- El desplaçament total necessari per aturar la massa X ha de quedar limitat a valors constructivament acceptable (per exemple, de 4 a 8m) a fi que el sistema sigui operatiu i no envaeixi la zona a protegir.
- La rigidesa de la malla, K , i les forces màximes de ruptura de la molla (o malla), F_{MR} , i del dissipador, F_{MR} , han de ser tècnica i econòmicament viables.
- En cas d'utilitzar amortidors de freq, convé que aquests tinguin una característica el més pròxim possible a constant (valor de ξ proper a 1), a fi que siguin el més eficaços possible i el sistema sigui capaç d'absorbir energies elevades abans d'iniciar-se la deformació plàstica (que requereix manteniment posterior).
- L'anàlisi de resultats de la simulació amb el model anterior sembla indicar que els resultats obtinguts són semblants amb amortidors i sense, per la qual cosa sembla més útil centrar-se en el disseny de malles elàstiques adequades.



D Simulació en 2D del sistema

Per tal de comprendre el funcionament, tant cinemàtic com dinàmic, de la pantalla multiarticulada s'ha desenvolupat un model amb el programari MSC Visual Nastran.

El model, tot i desenvolupar-se en un entorn 3D, es realitza en 2D ja que l'objectiu fonamental d'aquesta fase és comprendre el mecanisme de deformació del conjunt i comparar les prestacions del nou concepte patentat amb les de les pantalles convencionals. Un model tridimensional requereix majors recursos de càlcul i, en aquesta fase del disseny, no aporta informació addicional rellevant.

El tipus de simulació realitzat s'anomena determinista, ja que analitza tots els estats per els que passa el sistema entre l'impacte i el repòs del sistema. Aquest fet combinat amb la possibilitat que permet el programari MSC Visual Nastran de visualitzar el moviment de sistemes facilita la comprensió del mecanisme de deformació de la pantalla.

Aquesta simulació no té com a objectiu obtenir resultats per a dissenyar d'una forma exhaustiva el sistema, ja que aquests resultats s'obtidran d'una posterior simulació del test d'homologació.

D.1 Hipòtesis

La simulació s'ha realitzat a partir de les següents hipòtesis:

- El fenomen d'aturada de roques es pot simplificar a dues dimensions.
 - A partir d'un vídeo de l'assaig d'homologació realitzat per Geobruigg (actualment no disponible a la xarxa) i del vídeo [2], s'observa com el gir dels màstils es produeix, pràcticament, respecte d'un sol eix perpendicular al pla de caiguda de la roca. Per tant, el gir dels màstils es pot considerar bidimensional en aquesta primera aproximació.
 - El mecanisme de deformació del conjunt i aturada de la roca és simètric respecte d'un pla perpendicular al pla de la malla i pel que cau la roca. Per tant, l'efecte dels components sobre el sistema es pot reduir a aquest pla.
- La roca cau seguint una trajectòria continguda en el pla de simulació. Donat que per veure el funcionament del sistema és indiferent la trajectòria que aquesta segueixi, es considera una trajectòria rectilínia i paral·lela al pendent.



- La malla es pot simplificar a un sol tensor que uneix un punt de la part superior del màstil i el terra. Aquest tensor tindrà dissipadors en cas de que es tracti d'una malla capaç de dissipar energia per mecanismes de frec o deformació.
 - Donat que la malla es troba fixada a un marc format per dos tensors: un a la part superior dels màstils i un altre a terra.
 - Donat que la llum entre màstils és superior a l'altura d'aquests, en deformar-se la malla sota l'impacte d'una roca les fibres que més es deformaran i, per tant, les que més treballaran seran les que es troben en el pla de simulació.
- Els tensors sobre els que es munten els dissipadors estan continguts en el pla de simulació.
 - Normalment els dissipadors es munten unint un punt del màstil i un del terra contingut en el pla perpendicular a la pantalla. També és possible trobar muntatges complementaris, en que el punt del terra no es troba en el pla, si no que són dos punts simètrics respecte d'aquest. De qualsevol de les dues maneres, es pot dissenyar un dissipador equivalent en el pla de simulació.
- Es simula l'aturada d'un roc de 6.400kg a una velocitat de 25m/s, amb el que el model haurà de dissipar de 2.000kJ a la velocitat de l'assaig d'homologació.
 - Donat que l'assaig d'homologació es realitza amb 3 trams de malla (4 màstils) i deixant caure el roc sobre el punt mig del conjunt, i observant la forma de deformar del vídeo [2], es considera que la zona que més treballa és el tram central de malla i els dos màstils que la retenen. Així, el model format per un màstil i el tram equivalent de malla absorbirà, com a màxim, el 40% de l'energia.
 - L'energia objectiu a dissipar són 5.000kJ i, per tal de poder avaluar correctament el mecanisme d'aturada de roques, es considera que cal simular a la mateixa velocitat de caiguda de la roca de l'assaig (25m/s).
- El màstil no interfereix amb la resta d'elements del sistema, inclosa la roca.
 - Donat que la llum entre màstils és de 10m i l'aresta de la roca d'assaig fa 1,9m es considera que, de forma normal, les roques no cauran a sobre d'un màstil o dels seus tensors.
 - L'arrossegament del màstil que produeix la interferència malla-màstil es considera menyspreable donada la distància entre màstils.



D.2 Metodologia

Partint de les hipòtesis definides anteriorment, s'ha definit la següent metodologia de disseny, simulació i anàlisi:

- Definició d'un model geomètric.
- Definició d'un model físic dels components.
- Definició d'un model numèric equivalent al model físic.
- Caracterització del sistema de partida. A partir de la informació recopilada sobre els sistemes emprats per la competència, s'atribueixen valors a les variables del sistema.
- Simulació del sistema i avaluació dels resultats. Validació del model.
- Simulació del sistema per a diferents configuracions: diferents valors de la resistència de les ròtules (des de fixes fins a molt toves), diferents valors dels dissipadors (des de l'absència de dissipador, tensor rígid, fins a l'absència de tensor).
- Anàlisi del comportament del sistema per als diferents valors dels paràmetres d'entrada. Decisió de quina és la disposició òptima i, si cal, definició noves simulacions.

D.3 Model geomètric

Per a poder simular el model cal fer un disseny geomètric del sistema. Aquest model geomètric es mantindrà al llarg de tota la simulació per tal d'obtenir informació comparativa dels efectes de la variació de cada característica del conjunt sobre els resultats de l'impacte en el sistema.

El model geomètric s'ha desenvolupant a partir de les dades de la norma sobre les mides del sistema [1] i el posicionament dels components en l'esquema de la patent. La resta del disseny, que no queda fixat per les dues referències citades, han estat definides pel projectista.

A continuació s'adjunten dos esquemes en que, d'una banda, s'identifiquen els elements que componen el sistema i, de l'altra, s'acoten les mides dels components i el seu posicionament.



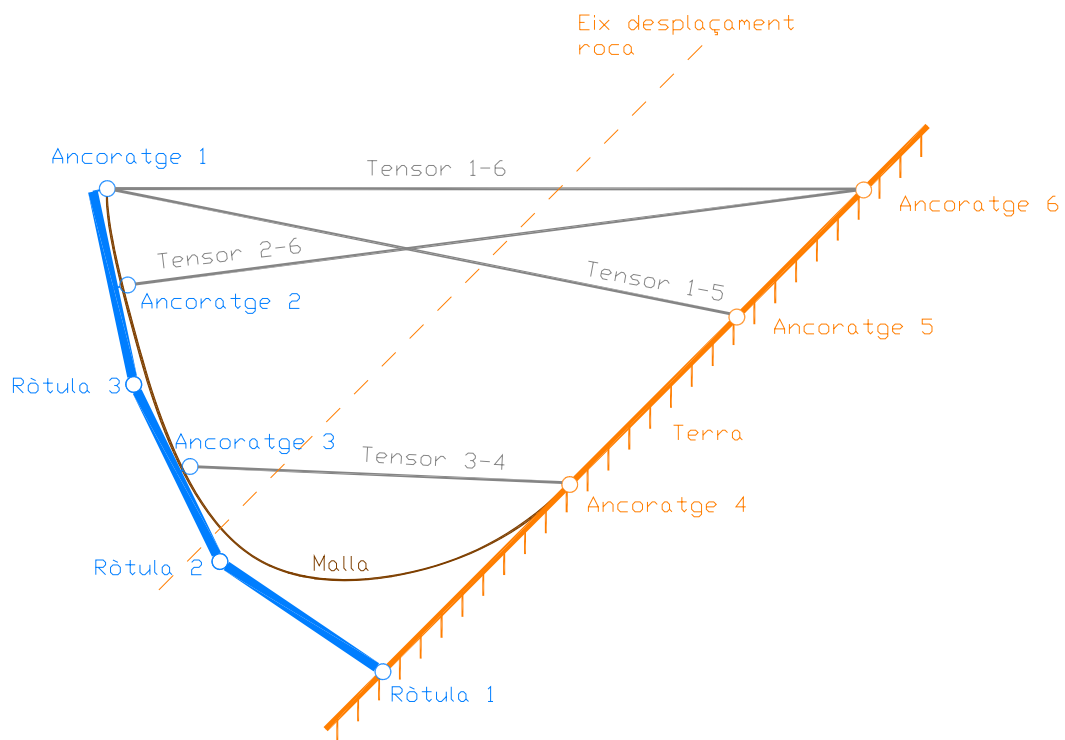


Fig. D.1. Esquema descriptiu del model geomètric simulat.

