



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Anàlisi simplificat de la mecànica d'impacte de blocs i de la seva influència en la fragmentació.

Treball realitzat per:

David Rua Emilio

Dirigit per:

Jose Moya Sánchez

Grau en:

Enginyeria Geològica

Barcelona, 30 de setembre de 2019

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

A tota la meva família, per el suport donat al llarg del treball, especialment a tu, Mare.

A la Mònica, companya al llarg de tota aquesta travessia que ha sigut la carrera, i de per vida.

A tots els meus amics, que han aconseguit que continuï endavant en els moments difícils.

A la Nieves, per l'ajuda i la paciència mostrada durant la realització d'aquest treball.

I finalment, al meu tutor Jose, per la seva guia, el seu suport, per entendre'm i per la seva gran ajuda, gràcies.

RESUM

Els despreniments rocosos són un gran problema per les infraestructures, els béns i la pròpia vida de les persones. Aquest fenomen ha sigut estudiat en gran mesura, però les seves particularitats el fan ser una de les inestabilitats de masses més difícils de preveure. S'ha arribat a crear diversitat de models per trobar les trajectòries i l'abast d'un despreniment, però no és habitual que en aquests models es tingui present la fragmentació que molt sovint pateixen els blocs despresos a l'impactar amb el terreny.

En el marc del projecte de recerca RockModels, s'ha dut a terme un assaig de llançament de maons al laboratori per analitzar el procés de fragmentació. D'aquest assaig es coneixien totes les propietats dels maons, el grau de fragmentació i es van enregistrar vídeos a alta velocitat dels impactes.

En aquest treball, en primer lloc, s'ha fet un anàlisi qualitatiu dels vídeos enregistrats, on s'ha pogut observar les morfologies d'impacte (de cara, de vèrtex o d'aresta). En segon lloc, s'ha fet un anàlisi quantitatiu dels impactes per determinar l'energia cinètica, l'àrea d'impacte, la força normal i la pressió generades de cada impacte amb models analítics basats en condicions elàstiques. Finalment, s'ha comparat la força d'impacte amb el grau de fragmentació i s'ha analitzat la influència de la morfologia d'impacte a la fragmentació.

Els resultats obtinguts de l'anàlisi dels vídeos ens mostren la importància que té la morfologia de l'impacte en la fragmentació. S'observa com els llançaments on l'impacte es produeix amb una aresta del maó, acostumen a fragmentar en el primer impacte, en canvi aquells maons on l'impacte es produeix amb el vèrtex, acostumen a no patir fragmentació en primera instància.

Els resultats obtinguts del càlcul numèric mostren que als impactes amb una àrea d'impacte major, la força normal generada també és major. A contrapartida, quan l'àrea d'impacte era més petita, la pressió i la indentació eren més grans.

De la influència en la fragmentació, els resultats mostren que aquesta es donarà amb més freqüència com més gran sigui l'angle d'impacte del centre de masses. En quant a la relació entre les forces i les pressions generades amb la fragmentació, no s'ha obtingut els resultats esperats, doncs no s'ha pogut analitzar de forma complerta els segons impactes, tal com s'ha fet amb els primers, considerant totes les variables que intervenen i varien respecte el primer impacte.

ABSTRACT

Rockfalls are an unpredictable hazard with the ability of causing several damages to people's infrastructures, goods and lives. This phenomenon has been truly studied, but its particularities make it one of the most difficult rock instabilities to foresee. A great variety of models, has been created to find the trajectories and the scope for a rockfall, but it is not usual for fragmentation to be present in these models.

Within the framework of the RockModels research project, a brick launch test has been carried out in the laboratory to analyse the fragmentation process. About the test, all the properties of the bricks and the degree of fragmentation were known, and a high speed videos of the impacts were recorded.

In this project, firstly, a qualitative analysis of the recorded videos has been done, where it has been possible to observe the impact morphologies (face, vertex or edge). Secondly, it has been done a quantitative analysis of the impacts to determine the kinetic energy, the area of impact, the normal force and the pressure generated from each impact with analytical models based on elastic conditions. Finally, the impact force has been compared with the degree of fragmentation and it has been analysed the influence of the impact morphology to the fragmentation process.

The results obtained from the video analysis evidence the importance that impact morphology has on fragmentation. It is observed that, in trials where the impact occurs with an edge of the brick, usually fragmentation occurs in the first impact, but those bricks where the impact occurs with the vertex, usually do not suffer fragmentation in the first instance.

The results obtained from the numerical calculation show that in impacts with a greater impact area, the normal force generated is also greater. On the other hand, when the impact area was smaller, the pressure and indentation were greater.

About the influence on fragmentation, the results show that fragmentation will occur more frequently when the centre of mass impact angle is bigger. Regarding the correlation between the forces and the pressures generated with the fragmentation, an expected results have not been obtained, due to it has not been possible to analyse completely second impacts, as it has been done with first ones, considering all the variables that intervene and vary regarding the first impact.

Índex

1. Introducció	8
1.1 Plantejament	8
1.2 Objectius.....	9
2. Antecedents.....	10
2.1 Definició de conceptes clau.....	10
2.2 Descripció de la mecànica d'impacte entre dos sòlids.....	11
2.3. La fragmentació en un despreniment rocós	12
2.3.1. Què és?	12
2.3.2. Estudi de la fragmentació	13
3. Assaig de llançament	14
3.1. Descripció de l'assaig de llançament.....	14
4. Metodologia.....	17
4.1. Model seguit.....	17
4.2. Model d'elasticitat per a les diferents morfologies d'impacte	18
4.2.1. Impacte puntual.....	19
4.2.2. Impacte lineal	21
4.3. Càlcul de les variables d'entrada	24
4.3.1. Paràmetres elàstics	24
4.3.2. Pes específic.....	24
4.3.3. Radi de l'esfera d'impacte	25
4.3.4. Àrea d'impacte.....	25
4.3.5. Morfologia de l'impacte	26
4.3.6. Velocitat d'aproximació	26
4.3.7. Angle d'aproximació.....	27

4.3.8. Longitud de l'aresta	27
4.3.9. Volum del maó.....	27
4.3.10. Grau de fragmentació	27
4.3.11. Angle d'impacte del centre de masses	29
5. Resultats	31
5.1 Anàlisi qualitatiu dels vídeos	31
5.2 Anàlisi qualitatiu dels impactes	32
Variables de sortida.....	33
5.3 Anàlisi qualitatiu de la fragmentació.....	35
6. Anàlisi i discussió de resultats	36
6.1 Anàlisi qualitatiu dels vídeos	36
6.2 Anàlisi qualitatiu dels impactes	36
6.3 Anàlisi qualitatiu de la fragmentació.....	39
7. Conclusions.....	43
8. Perspectives futures.....	45
9. Agraïments.....	46
10. Referències.....	46

1. Introducció

1.1 Plantejament

La inestabilitat de les masses rocoses és un perill que ens ha afectat al llarg de la història i que suposa una gran amenaça per a la vida. Una d'elles, i en la qual es basarà aquest treball són els desprendiments rocosos (figura 1).

Els desprendiments són moviments de gran velocitat en els que una massa de roca es desprèn d'una vessant abrupte o un penya-segat i es desplaça rebotant, rodolant i lliscant al llarg d'aquesta fins que arriben a descansar a una zona de terra a la base o a prop (Varnes, 1978).



Figura 1: desprendiment rocós sobre una carretera després d'unes gelades a Benuza (Lleó). Font: Cadena Ser

Tal com s'ha esmentat, els desprendiments suposen un gran risc donat que és difícil preveure la seva ocurrència en el temps. La inestabilitat s'inicia amb unes primeres deformacions molt lentes, que acaben accelerant-se i desenvolupant una ruptura fràgil i brusca.

Existeixen nombroses estratègies per a la reducció d'aquest risc, basats principalment en el coneixement del moviment dels blocs, l'energia cinètica, la composició, la velocitat i la massa. Aquest factors s'analitzen mitjançant elements finits per fer simulacions de les trajectòries dels blocs. (Sarro et al. 2017)

Una de les hipòtesis que més s'acostumen a considerar és la de considerar els blocs com a una única massa que no es trenca (Chen, Telesca, Lee, & Sun, 2011). No obstant, la fragmentació en les caigudes de blocs és un procés altament observat, però poc estudiat (Evans & Hungr, 1993). La no consideració d'aquest procés en els estudis de perillositat fa que s'obtinguin resultats sobredimensionats, doncs al col·lisionar el bloc amb el substrat s'incrementen el número de fragments i l'energia cinètica de cadascun d'ells disminueix (Corominas, Matas, & Ruiz-Carulla, 2019).