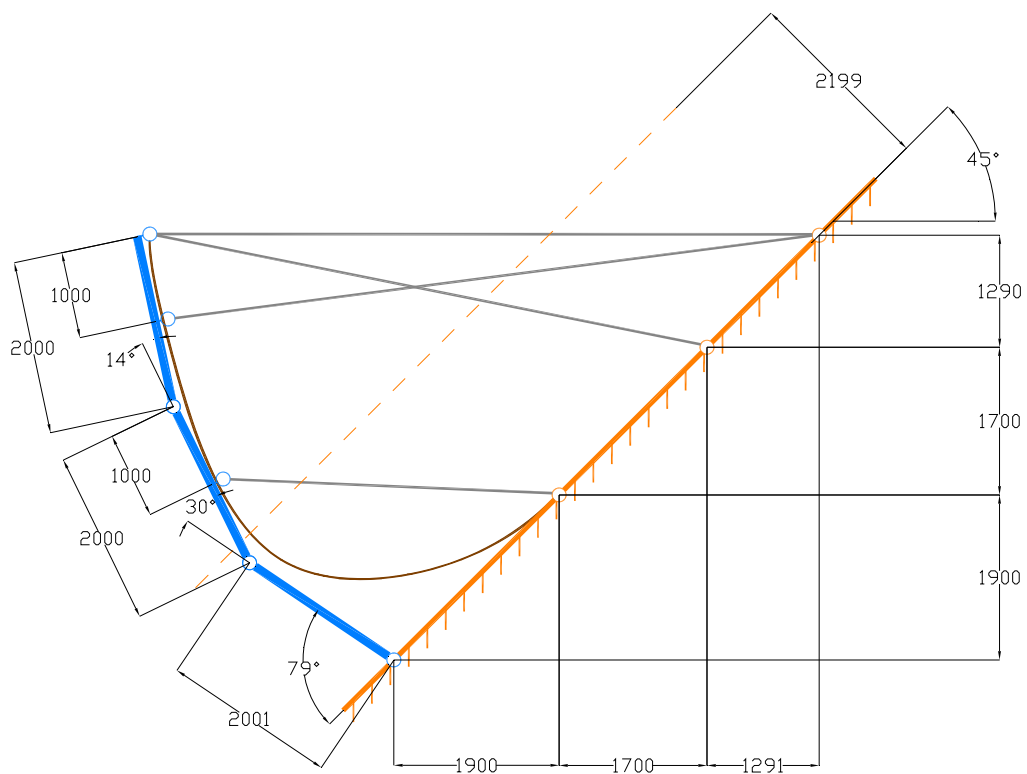


Fig. D.2. Esquema acotat del model geomètric simulat.



D.4 Model físic

Per fer una bona anàlisi del sistema cal analitzar l'estructura i funcionament del components per tal de poder-los modelitzar. Tot i que en tractar-se d'un projecte acadèmic no és possible, caldria assajar els components per caracteritzar-los d'una forma precisa. A continuació es descriuen les hipòtesi desenvolupades sobre el comportament físic dels elements:

- **Malla:** es considera que treballa com una membrana. Per a caracteritzar-la, caldria un assaig de tracció en les dues direccions principals (les del pla en que està continguda) del que s'obtidrien dades d'allargament màxim i càrrega a ruptura. Se li suposa un comportament elàstic i, sota càrrega, actua com una corda tensada, és a dir, només treballa en les direccions de les fibres ja que no és capaç de suportar esforços de flexió.
- **Articulacions:** només permeten la rotació en un sol eix i, a més, oposen resistència al gir. La resistència pot ser realitzada per frec sec (parell resistent constant) o per deformació d'un component (parell proporcional a l'angle girat).
- **Dissipadors:** caldria assajar-los per a conèixer el seu comportament i poder-los simular amb solvència. Es considera que seguiran un comportament combinat entre molla elàstica i amortidor de frec sec. Donat que la majoria de dissipadors emprats són irreversibles, es considera que només es deformaran sota càrregues superiors a les que han patit fins aquell moment, actuant com elements rígids per a forces inferiors i no tenint la capacitat de recuperar la seva longitud inicial quan s'allibera la càrrega.
- **Màstils:** es consideren elements rígids, de perfil i pes indeterminat. L'objectiu és detectar les forces que pateix per a determinar-ne el perfil.
- **Tensors:** es consideren rígids, donat que la seva rigidesa és molt superior a la dels dissipadors i, en conseqüència, en primera aproximació es considera menyspreable la deformació dels tensors respecte de la dels dissipadors. A més, cal tenir en compte que la deformació depèn de la secció i aquesta es determinarà a partir de les forces a que estiguin sotmesos els tensors.
- **Punts de fixació a terra.** Tots els punts en què es fixen elements a terra es suposaran fixes i les unions rígides. A partir de les forces obtingudes en aquests punts, es dissenyaran els ancoratges i les platines de fixació dels màstils.



D.5 Model numèric

Per a poder simular el model cal fer un model numèric que sigui anàleg al model físic i pugui ser implementat en el programari de simulació.

A continuació es descriu el model numèric que s'ha emprat per a realitzar aquesta simulació.

D.5.1 Dissipador lineal

Es parteix de les següents hipòtesis:

- No és capaç de recuperar la seva posició inicial, malgrat tenir un comportament proporcional. Per tant, si la força a la que està sotmès és inferior a la màxima soferta fins al moment, es comporta com un element rígid amb la longitud màxima que ha arribat a tenir.
- Es suposa, a falta de poder realitzar un assaig de caracterització dinàmica (per a diferents velocitats de deformació), una resposta a la velocitat constant.

Per a simular els dissipadors lineals amb el programa VisualNastran s'ha seguit el següent procediment:

- Es situa un element elàstic entre els dos punts que uneix el tensor amb dissipadors.
- Es posa un mesurador, *meter*, de longitud a l'element.
- S'afegeix un paràmetre de sortida addicional que es diu *max* i memoritza la longitud màxima que ha tingut l'element al llarg del temps.
- Es configura l'element de forma que tingui una constant elàstica *k* mentre la longitud sigui major o igual que *max*, i zero quan sigui menor.
- S'aplica un coeficient de 0,999 per tal que el sistema no oscil·li en posicions properes a la igualtat.

D.5.2 Les ròtules

Per a simular les ròtules amb frec sec amb el programa VisualNastran s'ha seguit el següent procediment:

- Allà on hi va una ròtula amb frec es posen una ròtula ideal i una ròtula amb frec viscos i molla de torsió.
- Es configura la ròtula de frec viscos amb valor zero.



- Es configura la resistència de la ròtula de frec sec (molla de torsió amb tensió independent de la posició) amb valor positiu si la velocitat de gir de la ròtula és positiva i, negatiu, si la velocitat es negativa. La velocitat es defineix com la diferència de velocitats de gir respecte del terra de les dues barres que uneix la ròtula o la velocitat angular de la barra si aquesta està simplement unida amb el terra.
- Es configura el conjunt ròtula amb frec com actiu sempre que la velocitat de gir d'aquesta sigui diferent de zero.

NOTA: Tot i que no és possible fer un model de frec sec que faci un parell igual al que rep fins arribar al lliscament, s'obté una ròtula que ofereix un parell resistent que oscil·la de forma que s'aconsegueix un model d'una gran aproximació.

D.5.3 La malla

Es parteix de les següents hipòtesis:

- La corba de funcionament estàtic és aproximadament la mateixa que la d'un dissipador estàtic.
- La malla té un punt mig que seguirà la mateixa trajectòria que la roca, una vegada aquesta impacti amb la pantalla.
- El comportament de la malla és elàstic i independent de la velocitat.

Per a simular la malla amb el programa VisualNastran s'ha seguit el següent procediment:

- Es fa una placa plana de petites dimensions i s'imposa que col·lideixi amb aquest i que el coeficient de frec i el de restitució en cas d'impacte entre ambdós és nul.
- Es restringeix el desplaçament de la malla, de forma que aquesta només tingui un grau de llibertat, el desplaçament al llarg de la direcció en que cau la roca.
- Es situen dos elements elàstics: un entre el terra i la placa, i un altre entre aquesta i la part superior de la barra articulada.
- Es configuren els elements elàstics de la mateixa forma que els dissipadors lineals, de forma que el seu comportament sigui proporcional però no reversible.

S'aconsegueix un model de malla senzill, amb el que el procés de càlcul es simplifica i s'eviten errors. En tenir un sol grau de llibertat s'eviten indeterminacions



D.6 Definició de paràmetres

Abans de començar a simular i per tal d'obtenir dades comparatives que es puguin analitzar, cal definir els paràmetres que es controlaran (paràmetres d'entrada) i els paràmetres que es mesuraran per ser analitzats (paràmetres de sortida).

D.6.1 Paràmetres d'entrada

Donat que l'objectiu de l'anàlisi és comprendre el funcionament del sistema i valorar l'efecte de la variació de les característiques dels components en el comportament del sistema, s'han definit paràmetres relacionats amb els components que dissipen l'energia.