L'energia que es dissipa a causa de la col·lisió bloc-substrat varia en cada cas i depèn de molts factors diferents. Això fa que realitzar un model exacte on es coneguin aquest valors sigui tant complicat.

Els exemples d'assaigs de llançament de blocs rocosos fets per analitzar la seva fragmentació son molt escassos (Giacomini et al, 2009; Gili et al., 2016). Els resultats obtinguts a aquests assaigs mostren que no hi ha cap llindar de l'energia cinètica inicial per a la fragmentació. Emprant les dades d'un dels assaigs descrits a Gili et al. (2016), Lekuona (2018) va calcular la força normal dels impactes emprant models analítics elàstics. Les equacions de la força normal recullen tots els factors que intervenen als impactes i, conseqüentment, permeten descriure millor el procés de col·lisió i analitzar la relació amb la fragmentació. Tots els assaigs esmentats s'han fet a pedreres i amb blocs amb morfologies irregulars i, als descrits a Gili et al. (2016) amb angles d'incidència oblics. Tot i la dispersió dels resultats, Lekuona (2018) va suggerir la existència de un llindar de força normal.

Amb l'objectiu d'obtenir dades sobre la fragmentació amb condicions més controlades, dins el marc del projecte de recerca RockModels (<https://rockmodels.upc.edu/es>) es va dur a terme un altre assaig de llançament a laboratori, que es descriu amb detall a l'apartat 3. Les característiques principals d'aquest assaig van ser l'ús de maons (forma regular), caiguda lliure des de una alçada constant i superfície de impacte horitzontal (és a dir, angle d'incidència constant i de 90°).

1.2 Objectius

Els objectius principals d'aquest treball són, per un costat, calcular la força d'impacte tenint en compte la geometria d'aquest; i per l'altre, comparar la força resultant amb el grau de fragmentació. Per assolir aquest objectius s'han seguit els següents passos:

- Síntesi de la mecànica d'impacte dels sòlids rígids i dels principals models analítics existents.
- Determinació de les condicions geomètriques i cinemàtiques dels impactes assajats al laboratori, a partir de l'anàlisi dels vídeos d'alta velocitat realitzats sobre els llançaments. L'objectiu és determinar l'angle d'aproximació, la velocitat d'aproximació, la morfologia dels impactes i la seva àrea d'impacte.
- Càlcul de les components normal de la força i la pressió de l'impacte utilitzant els diferents models analítics disponibles.

- Comparació de la força i la pressió normals de l'impacte amb el grau de fragmentació.

2. Antecedents

En aquest apartat s'ha recollit el conjunt d'explicacions i definicions que han sigut necessàries per la realització d'aquest treball.

2.1 Definició de conceptes clau

Indentació: és l'escurçament conjunt de dos cossos que impacten, mesurat en la superfície i en el centre del cercle de contacte. És a dir, en la figura 2, la indentació correspondria a la distància "d".

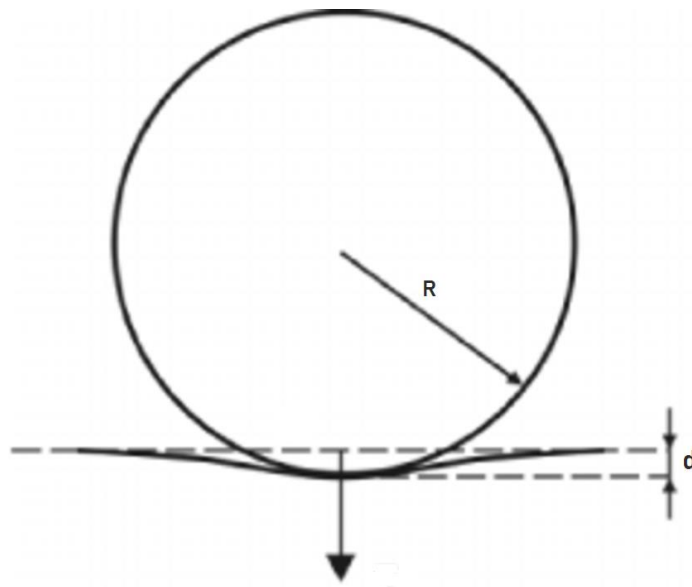


Figura 2: Esquema de la indentació produïda per la col·lisió de dos cossos

Efecte martell: quan es produeix un impacte i la força d'impacte no es troba alineada amb el centre de masses, es genera un moment de rotació durant l'impacte, i com a conseqüència, part de l'energia cinètica de translació del bloc es transforma en energia de rotació. Aquest moment de rotació després d'un primer impacte és l'efecte martell.