Aquests paràmetres que es poden modificar al llarg de l'anàlisi són:

- **Rigidesa** (N/m) dels dissipadors i de la malla. Les variables que defineixen aquest valor s'anomenen Dxy, en el cas dels dissipadors, o Malla. x i y prenen el valor dels punts que uneixen, de manera que el dissipador que va de 1 a 6 s'anomena D16.
- **Frec a les ròtules** (N·m). Les variables que defineixen aquest valor s'anomenen R1, R2 o R3, segons a quina ròtula es refereixen, començant a numerar per la ròtula que articula a terra.

D.6.2 Paràmetres de sortida

Per tal de poder avaluar com es reparteix la dissipació d'energia, funció principal del sistema, es defineixen tres paràmetres que són la càrrega per element en forma de percentatge. Aquests paràmetres indiquen l'energia que s'encarrega de dissipar cada tipus de component (malla, dissipadors i ròtules).

Aquests paràmetres s'obtenen del tractament de les dades obtingudes del model, però es consideren més representatius que aquests.

Per exemple, per obtenir el percentatge absorbit per una ròtula cal obtenir l'angle que ha girat, en radiants, multiplicar-lo pel parell resistent i, finalment, dividir el resultat per l'energia total dissipada.

També s'ha definit la variable *error*, que avalua la diferència entre l'energia total dissipada (per càlcul) i l'energia perduda per la roca. S'ha limitat l'error permès a un 5%, donat que l'objectiu d'aquesta fase és comprendre el sistema i avaluar-ne la seva viabilitat, i no obtenir dades exactes per al disseny de components.



El tractament dels resultats per obtenir els paràmetres de sortida es detalla a continuació:

- Energia absorbida per un dissipador, per exemple d16:

$$E_{d16}=0,5 \cdot d16 \cdot (x16)^2 \quad (\text{Eq. D.1.})$$

- Energia absorbida per tots els dissipadors:

$$E_{dis} = \sum E_{dXY} \quad (\text{Eq. D.2.})$$

- Energia absorbida per la malla:

$$E_{malla} = 0,5 \cdot Malla \cdot [(xM1)^2 + (xM2)^2] \quad (\text{Eq. D.3.})$$

- Energia absorbida per una ròtula, per exemple R1:

$$E_{R1} = \alpha 1(\text{rad}) \cdot R1 \quad (\text{Eq. D.4.})$$

- Energia absorbida per totes les ròtules:

$$E_{ròt} = \sum E_{RX} \quad (\text{Eq. D.5.})$$

- Energia total absorbida pel sistema:

$$E_t = E_{dis} + E_{malla} + E_{ròt} \quad (\text{Eq. D.6.})$$

- Percentatge d'energia absorbida a les ròtules:

$$\%R = 100 \cdot (E_{ròt} / E_t) \quad (\text{Eq. D.7.})$$

- Percentatge d'energia absorbida a la malla:

$$\%M = 100 \cdot (E_{malla} / E_t) \quad (\text{Eq. D.8.})$$

- Percentatge d'energia absorbida al dissipador:

$$\%D = 100 \cdot (E_{dis} / E_t) \quad (\text{Eq. D.9.})$$

- Error:

$$e(\%) = 100 \cdot [(E_t - 2000) / 2000] \quad (\text{Eq. D.10.})$$



D.7 Primera anàlisi

Abans de realitzar una bateria de simulacions del model, cal caracteritzar un model de partida, simular-lo i analitzar la validesa d'aquest.

Aquesta anàlisi ha estat més profunda que les posteriors, donat que cal assegurar-se de que el model permet obtenir informació representativa del sistema real.

D.7.1 Caracterització del sistema

Sondejant les configuracions vistes per empreses de la competència, del propi client i els resultats de l'anàlisi unidimensional s'opta per la següent caracterització del sistema:

Tipus de paràmetre	Paràmetre	Valor	Unitat
Rigidesa dissipador	D15	$1,7 \cdot 10^5$	N/m
	D16	10^5	
	D26	$5 \cdot 10^4$	
	D34	$7,3 \cdot 10^4$	
Rigidesa malla	Malla	10^5	
Parell resistent	R1	$5 \cdot 10^5$	N·m
	R2	10^6	
	R3	10^6	

Taula D.1. Caracterització del sistema (model de partida).

D.7.2 Resultats obtinguts

De la simulació s'obtenen les següents captures, que ajuden a comprendre l'aturada de roques d'una forma visual:

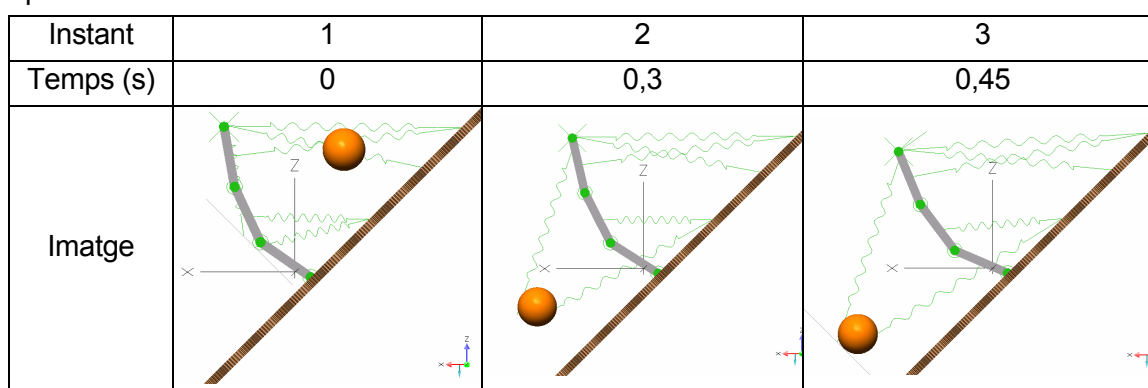


Fig. D.3. Captures aturada de roques (model de partida).



A més, s'obtenen els següents resultats numèrics:

Tipus de resultat	Paràmetre	Valor	Unitat
Temps d'aturada	t	0,45	s
Desplaçament	x	5,3	m
Elongació dissipador	x15	0,99	m
	x16	0,87	
	x26	0,91	
	x34	0,37	
Elongació malla	xM1	3,44	m
	xM2	4,98	
Gir ròtula	$\alpha 1$	12	°
	$\alpha 2$	0,5	
	$\alpha 3$	1	

Taula D.2. Resultats de la simulació (model de partida).

Tractant aquests resultats, s'obté els paràmetres de sortida:

Tipus de paràmetre	Paràmetre	Valor	Unitat
Energia dissipada per tipus de component	R	6	%
	D	7	
	M	87	
Error	e	1,5	

Taula D.3. Paràmetres de sortida (model de partida).

D.7.3 Conclusions. Validació del model

Analitzant la simulació s'obtenen les següents conclusions sobre la validesa del model:

- El model es deforma d'una forma molt semblant a la prova feta per Geobruigg [2], sent la malla l'element que més es deforma, sent contingut el desplaçament dels màstils.
- La major part de l'energia (87%) és absorbida per la malla, fet que és coherent donat que és l'element que més es deforma.
- El desplaçament (x), de 5,3m, és semblant a l'acotat per Geobruigg (6,6m) en la descripció dels seus productes [3].
- El temps d'aturada (t), de 0,45s, és semblant al que es pot observar a l'assaig realitzat per Geobruigg (menor a 1s) [2].
- L'error és baix, un 1,5%, fet que suporta la hipòtesi de que el model és correcte.

Per totes aquestes raons **es considera vàlid el model.**



D.8 Anàlisi exploratòria del model

El model amb el que s'ha realitzat la primera simulació és arbitrari tot i estar fonamentat en dades obtingudes de la competència i el client.

Per conèixer l'efecte de la variació de les característiques de cada components sobre el comportament del sistema cal realitzar una anàlisi exploratòria del model.

Amb aquesta anàlisi es pretén conèixer millor el mecanisme d'aturada de roques de la pantalla multiarticulada.

D.8.1 Metodologia de prova utilitzada

En primer lloc, s'ha optat per realitzar proves intuïtives en que variant el valor d'un o diversos paràmetres s'intenta preveure com es comportarà el sistema.

A continuació i per tal de conèixer les conseqüències de la variació d'una variable sobre el comportament del conjunt d'una forma sistemàtica, s'ha realitzat una bateria de proves en que s'ha fixat el valor de totes les variables menys una i a aquesta se li han donat 3 o 4 valors diferents.

Als paràmetres se'ls ha imposat valors que varien entre:

- 0. Valor que s'adjudica a la rigidesa d'un dissipador per simular que no es situa cap dissipador ni tensor entre els punts X i Y. Serveix per avaluar la necessitat de muntar 4 dissipadors entre diferents punts o si és suficient només amb 1 o 2.
- Valors entremitjos. Serveixen per intuir si en la configuració òptima del sistema un paràmetre ha de ser tou, entremig o molt rígid. Depenent del valor de rigidesa o parell resistent òptim que s'obtingui, es pot intuir el tipus de malla, de dissipador o de ròtula es dissenyarà per a posteriors anàlisis.
- Rígid. Es tracta d'una restricció que s'afegeix a una ròtula per a que aquesta quedi fixada. Permet observar l'efecte que té l'articulació del màstil per un determinat punt sobre el conjunt i avaluar la necessitat d'articular.

D.8.2 Valors de prova i resultats obtinguts

S'han realitzat 88 proves amb configuracions diferents.

S'han resumit tots els valors dels paràmetres amb els que s'ha simulat i els valors de les variables de sortida obtinguts en una taula per tal de facilitar-ne l'anàlisi.



A continuació es recullen aquests valors:

nº proba	Rigideses (N/m)					Frec a les ròtules N-m			Càrrega per element (%)		
	D 16	D15	D26	D 34	Malla	R1	R2	R3	Ròtules	Frens	Malla
1	10000	10000	0	0	100000	1000000	100000	rígid	8	5	87
2	100000	100000	0	0	100000	1000000	100000	rígid	2	11	87
3	100000	100000	0	0	100000	500000	500000	rígid	6	6	89
4	100000	0	0	10000	100000	100000	1000000	rígid	3	10	87
5	50000	0	0	50000	100000	200000	500000	rígid	5	7	87
6	50000	0	0	50000	100000	60000	60000	rígid	6	9	85
7	50000	0	0	50000	100000	100000	100000	rígid	4	9	87
8	50000	0	0	50000	100000	1000000	1000000	rígid	9	1	90
9	100000	100000	0	0	100000	100000	100000	100000	10	6	84
10	100000	100000	0	0	100000	500000	500000	500000	10	4	85
11	100000	100000	0	0	100000	1000000	1000000	1000000	8	1	90
12	50000	0	0	50000	100000	40000	100000	rígid	4	10	86
13	50000	0	0	50000	100000	40000	1000000	rígid	2	12	86
14	50000	0	0	50000	100000	400000	100000	rígid	4	7	89
15	50000	0	0	50000	100000	400000	1000000	rígid	9	4	87
16	50000	0	0	500000	100000	40000	100000	rígid	1	12	87
17	50000	0	0	500000	100000	40000	1000000	rígid	1	12	87
18	50000	0	0	500000	100000	400000	100000	rígid	3	7	90
19	50000	0	0	500000	100000	400000	1000000	rígid	7	6	88
20	500000	0	0	50000	100000	40000	100000	rígid	12	4	84
21	500000	0	0	50000	100000	40000	1000000	rígid	2	12	85
22	500000	0	0	50000	100000	400000	100000	rígid	3	7	90
23	500000	0	0	50000	100000	400000	1000000	rígid	4	8	88
24	500000	0	0	500000	100000	40000	100000	rígid	8	6	86
25	500000	0	0	500000	100000	40000	1000000	rígid	1	11	87
26	500000	0	0	500000	100000	400000	100000	rígid	2	7	91
27	500000	0	0	500000	100000	400000	1000000	rígid	3	8	89
28	1000000	0	0	20000	100000	20000	2000000	rígid	2	5	94
29	1000000	0	0	20000	500000	20000	2000000	rígid	2	10	88

Taula D.4. Resultats de l'anàlisi exploratòria del model (I).



n° proba	Rigideses (N/m)					Frec a les ròtules N·m			Càrrega per element (%)		
	D 16	D15	D26	D 34	Malla	R1	R2	R3	Ròtules	Frens	Malla
30	500000	0	0	50000	500000	40000	1000000	rígid	2	10	88
31	500000	0	0	50000	100000	40000	1000000	1000000	3	13	85
32	500000	0	0	50000	500000	40000	1000000	1000000	5	9	85
33	500000	0	0	50000	200000	40000	1000000	1000000	2	12	86
34	500000	0	0	50000	50000	40000	1000000	1000000	3	6	91
35	500000	0	0	50000	80000	40000	1000000	1000000	2	11	87
36	500000	0	0	50000	100000	40000	500000	1000000	2	12	86
37	500000	0	0	50000	100000	40000	500000	500000	2	13	86
38	500000	0	0	50000	100000	40000	300000	700000	9	8	83
39	500000	0	0	50000	100000	40000	700000	300000	5	12	83
40	500000	0	0	50000	100000	40000	700000	500000	9	8	83
41	500000	0	0	50000	100000	40000	300000	500000	2	4	94
42	100000	0	0	50000	100000	40000	500000	1000000	2	11	86
43	200000	0	0	100000	100000	40000	500000	1000000	3	10	87
44	500000	0	0	0	100000	40000	500000	500000	5	12	83
45	500000	0	0	0	100000	40000	200000	500000	11	6	83
46	1000000	0	0	0	100000	40000	200000	500000	11	2	88
47	500000	0	0	100000	100000	40000	500000	1000000	3	12	85
48	500000	0	0	30000	100000	40000	500000	1000000	3	12	85
49	50000	10000	500000	500000	100000	40000	1000000	500000	1	15	84
50	50000	10000	500000	500000	100000	40000	1000000	100000	5	14	82
51	50000	10000	1000000	500000	100000	40000	1000000	500000	2	8	91
52	50000	10000	500000	1000000	100000	40000	1000000	500000	1	13	86
53	50000	10000	500000	500000	100000	40000	5000000	500000	4	14	82
54	10000	10000	500000	500000	100000	40000	1000000	500000	1	14	84
55	50000	10000	500000	500000	100000	4000	1000000	500000	1	15	84
56	50000	1000	500000	500000	100000	40000	1000000	500000	1	14	85
57	10000	5000	500000	1000000	100000	40000	5000000	500000	1	10	90
58	100000	100000	500000	1000000	100000	40000	1000000	50000	1	15	85
59	0	0	1000000	1000000	100000	40000	5000000	500000	4	7	89

Taula D.5. Resultats de l'anàlisi exploratòria del model (II).



nº proba	Rigideses (N/m)					Frec a les ròtules N·m			Càrrega per element (%)		
	D 16	D15	D26	D 34	Malla	R1	R2	R3	Ròtules	Frens	Malla
60	100000	100000	1000000	1000000	100000	40000	5000000	500000	5	5	90
61	100000	100000	100000	100000	100000	40000	5000000	500000	2	15	83
62	100000	100000	100000	100000	100000	40000	1000000	500000	2	15	84
63	500000	0	0	500000	100000	40000	100000	rígid	6	7	87
64	100000	170000	50000	73000	100000	500000	1000000	1000000	6	7	87
65	100000	170000	50000	73000	100000	0	1000000	1000000	2	15	83
66	100000	170000	50000	73000	100000	1000000	1000000	1000000	5	3	92
67	100000	170000	50000	73000	100000	rígid	1000000	1000000	2	0	97
68	100000	170000	50000	73000	100000	500000	0	1000000	1	14	85
69	100000	170000	50000	73000	100000	500000	100000	1000000	3	11	86
70	100000	170000	50000	73000	100000	500000	rígid	1000000	6	7	87
71	100000	170000	50000	73000	100000	500000	1000000	0	4	15	81
72	100000	170000	50000	73000	100000	500000	1000000	100000	4	6	90
73	100000	170000	50000	73000	100000	500000	1000000	rígid	5	7	88
74	0	170000	50000	73000	100000	500000	1000000	1000000	8	6	86
75	1000	170000	50000	73000	100000	500000	1000000	1000000	9	6	85
76	rígid	170000	50000	73000	100000	500000	1000000	1000000	3	0	97
77	100000	0	50000	73000	100000	500000	1000000	1000000	8	5	87
78	100000	1000	50000	73000	100000	500000	1000000	1000000	8	5	87
79	100000	rígid	50000	73000	100000	500000	1000000	1000000	3	0	97
80	100000	170000	0	73000	100000	500000	1000000	1000000	8	6	86
81	100000	170000	1000	73000	100000	500000	1000000	1000000	7	6	87
82	100000	170000	rígid	73000	100000	500000	1000000	1000000	1	0	99
83	100000	170000	50000	0	100000	500000	1000000	1000000	6	7	87
84	100000	170000	50000	1000000	100000	500000	1000000	1000000	6	7	87
85	100000	170000	50000	rígid	100000	500000	1000000	1000000	3	2	95
86	100000	170000	50000	73000	20000	500000	1000000	1000000	5	2	93
87	100000	170000	50000	73000	10000000	500000	1000000	1000000	8	5	86
88	100000	170000	50000	73000	1000000	500000	1000000	1000000	9	5	86

Taula D.6. Resultats de l'anàlisi exploratòria del model (III).



D.8.3 Conclusions

De la simulació s'obtenen les següents conclusions:

- Com més rígid és el sistema (ròtules i dissipadors) més energia absorbeix la malla i menys l'estructura. Al contrari, com més mòbil és el sistema més energia és capaç d'absorbir i, per tant, descarrega la malla.
- L'energia dissipada per la malla es troba sempre entre el 80 i el 97% de l'energia total dissipada a l'impacte (per a càrrega màxima). Es considera que aquest fet és degut a que es tracta de l'element que més es deforma, doncs la rigidesa dels màstils encara que estiguin articulats els fa deformar menys que la malla.
- Si es planteja aquesta anàlisi com un estudi de qualitat d'un sistema que falla i es consideren les fraccions d'energia que absorbeix cada element com la probabilitat de que el sistema falli, resulta evident pensar que si es milloren les prestacions de la malla (responsable del 80% de l'absorció d'energia) es milloraran de forma important les prestacions del sistema [4].
- El sistema és molt sensible als canvis en les característiques dels seus components. Tot i que s'ha intentat fer un model estadístic dels resultats, no s'han obtingut resultats coherents. Això és degut a que cal entendre el sistema com un "conjunt" o un "tot" en que la interacció complexa de tots els elements permet aturar la roca.
- Tot i que no s'ha modificat el disseny geomètric del sistema, s'ha observat que és un element clau per al bon funcionament del conjunt la "bossa" que fa la malla en repòs. Això és donat a que a partir de la direcció que prengui la reacció d'aquesta sobre les barres, el conjunt tendirà a moure's d'una forma o d'una altra.
- Per a que el sistema funcioni correctament, és a dir per a que el sistema no perdi massa altura útil en la frenada per l'excessiva deformació de la part estructural, el parell resistent de les ròtules R2 i/o R3 ha de ser superior als 400.000N·m.