2.2 Descripció de la mecànica d'impacte entre dos sòlids

El xoc sobtat de dos cossos en col·lisió és un fenomen complicat. La característica principal és la breu duració i les grans magnituds de les forces generades.

Qualsevol contacte amb historial de deformació consta de dues parts: el període de compressió i el període de restitució (Wang & Mason, 1992). El període de compressió comença amb un instant inicial anomenat incidència, on els dos cossos s'aproximen a certa velocitat. Després de la incidència hi hauria la fase d'interferència o interpenetració dels cossos, causada per la pressió de la interfície que sorgeix en una petita àrea de contacte entre els dos cossos. A cada instant, durant el contacte, la pressió en l'àrea de contacte resulta en petites deformacions locals i en la consegüent indentació (Stronge, 2017) Aquesta indentació iguala el valor de la interpenetració que existiria si els cossos no es deformessin, es a dir, si el xoc fos completament elàstic. (Popov, 2010)

A cada instant durant l'impacte, la interfície o la pressió de contacte tenen una força d'acció o reacció resultant que actua en direccions oposades sobre els dos cossos col·lisionants i resisteix, doncs, a la interpenetració. Inicialment la força augmenta a mesura que augmenta la indentació i redueix la velocitat amb què els cossos s'acosten els uns als altres. En algun moment durant l'impacte, la feina de la força de contacte és suficient per fer que la velocitat d'aproximació dels dos cossos estigui a zero, seria llavors quan comença el període de restitució. L'energia emmagatzemada durant la compressió separa els dos cossos fins que finalment es separen amb certa velocitat relativa.

Les deformacions locals que sorgeixen durant l'impacte varien d'acord amb la velocitat relativa de l'impacte al punt de contacte inicial, així com la duresa dels cossos de col·lisió. Les col·lisions de baixa velocitat produeixen pressions de contacte que només causen petites deformacions; aquestes són significatives només en una petita regió contigua a la zona de contacte. A velocitats més elevades, hi ha grans deformacions (és a dir, soques) prop de la zona de contacte, que resulten de deformacions plàstiques; aquestes grans deformacions localitzades són de fàcil reconeixement, ja que presenten manifestacions grosses com ara cràters o penetracions. En qualsevol cas, les deformacions són consistents amb la força de contacte, que provoca canvis de velocitat en els cossos que xoquen. (Stronge, 2017)

2.3. La fragmentació en un despreniment rocós

2.3.1. Què és?

La fragmentació és un procés freqüentment observat en els despreniments i es defineix com la separació de la massa inicial de roca en trossos més petits al impactar contra el terreny (Evans & Hungr, 1993). S'inclou en aquesta separació la disgregació dels blocs delimitats per discontinuïtats preexistents en la massa original, així com també la generació de nous fragments deguts al trencament de la roca matriu (Corominas, Mavrouli, & Ruiz-Carulla, 2017).

Les dues principals conseqüències de la fragmentació són la generació de múltiples fragments i la divergència de les trajectòries (figura 3) d'aquests fragments en el punt d'impacte. (Matas, G., Lantada, N., Corominas, J., Gili, J.A., 2017).