D.9 Anàlisi comparativa

De forma complementària a l'anàlisi anterior, es considera necessari comparar directament els dos sistemes: pantalla dinàmica convencional i pantalla multiarticulada.

Per fer-ho, es parteix de dos models exactament iguals, tant pel que fa a geometria com pel que fa a característiques dels components, amb l'única diferència que les ròtules situades al llarg del màstil es bloquegen en el cas de la pantalla dinàmica convencional.



Els resultats que s'obtenen són els següents:

Paràmetre	Monoarticulada		Multiarticulada	
Energia dissipada a la malla	1.866 kJ	91%	1.832 kJ	87%
Energia dissipada als frens	156 kJ	8%	148 kJ	7%
Energia dissipada a les ròtules	21 kJ	1%	131 kJ	6%
Energia dissipada total	2.043 kJ	100%	2.102 kJ	100%
Distància de frenada	5,38 m		5,30 m	
Altura final de la pantalla	5,52 m		5,68 m	

Taula D.7. Resultats de l'anàlisi comparativa entre pantalla dinàmica i multiarticulada.

A partir de les dades anteriors, s'ha arribat a les següents conclusions:

- Sobre la norma[1]:
 - S'observa com ambdós models passarien els assajos de la norma pel que fa a deformació sota càrrega.
 - Ambdós models s'allarguen d'una forma semblant. De fet, només hi ha una diferència de 8 centímetres. Aquest fet mostra que amb una rigidesa de conjunt semblant, cal que el conjunt és deformi també una longitud semblant per aturar el roc.
 - El model de la patent pateix una pèrdua d'alçada útil de la malla inferior al tradicional. De fet, mentre el model tradicional perd alçada, el nou sistema guanya alçada de malla, evitant possibles pèrdues d'efectivitat del sistema en rebre un segon impacte. Es tracta d'una diferència petita, d'uns 16cm sobre més de 5m, pel que cal anar amb compte a l'hora de considerar aquest avantatge.
- Sobre els elements:
 - **Malla:** la malla dissipa més energia en el cas del model tradicional, tot i que de forma poc significativa. Numèricament, dissipa un 2% més d'energia que la malla en el model nou. Es considera que la diferència no és prou gran com per a implicar grans conseqüències.
 - **Dissipadors lineals:** de forma intuïtiva sembla lògic pensar que en tenir més mobilitat i deformar-se més, el model nou permetrà que els dissipadors lineals actuïn en major mesura. Després de fer l'anàlisi numèrica s'observa com



aquest fet no es produeix, més aviat al contrari, ja que disminueix lleugerament l'energia dissipada en aquests elements.

- **Ròtules:** el model nou disposa de tres ròtules en les que s'hi pot dissipar energia, mentre que el tradicional només en té una. Aquest fet fa que l'energia perduda en aquests elements en el model nou sigui molt superior (un 6% respecte a un 1%) i la principal causa del menor treball de la malla.
- Sobre els costos:
 - S'intueix que l'augment de prestacions del concepte de pantalla multiarticulada respecte de la tradicional pot no ser suficient com per a compensar l'augment del cost i la complexitat de muntatge i fabricació del conjunt.

D.10 Conclusions

Finalment, es recullen les conclusions principals de les anàlisis realitzades a partir del model 2D i se n'elaboren de noves.

Les conclusions a les que s'arriba són:

- El model bidimensional és vàlid i representatiu del comportament del sistema.
- Com més rígida és la part estructural del sistema, ròtules i dissipadors, més energia absorbeix la malla i menys l'estructura. Tot i això, en tots els casos simulats l'energia absorbida per la malla és superior al 80%.
- Comparant dues pantalles equivalents, una multiarticulada i l'altra convencional, s'observa com les diferències mínimes, donat que la malla segueix deformant més que la resta del sistema i dissipant la majoria de l'energia. A més, la disminució de la distància de frenada i l'augment de l'altura final útil de pantalla són mínims.
- Per a que el sistema no perdi massa altura útil en la frenada per l'excessiva deformació de la part estructural, el parell resistent de les ròtules R2 i/o R3 ha de ser superior als 400.000N·m.

A partir d'aquestes conclusions es desenvolupen les següents reflexions:

- S'intueix que l'augment de prestacions del concepte de pantalla multiarticulada respecte de la tradicional pot no ser suficient com per a compensar l'augment del cost i la complexitat de muntatge i fabricació del conjunt.



E Article: teixits tècnics en pantalles dinàmiques

Després d'analitzar el sistema (apartats 6 i 7 de la memòria) sorgeix la idea d'aprofitar el gran allargament a ruptura que permeten els materials plàstics per desenvolupar una malla que permeti una gran deformació.

Per tal de cercar col·laboradors per al desenvolupament d'aquesta línia de recerca, es presenta al congrés Aplimatec'06 l'article "APLICACIÓN DE TEJIDOS TÉCNICOS A PANTALLAS DINÁMICAS DE GRAN CAPACIDAD DE DISIPACIÓN".

Donat que el contingut d'aquest article es considera d'interès per al lector i no es troba en cap publicació, es decideix incloure el contingut íntegre de l'article en aquest annex.



APLICACIÓN DE TEJIDOS TÉCNICOS A PANTALLAS DINÁMICAS DE GRAN CAPACIDAD DE DISIPACIÓN

**Carles Riba Romeva ^(p), Carles Domènech Mestres,
Sònia Llorens Servera, Òscar Abellaneda Fernández**

Centre de Disseny d'Equips Industrials (CDEI)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, España
carles.riba@upc.edu, domenech@cdei.upc.edu

RESUMEN

El objetivo del presente artículo es establecer las consideraciones generales en la aplicación de los tejidos técnicos para la fabricación de pantallas dinámicas de protección contra desprendimientos con gran capacidad de disipación.

Para ello, después de una breve introducción de las funciones y características de las pantallas dinámicas, se establecen las condiciones de disipación de energía para, más adelante, analizar las características que deberían tener los tejidos técnicos para adecuarse a este tipo de aplicación. También se analizan algunas ventajas complementarias de los tejidos técnicos frente a otras formas constructivas de pantalla dinámica.

Como conclusión se establecen algunas líneas de investigación y desarrollo de tejidos técnicos para su aplicación a este tipo de elementos de protección.

Palabras clave: pantalla dinámica, tejido técnico, disipación de energía cinética.

1. INTRODUCCIÓN A LAS PANTALLAS DINÁMICAS

El problema de los desprendimientos de rocas y piedra sobre núcleos habitados o infraestructuras aumenta a medida que la sociedad trata de ganar terreno a la naturaleza.

El primer intento de dar seguridad a zonas amenazadas por la caída de rocas lo hizo el productor de cable suizo Geobrugg en el año 1958, que instaló su primera pantalla estática (llamada de esta manera debido a que no permitía ningún movimiento de su estructura).

Actualmente, los sistemas de protección contra desprendimientos han evolucionado hacia las pantallas dinámicas. Estos sistemas mejoran la parada de rocas, ya que la energía cinética se disipa mediante el movimiento de una estructura y grandes deformaciones elásticas o plásticas de componentes, en lugar de absorber toda la energía en estructuras rígidas que, habitualmente, acaban rompiéndose para permitir la deformación necesaria para parar la roca.

La Asociación Suiza del Medioambiente, los Bosques y el Paisaje (Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape) en el "Manual para la aprobación de sistemas de protección contra desprendimientos [2]" define la función de las Pantallas Dinámicas de una forma muy sencilla y a la vez interesante:

Wherever the protective function of the forest cannot satisfy the safety requirements of modern civilization (any more), technology comes in. This is why, for many years already, protective nets against rockfall have been supplementing the protective function of the forest, or replacing it in locations where no forest exists at all.

Cuando la función de protección de los bosques no satisface las necesidades de las nuevas civilizaciones, la tecnología entra en juego. Por eso, desde hace unos años, las redes de protección contra desprendimiento están completando la función de protección de los bosques, o substituyéndolos donde éstos no existen.

En el presente artículo se desarrolla a partir del conocimiento adquirido por los miembros del Centro de Diseño de Equipos Industriales (CDEI-UPC) durante el proyecto de innovación tecnológica de "Diseño y desarrollo de soluciones innovadoras para aumentar la capacidad de disipación de energía de las pantallas dinámicas de protección contra desprendimientos" en colaboración con la empresa ACYCSA.

1.1 Estructura de las pantallas dinámicas

Las pantallas dinámicas más habituales presentan la estructura siguiente:

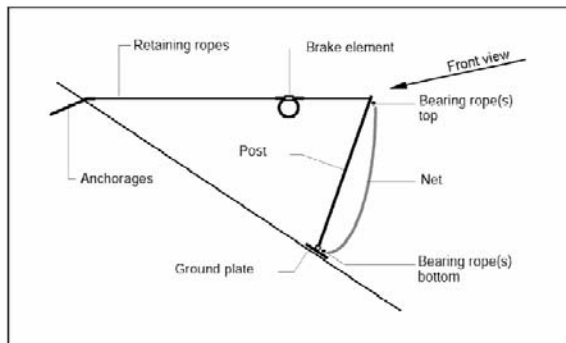


Figura 1: Vista de perfil de una pantalla dinámica

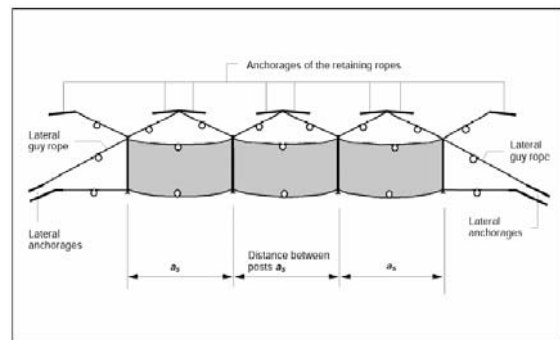


Figura 2: Vista en planta de una pantalla dinámica

- **Malla:** es el elemento sobre el que impactará la roca y deberá absorber parte de su energía y transmitir los esfuerzos al resto del conjunto. Habitualmente es de acero.
- **Postes:** son los elementos que dan consistencia al conjunto. Se encargan de sujetar verticalmente la malla y, en las pantallas dinámicas, permiten un cierto desplazamiento del conjunto. Habitualmente son perfiles de acero.
- **Tensores:** son unos cables que se encargan de sujetar los postes y evitar que se desplacen demasiado y permitan el paso de las rocas. Habitualmente son de cable de acero.
- **Disipadores:** son unos elementos que por su geometría, se deforman en colisionar la roca y disipan una cierta energía. Actualmente, empiezan a entrar en desuso.

1.2 Modelo simplificado de una pantalla dinámica

La energía cinética de una roca (u otro objeto) de gran masa que desciende a gran velocidad se disipa en forma de trabajo de deformación (elástica y plástica) de la estructura de la pantalla dinámica. De forma general, el trabajo es el resultado de la acción de una fuerza cuyo punto de aplicación se desplaza. Un trabajo de disipación elemental es el resultado de multiplicar la fuerza por el diferencial de desplazamiento. Y el trabajo total, es el resultado de integrar la fuerza (en general variable) por el diferencial de desplazamiento para la deformación total del sistema.

En el choque de una roca con una pantalla dinámica de estructura tridimensional, muchos de los elementos de ésta sufren deformación, siendo arbitraria la evolución de las distintas fuerzas durante la deformación, por lo que el cálculo de las deformaciones finales y de la energía total disipada es muy complejo y requiere de múltiples hipótesis.

Sin embargo, no se pierde generalidad si se considera que la roca choca contra un único elemento deformable linealmente con una determinada ley de la fuerza en función de la deformación. Este modelo simplifica mucho los cálculos y permite poner de manifiesto la influencia de los principales parámetros del sistema sobre su comportamiento, así como la incidencia de los parámetros de diseño.

1.2.1 Desarrollo matemático

Suponiendo que la fuerza aplicada sobre la roca sea constante (*ver modelo de comportamiento b: característica constante*, en el apartado 1.2.3 Análisis de los diferentes tipos de comportamiento), se puede definir la energía de disipación máxima disponible como: $E_{dis0} = \xi \cdot F_M \cdot \delta_M$.

Como se ha indicado anteriormente, el trabajo de forma elemental se calcula como $dW = F \cdot d\delta$ y, en consecuencia, el trabajo total (energía disipada por la pantalla dinámica) es su integral:

$$E_{dis} = W = \int dW = \int F \cdot d\delta$$

De forma general, dado que la relación entre la fuerza y la deformación depende de los elementos del sistema, se pueda definir como $E_{dis} = \xi \cdot F_M \cdot \delta_M$, donde:

- ξ , factor de aprovechamiento, resulta de la integración y relaciona la energía disipada por el sistema (E_{dis}), respecto de la máxima energía disipable (E_{dis0}).
- F_M la fuerza máxima que se realiza sobre la roca.
- δ_M el desplazamiento máximo que realiza la roca en contacto con la estructura.

1.2.2 Modelo físico

La formulación planteada anteriormente se puede aplicar a un sencillo modelo físico del que se pueden extraer importantes conclusiones. Se considera un sistema compuesto por una masa con energía cinética que impacta sobre un conjunto compuesto por un elemento rígido (sobre el que realmente impacta la roca) y un elemento de característica mecánica equivalente a toda la pantalla dinámica (y que une el elemento rígido con un punto dado del espacio). Este modelo simplificado es, de forma esquemática, el siguiente:

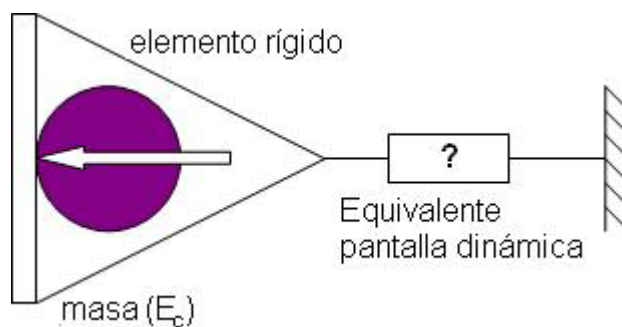


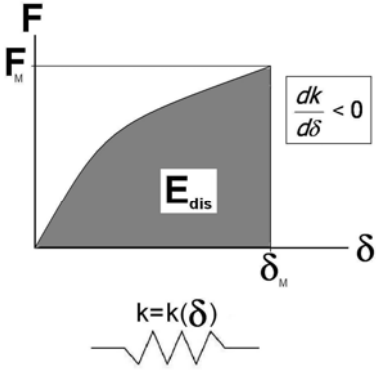
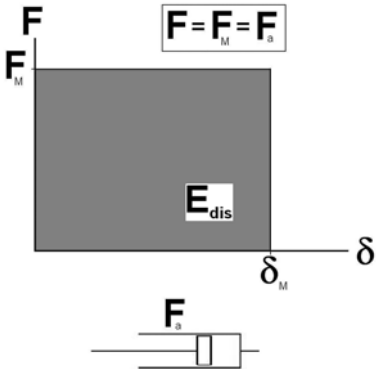
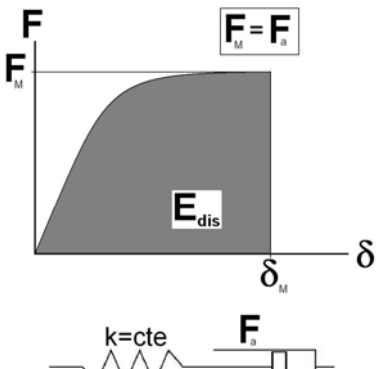
Figura 3: esquema de modelo físico simplificado

1.2.3 Análisis de los diferentes tipos de comportamiento

El modelo presentado anteriormente se puede comportar siguiendo cinco patrones fundamentales, dependiendo de las características geométricas y de material de los diferentes elementos de la pantalla.

A continuación se presentan estos cuatro comportamientos fundamentales, la característica de disipación de energía que presenta el conjunto y los componentes que pueden tener un comportamiento más similar al modelo.

a	Característica proporcional	Se trata de un comportamiento en que la fuerza mantiene una relación proporcional con el desplazamiento. Esta relación de proporción es la rigidez del sistema (k) y, en éste caso, es constante.		$\xi=0,5$
a'	Característica proporcional-progresiva	Se trata de un comportamiento en que la fuerza mantiene una relación proporcional con el desplazamiento. Esta relación de proporción es la rigidez del sistema (k) y, en éste caso, aumenta a medida que aumenta la deformación.		$\xi < 0,5$

a''	Característica proporcional-regresiva	Se trata de un comportamiento en que la fuerza mantiene una relación proporcional con el desplazamiento. Esta relación de proporción es la rigidez del sistema (k) y, en éste caso, disminuye a medida que aumenta la deformación.		0,5 < ξ < 1
b	Característica constante	Se trata de un comportamiento en que la fuerza se mantiene constante independientemente del desplazamiento que se realice sobre el sistema.		$\xi = 1$
c	Característica mixta	Se trata de un comportamiento intermedio entre los dos comportamientos ideales (a y b). El sistema real tendrá un comportamiento con esta característica, para la simplificación de los cálculos se considerará la característica real sólo para determinar el coeficiente de aprovechamiento (ξ).		0,5 < ξ < 1

Cuadro 1: características de los distintos tipos de comportamiento de una pantalla dinámica.

Dado que la energía disipada por el conjunto es el área por debajo de la curva (el área sombreada en cada caso) se observa como dada una fuerza final (F_M) y un desplazamiento (δ_M), cuanto mayor sea el coeficiente de aprovechamiento (ξ) mayor será la energía disipada. **Se observa cómo el caso más favorable es aquel en que el conjunto sufre una a fuerza. Aunque éste modelo es ideal, se considera que en las aplicaciones para pantalla dinámica se debe trabajar para lograr esta característica de comportamiento.**

1.2.4 Análisis de los diferentes tipos de deformación de material

Los materiales pueden sufrir deformaciones elásticas o elásticas y plásticas (si se supera cierto valor de esfuerzo sobre su sección). Por definición, un material sometido a deformación elástica recupera su posición inicial, mientras que uno sometido a deformación elástica y plástica recupera la fracción de deformación debida a esfuerzo elástico, pero no la debida a esfuerzo plástico. De este modo, una pantalla dinámica que sufra solamente deformaciones elásticas al recibir el impacto de una roca solamente necesitará la acción de mantenimiento de retirar la roca. En cambio, una pantalla dinámica que sufra deformaciones elásticas y plásticas al recibir el impacto de una roca perderá capacidad de disipación (la misma que haya sido disipada en forma de deformación plástica) y, en consecuencia, necesitará acciones de mantenimiento para retirar la roca y, en caso de desprendimientos severos, reponer componentes.