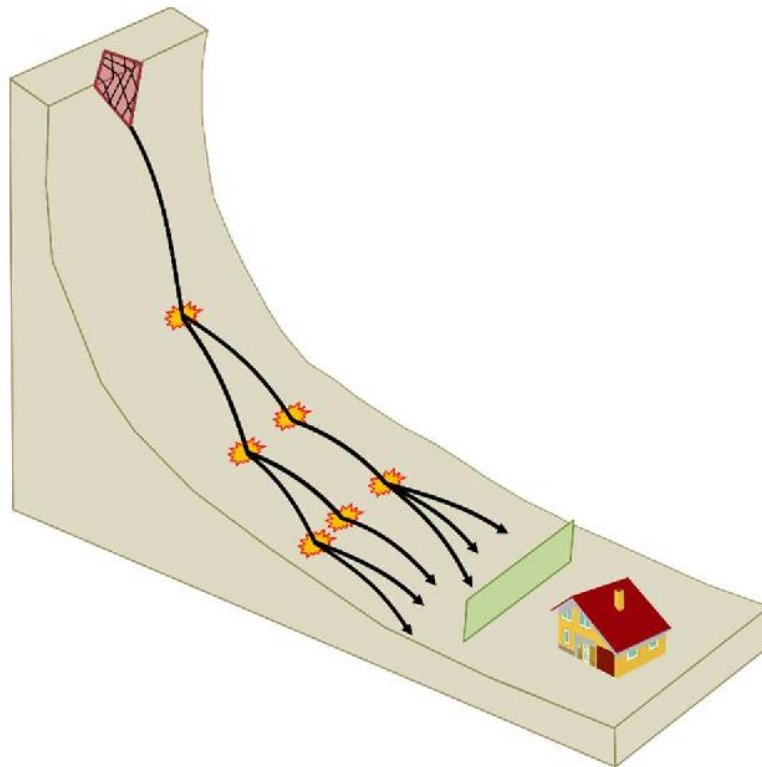


Figura 3: Esquema de la fragmentació i la diversificació de les trajectòries durant un despreniment. Font: (Matas & Lantada, 2017)

2.3.2. Estudi de la fragmentació

Considerar que els blocs es puguin trencar durant la seva propagació sembla una hipòtesi lògica a l'hora de crear models, però la majoria d'aquests no la tenen molt present, principalment per la complicació que genera intentar predir el seu abast (Chen et al., 2011). Aquests anàlisis que es fan menyspreant la fragmentació tendeixen a sobreestimar tant l'energia cinètica com l'abast. D'altra banda, la probabilitat d'impacte sobre els elements exposats es subestima, ja que durant el despreniment els blocs s'esmicolen i produeixen múltiples trajectòries (Corominas, J., Mavrouli, O., Santana, D., Moya, J., 2012).

Aquesta probabilitat d'impacte sovint es defineix com el percentatge de blocs d'un cert volum que arriba o creuen un cert punt, a partir de moltes simulacions (Jaboyedoff et al., 2012). No obstant, s'observa que un sol bloc pot generar una distribució de fragments, en termes de volums i en termes de distribució espacial, molt majors que d'altres en la realitat (Ruiz-carulla, 2018). Aquest fenomen d'esmicolament i distribució es coneix com "efecte projectil" (Vijayakumar, Yacoub, & Curran, 2011).

Un dels factors que poden influir en "l'efecte projectil" és l'energia cinètica de rotació. Durant els despreniments rocosos els blocs experimenten un traspàs d'energia cinètica de translació a energia cinètica de rotació i en aquest traspàs d'energia es pot produir la fragmentació i, en conseqüència, els fragments podrien adquirir una velocitat molt alta i traspasar les estructures de contenció o impactar sobre elles.

Altres anàlisis de riscos de caiguda de roques s'han centrat en simuladors de trajectòria. Molts autors han fet un gran esforç per desenvolupar simuladors de trajectòria i metodologies per caracteritzar el perill de caiguda de roques: utilitzant models numèrics 3D d'alta resolució (Crosta & Agliardi, 2003); simuladors de trajectòria amb un model d'impacte estocàstic (Bourrier & Eckert, 2009); revisant la mecànica de caiguda de roques (Dorren, 2003); o caracteritzant les zones de perill basades en l'energia cinètica (Jaboyedoff et al., 2012).

Totes aquestes metodologies que s'han provat, sovint donen resultats que força disten de la realitat. El que sí que s'ha pogut trobar però, ha sigut que els paràmetres de la caiguda afecten molt en la fragmentació. Es coneix que, com més gran són l'angle d'aproximació del bloc, l'energia cinètica del bloc i la tipologia de l'impacte, més gran és la força d'impacte. S'ha vist també que, com més gran és aquesta, més probabilitats hi ha que els blocs fragmentin (Corominas et al., 2017).

3. Assaig de llançament

3.1. Descripció de l'assaig de llançament

L'assaig va tenir lloc durant els dies 12, 13 i 14 de Desembre de 2018 al Laboratori de Tecnologia d'Estructures del Departament de Enginyeria Civil i Ambiental de La universitat Politècnica de Catalunya. Va ser un assaig on es van realitzar diferents tipus de llançaments: 5 tipologies de maons diferents, llançaments d'un, de tres i de cinc maons units amb resina epoxy i amb un dispositiu de llançament en un inici, i llançats directament amb la mà a partir de la meitat de l'assaig. L'objectiu dels llançaments amb múltiples maons era introduir l'efecte de juntes a la massa despresada i el seu efecte a la fragmentació, dins del marc de la recerca del projecte RockModels.

Com s'ha esmentat abans, l'objectiu del present treball és calcular la força d'impacte amb les condicions més senzilles possibles. Conseqüentment, només s'han emprat les dades d'un sol maó.

3.2 Material assajat

Els materials que es van utilitzar per dur a terme l'assaig van ser maons de tres materials diferents (taula 1). Es tracta de maons corrents, sol·licitats a una empresa del sector de la construcció. Les seves mesures són de 5 x 10 x 20 cm i les seves propietats mecàniques es van obtenir a partir d'assaigs de compressió simple i assaigs de tracció (brasiler) a càrrec del laboratori GEOMAR Enginyeria del Terreny, SLP.

Taula 1. Propietats de les tres varietats de maons assajats

Propietats	Vermell	Salmó	Sahara
Densitat seca (g/ cm ³)	2.12	2.09	1.8
Resistència a tracció (MPa)	13.88	2.18	12.75
Resistència a compressió (MPa)	32.66	60.9	21.97

Es van realitzar un total de 25 llançaments, dels quals 15 van ser de maons de la varietat Vermell, 6 van ser maons de la varietat Salmó i 4 van ser maons de la varietat Sahara.

3.3 Realització de l'assaig

El llançament dels maons es va fer des d'una altura de 4.26 m, que és on es va situar el dispositiu de llançament, respecte el punt d'impacte. Aquest dispositiu es va pensar per tal que els blocs caiguessin amb la mínima rotació possible.

La logística d'aquest es basava en subjectar primerament els blocs amb uns passadors horitzontals i després amb uns tiradors que traccionaven els blocs contra un taulell vertical. De tal manera que, al retirar els passadors, els blocs es subjectaven per la força que exercien els tiradors. Seguidament, es disminuïa bruscament la força d'aquestes gomes i els maons queien verticalment (figura 4).

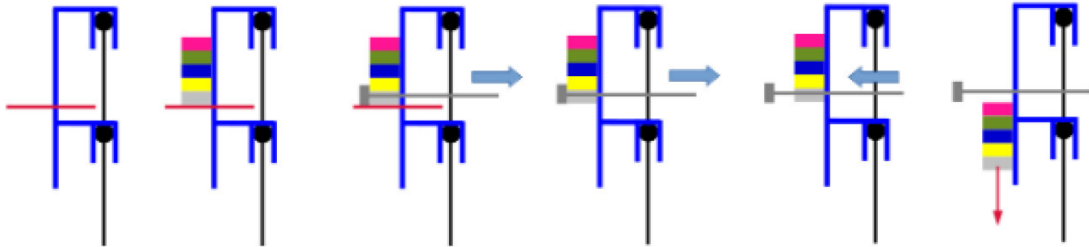


Figura 4: Esquema del dispositiu de llançament. Font: (Matas et al., 2018)

Al caure, els maons impactaven contra una planxa d'acer que actuava com a substrat. Aquesta tenia unes dimensions de 1x1 m i un gruix de 10 mm. La planxa es va llisar prèviament a l'assaig per tal que les possibles rugositats no afectessin l'obtenció de dades.

Sobre aquesta planxa de metall es van situar dues làmines mida DIN A2 per obtenir els punts d'impacte i les seves àrees. Aquestes làmines consistien en un paper de calcar de color groc i un paper amb dianes separades per 10 cm (figura 5). Quan el maó impactava sobre la làmina amb dianes, en aquesta es quedaven les marques de l'impacte i s'impregnava el seu voltant de color groc a causa de la làmina de calc. Després de cada impacte es restituïen les làmines amb unes de noves per a cada llançament.