Por otro lado, los modelos de comportamiento descritos en el apartado 1.2.3 se pueden conseguir mediante configuraciones diversas de la pantalla dinámica, pero también se pueden lograr mediante las siguientes formas de deformación que se asimilan a los comportamientos reales siguientes:

Característica proporcional	Se trata del comportamiento que tiene, en general, una probeta de material cuando es deformada elásticamente . También es el comportamiento de un muelle elástico.
Característica proporcional-progresiva	Se trata de un comportamiento que se puede conseguir con geometrías determinadas del conjunto. Equivale también al comportamiento de un taco elastomérico sometido a un esfuerzo de compresión (con deformación elástica).
Característica proporcional-regresiva	Se trata de un comportamiento que se puede conseguir con geometrías determinadas del conjunto. Equivale también al comportamiento de un taco elastomérico sometido a un esfuerzo de tracción (con deformación elástica).
Característica constante	Se trata de un comportamiento tradicionalmente atribuido al rozamiento seco entre dos elementos. También es el comportamiento de una material fluyendo en deformación plástica .
Característica mixta	Se trata de un comportamiento intermedio entre los dos comportamientos ideales (a y b). Es el comportamiento clásico de una probeta sometida a un ensayo de tracción en que sufre, en primer lugar, una deformación elástica y, a continuación, tiende a fluir en deformación plástica. Por lo tanto, se trata de un modelo de deformación elástico-plástica .

Cuadro 2: asimilación de tipos de comportamiento a modos de deformación.

En el cuadro se observa como se puede relacionar una deformación elástica del material con una característica proporcional y una deformación elástico-plástica con una característica mixta. De todos modos, se debe destacar que la característica del material influirá en la característica de la pantalla dinámica, pero ésta es un sistema complejo cuyo comportamiento dependerá tanto de los materiales como de la geometría.

Así pues, hay que valorar el hecho de que, teóricamente, un elemento deformado elásticamente recupera su posición y, en consecuencia, no necesita mantenimiento, mientras que un elemento deformado plásticamente sí lo necesita. Aunque este hecho es importante, la decisión de escoger un material que trabaje en deformación elástica (menor disipación) o plástica (mayor deformación) no siempre vendrá dada por su capacidad de recuperación del estado inicial, si no que dependerá también de la frecuencia en la que se produzcan desprendimientos de gran energía y de la disposición de las empresas para instalar pantallas dinámicas sobredimensionadas.

1.3 Parámetros y límites del sistema

Hasta ahora se han definido:

- Dos parámetros fundamentales para la modelización de una pantalla dinámica: fuerza (F_M) y desplazamiento máximos (δ_M).
- Un parámetro auxiliar: coeficiente de aprovechamiento (ξ).

Los dos parámetros fundamentales permiten determinar la energía máxima que es capaz de disipar el sistema (E_{lim}), mientras que el coeficiente de aprovechamiento determina que porcentaje de esa energía es capaz de disipar realmente.

Los tres parámetros definidos se encuentran limitados por las siguientes razones:

- La fuerza máxima (F_M) que reciba la roca tendrá que ser soportada por la estructura. Así pues, este parámetro se encuentra limitado por la resistencia a ruptura de la estructura (materiales, geometrías...).
- El desplazamiento máximo (δ_M) que sufra la roca será equivalente a la distancia que recorre la roca desde el lugar de colocación de la roca hasta el lugar a proteger. Si el desplazamiento es demasiado elevado, la roca puede invadir la zona a proteger y no cumplir con su función de protección.
- El coeficiente de aprovechamiento depende de la efectividad de los mecanismos de deformación que se instalen en la estructura.

Las pantallas con una disipación mayor de energía que se pueden encontrar en el mercado se sitúan alrededor de 5.000 kJ. Se trata de una energía muy elevada, como se puede observar comparándola con la energía de algunos elementos en situaciones cotidianas. 5.000 kJ son:

- La **energía cinética** de un camión de tamaño mediano (12.000 kg) cuando circula a 105 km/h. O un turismo cargado (1.500 kg), circulando a una velocidad de 300 km/h.
- La **energía potencial** de una persona (70kg) situada en lo alto del Himalaya (7.300 m). O la de un turismo (1.500 kg) cayendo desde una altura de 350m.

Conocida la energía a disipar y el fenómeno mediante el que se disipa ésta, se acota el problema alrededor de algunos valores que se consideran aceptables. Suponiendo un coeficiente de aprovechamiento intermedio ($\xi=0,8$), se obtiene:

Fuerza (F_M)	1000	1200	1400	1600	[kN]
Desplazamiento (δ_M)	6,3	5,2	4,5	3,9	[m]

Cuadro 3: parejas de valores de fuerza y desplazamientos máximos.

Así, se observa que con un rango de desplazamientos aceptables (entre 3,9 y 6,3 metros) se requiere un rango de fuerzas de entre 100 y 160 toneladas, que, aunque elevadas, también son aceptables según los materiales y la tecnología actualmente disponibles.

Cabe destacar que un buen diseño de una pantalla dinámica se obtiene escogiendo una óptima relación de compromiso entre fuerza (limitada por la capacidad resistente de los elementos de la pantalla) y desplazamiento (limitado por las necesidades del espacio de instalación), siendo recomendable que el comportamiento global del sistema tienda a ser lo más cercano posible a la deformación plástica por fuerza constante, para aprovechar mejor sus características.

La relación natural entre fuerza y desplazamiento es la rigidez del sistema. Por tanto, se observa cómo una buena solución puede ser una rigidez baja y una gran deformación antes de la rotura. Esta solución hace que las fuerzas sobre los componentes sean menores, de forma que se puede reducir la resistencia de los componentes y, en consecuencia, su peso.

Para obtener datos comparativos, se considera interesante comparar el resultado obtenido con un mecanismo existente en el mercado capaz de frenar una gran masa a gran velocidad de una forma sorprendente: el cable del portaaviones. Estimando que un avión de caza pesa alrededor de 15.500 kg y suponiendo que cuando aterriza vuela a una velocidad de 250 km/h (y, teniendo en cuenta que el avión puede acelerar a 10g) la distancia que habrá recorrido para frenar con esa desaceleración constante será de 25 m. Con esta distancia y la energía que lleva antes de aterrizar (38.000 kJ) se obtiene una fuerza sobre los soportes del sistema de freno de entre 1.500 kN y 3.000 kN (entre 150 y 300 toneladas). Se observa como se trata de una fuerza ligeramente superior a la que se debe soportar en el caso de la pantalla dinámica; por otro lado se conoce el lugar en que será aplicada la fuerza y, por ello, se puede usar un dispositivo disipador más eficaz.

Para lograr esas condiciones de trabajo en los sistemas tradicionales de pantalla dinámica es necesario hacer un gran dimensionamiento de los elementos disipadores (en general de acero). Se considera que, utilizando las características de los tejidos técnicos, se pueden mejorar las condiciones de trabajo, como se muestra a continuación.

2. APLICACIÓN DE LOS TEJIDOS TÉCNICOS EN LAS PANTALLAS DINÁMICAS

Una vez sumergido al lector en el campo de las pantallas dinámicas, se detallan algunos motivos por los que se considera interesante aplicar la tecnología de los tejidos técnicos en los sistemas de protección contra desprendimientos.

2.1 Capacidad de elongación de los materiales plásticos frente a lo metales

Ésta razón es fundamental. Los materiales plásticos permiten grandes deformaciones antes de la ruptura y, además, para grandes series permiten usar procesos de fabricación muy económicos.

A continuación se muestra una comparativa entre la elongación a rotura de los principales materiales plásticos en comparación con algunos metales:

Materiales plásticos	
Material	Elongación a rotura (%)
Polietileno de baja densidad (PE-LD)	300 ÷ 1000
Polietileno de alta densidad (PE-HD)	100 ÷ 1000
Polipropileno (PP)	20 ÷ 800
Poliéster insaturado (UP)	30 ÷ 50
Poliamida (PA 6)	200 ÷ 300
Policarbonato (PC)	65 ÷ 100
Materiales metálicos	
Material	Elongación a rotura (%)
Acero de construcción (S 235)	24
Acero para máquinas (C 25)	21
Aluminio (1050)	40

Cuadro 4: comparativa de la elongación a rotura para diferentes materiales plásticos y metálicos.

Se observa como los materiales plásticos permiten una elongación a rotura mucho mayor que los materiales metálicos. Aunque los plásticos tienen una resistencia a la rotura menor, el hecho de deformarse más produce unas tensiones menores sobre la estructura, y en consecuencia permiten el uso de estructuras de menor dimensión y peso. Por ésta razón se considera interesante investigar en el desarrollo de pantallas dinámicas de materiales plásticos.