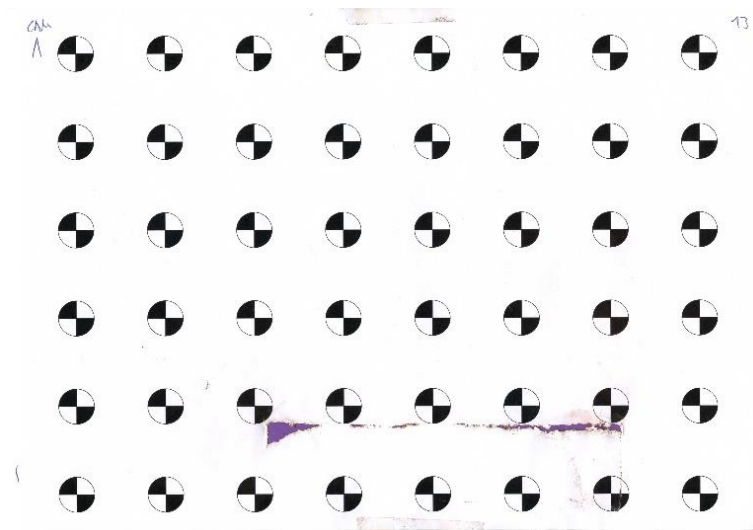


Figura 5. Escanejat d'una làmina de dianes utilitzada durant l'assaig de llançament

També es va fer un seguiment fotogràfic i videogràfic dels impactes, per utilitzar-los en posteriors anàlisis (figura 6). Es van utilitzar dues càmeres, una GoPro Hero 4 que va servir per la documentació de l'assaig; i una Sony NEX-FS700R per a la gravació d'alta velocitat dels impactes.

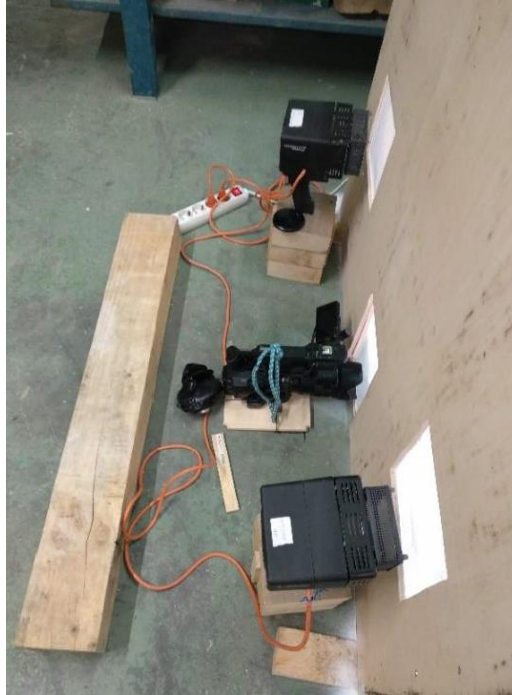


Figura 6. Càmeres frontals utilitzades durant l'assaig. Font: (Parras, 2019)

4. Metodologia

4.1. Model seguit

Com s'ha comentat anteriorment, s'ha seguit un model d'impacte completament elàstic, això vol dir que, tota l'energia cinètica inicial normal a l'impacte es transformada en energia de deformació elàstica al final de la fase de compressió, i es recuperada totalment a la fase de restitució.

Si bé és cert que en un impacte hi ha pèrdua d'energia degut a deformació plàstica, rotació del bloc, fricció amb el substrat, entre d'altres; l'interès de que es transformi tota l'energia en deformació elàstica, escau en conèixer quin és el rang màxim dels valors de la força normal i la pressió normal que actuen sobre el maó durant l'impacte. Tota la formulació utilitzada es pot trobar en l'apartat 4.2. d'aquest treball.

Per realitzar aquest model s'ha utilitzat el programa Matlab. Aquest és un programa de càlcul numèric basat en un llenguatge de programació propi (llenguatge M).

Dins de Matlab s'ha programat les diferents funcions dependent del tipus de contacte (puntual o lineal) i s'ha creat un script per calcular les forces, pressions i àrees de l'impacte.

Per poder realitzar els càlculs, es necessari introduir les dades del nostre problema (variables d'entrada, figura 7) i a partir d'aquestes, el programa ens aporta els resultats (variables de sortida, figura 8).