A modo de ejemplo, considerando una pantalla dinámica de una altura de cuatro metros, una energía a disipar de 5.000 kJ y comparando el desplazamiento máximo que permite a la roca una pantalla metálica (acero de construcción, 24% de elongación a rotura) con el que permite una pantalla de polipropileno (PP, 100%) y una de polietileno de alta densidad (PE-HD, 200% de elongación a rotura) se obtiene:

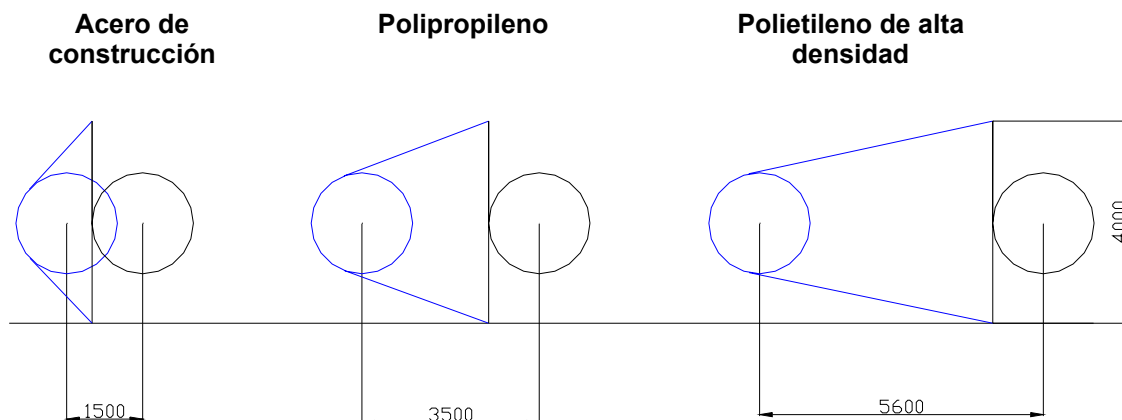


Figura 4: Representación de la posición final de una pantalla dinámica sometida a la deformación máxima del material.

A continuación se muestra una comparativa entre la fuerza que deben soportar los elementos de la estructura, el desplazamiento permitido a la roca y el material del que debe estar fabricada la pantalla dinámica para obtenerlos:

Material	Alargamiento a rotura (%)	Coefficiente de aprovechamiento	Desplazamiento de la roca (d)	Fuerza máxima (kN)
Acero de construcción	24	0,5	1,5 m	6.700
Polipropileno	100	0,95	3,5 m	1.500
Polietileno de alta densidad	200	0,95	5,6 m	940

Cuadro 5: Comparativa del desplazamiento máximo de una pantalla dinámica y la fuerza máxima que sufren sus componentes al parar una roca con una energía cinética de 5.000 kJ, entre diferentes materiales.

Se concluye que si se consigue desarrollar una pantalla con un material y una configuración que permita una deformación de 200%, se logrará acotar la fuerza máxima a la que está sometido el conjunto, dado que se permite un desplazamiento a la roca de más de 5 metros y, al tratarse de un comportamiento de deformación cercano al de rozamiento seco, se estima un coeficiente de aprovechamiento de 0,95.

Los tejidos técnicos permiten procesos de fabricación muy adecuados para la elaboración de mallas y, dado que el material de partida puede ser un material plástico de los descritos anteriormente, se puede obtener una malla de altas prestaciones con un coste admisible.

2.2 Consideraciones al peso y montaje de pantallas dinámicas

La instalación de las pantallas dinámicas es realmente compleja, pues se acostumbra a montar en lugares de difícil acceso, en que el material se sube con la ayuda de un helicóptero y los operarios deben hacer el montaje con arnés de seguridad. Así pues, conviene que el material sea lo más ligero posible y la instalación, tan sencilla como se pueda.



Figura 5: ejemplo real de pantalla dinámica de acero, en la que se observa la magnitud de los componentes.

Por la mayor resistencia por unidad de masa de los tejidos técnicos respecto a la de los metales y por la posibilidad de generar geometrías y configuraciones que permitan una mayor deformación y, en consecuencia, menor necesidad de resistencia a la rotura se considera que el uso de los tejidos técnicos puede ser un gran avance para el diseño de pantallas dinámicas de elevada disipación energética. A la vez, los procesos de fabricación y montaje de los elementos plásticos pueden llegar a ser mucho más sencillos que los que se usan actualmente con mallas de acero, reduciendo el tiempo de montaje y reduciendo los riesgos de los instaladores.

2.3 Comportamiento en caso de incendio

A menudo, cuando se produce un incendio en una zona protegida con pantallas dinámicas contra la caída de rocas, esta misma protección se convierte en un peligro por las siguiente razón:

- La pantalla se convierte en un conjunto de metal retorcido que puede complicar las tareas de extinción a los bomberos que quieran acceder por esa zona y las tareas de limpieza de bosques.

En cambio, **en el caso de utilizar tejidos técnicos, se puede aprovechar el hecho de que funden fácilmente, en muchos casos, sin dejar residuos en el suelo ni emanar gases tóxicos, para que la pantalla se autodestruya en caso de incendio, dejando libre el acceso a bomberos y cuerpos de emergencia.**

2.4 Comportamiento viscoelástico

Cómo en toda innovación, existe un punto especialmente delicado que se debe considerar en el momento de ensayar el comportamiento del conjunto para la validación del diseño de la nueva pantalla dinámica. Hay que considerar que la forma de trabajar de los componentes de una pantalla dinámica, dado que su función es la de detener un cuerpo que circula a gran velocidad (puede ser superior a 90 km/h), será casi instantánea. En algunas simulaciones se observa cómo la mayoría de impactos conllevan un proceso de deformación del sistema no superior a un segundo.

Todos los materiales, cuando trabajan bajo el efecto de una carga casi instantánea pierden propiedades resistentes, con lo que rompen bajo una tensión inferior a la de su límite de rotura (definido por métodos estáticos o casi estáticos).

Este efecto se agudiza en el caso de los materiales plásticos, en los que módulo elástico varía según la velocidad de deformación. Un material plástico parecerá más rígido si se le intenta deformar a una velocidad mayor.

Este factor debe ser tenido en cuenta en el momento de diseñar la geometría del conjunto, para que el material deforme de una forma progresiva y sufra en la menor forma posible el efecto de la fragilización del material por impacto y el comportamiento visco elástico.

3. CONCLUSIONES

A lo largo del presente artículo se llega a las siguientes conclusiones:

- Las pantallas dinámicas se diseñan para evitar la caída de rocas en zonas habitadas o sobre infraestructuras viarias y ferroviarias.
- Actualmente en el mercado el máximo valor de disipación es de 5.000 kJ y se consigue mediante estructuras y mallas de acero.
- El uso de mallas de materiales plásticos puede significar un avance debido a la gran capacidad de deformarse, que permite parar rocas con gran energía cinética generando unas fuerzas sobre la estructura muy inferiores a las generadas en pantallas de acero.
- Para una disipación aproximada de 5.000 kJ se necesita de deformaciones de la pantalla superiores a 4 metros para que las fuerzas sobre la estructura sean admisibles.
- Con el uso de tejidos técnicos y mediante la combinación de geometrías (tanto de la malla como del resto de componentes de la pantalla dinámica) y materiales se pueden conseguir deformaciones del sistema elevadas y, en consecuencia, fuerzas sobre los elementos de la pantalla relativamente reducidas. Este hecho permite reducir las dimensiones de la estructura de la pantalla dinámica.
- Las ventajas de este nuevo diseño consideran factores como la seguridad, la reducción de peso, la fabricación y el montaje de la pantalla dinámica.
- Las principales limitaciones pendientes de comprobar son el comportamiento frágil de los plásticos a mayor velocidad de deformación.

REFERENCIAS

[1] *Protección contra desprendimientos de rocas*, del Ministerio de Fomento.

[2] *Guideline for the approval rockfall protection kits*, de la Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape.

[3] *Disseny de màquines IV, Selecció de materials 1*, Carles Riba Romera, Edicions UPC.

[4] *Disseny de màquines IV, Selecció de materials 2*, Carles Riba Romera, Edicions UPC.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] SWISS AGENCY FOR THE ENVIRONMENT, FORESTS AND LANDSCAPE (SAEFL) AND SWISS FEDERAL RESEARCH INSTITUTE (WSL), *Guideline for the approval of rockfall protection kits*. Berna: 2001.

[http://www.geobrugg.com/content/Portals/35/media/Steinschlag/approvalRock%20_e.pdf, 21 de juny de 2005] .

- [2] GEOBRUGG, FATZER AG, *Vídeo precaución caída de rocas*. Berna, 2002.

[http://www.geobrugg.com/content/Portals/35/Filme/Steinschlag_kurz1.rm, 4 de setembre de 2006] .

- [3] GEOBRUGG, FATZER AG, *Sistema de barrera de alta energía para 3.000kJ*.

[<http://www.geobrugg.com/content/Español/Inicio/SteinschlagBarrierenS/Energíade3000kJ/tabid/2195/Default.aspx>, 9 d'octubre de 2006] .

- [4] PRAT B., A.; TORT-MARTORELL LL., X; GRIMA C., P.; POZUETA F., L. *Métodos estadísticos. Control y mejora de la calidad*. Barcelona: Politecnos, Edicions UPC. 1997. p.25-41.