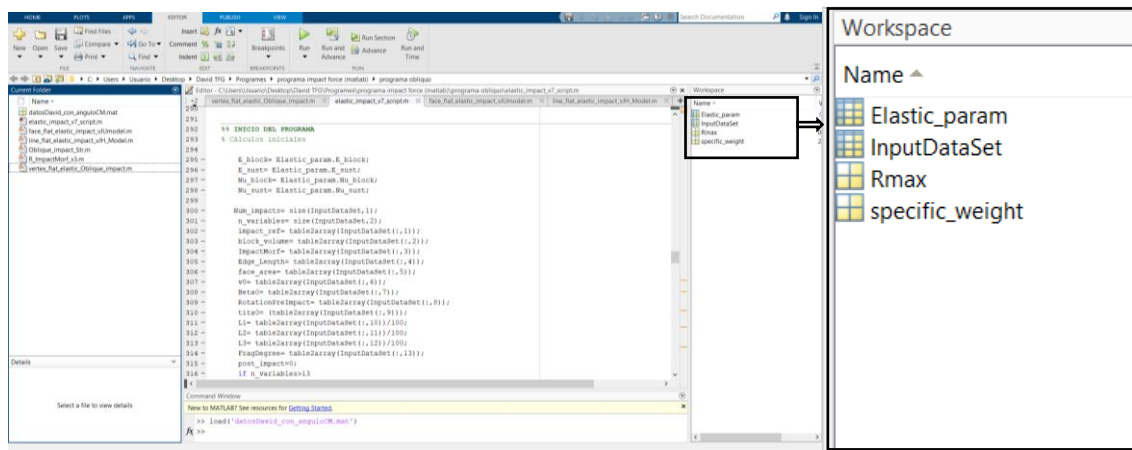


Figura 7. Variables d'entrada en el workspace de Matlab

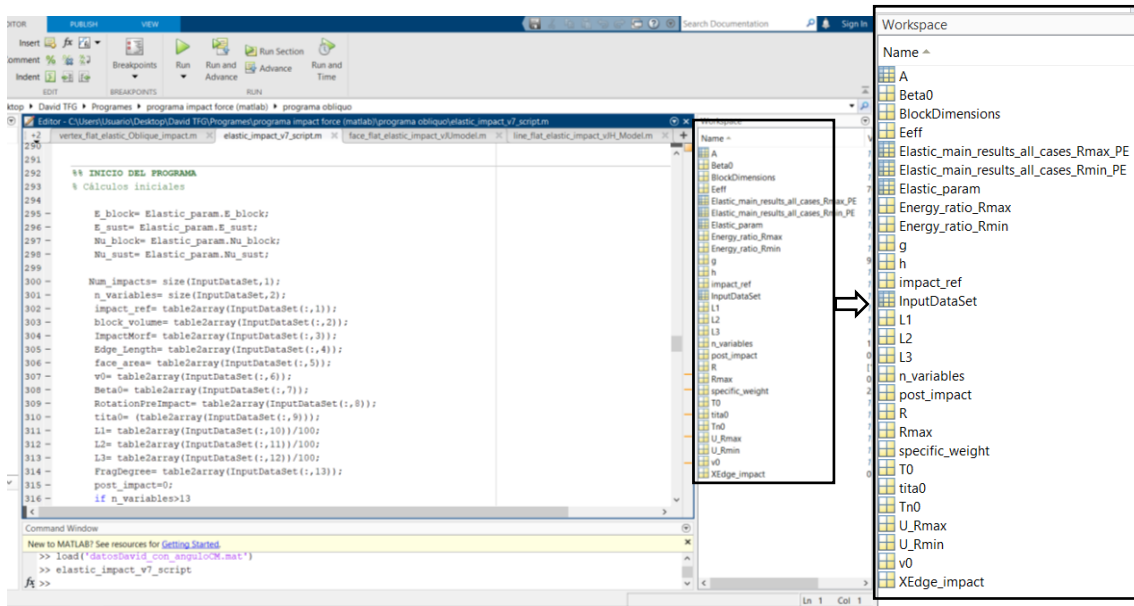


Figura 8. Variables de sortida en el workspace de Matlab

4.2. Model d'elasticitat per a les diferents morfologies d'impacte

En el nostre cas s'ha tingut diferents contactes entre les totxanes i el substrat. S'ha tingut present doncs, les diferents morfologies d'impacte i s'ha utilitzat les següents hipòtesis per simplificar el càlcul:

1. En el cas de l'impacte puntual s'ha suposat que el vèrtex del maó té una forma semi-esfèrica, amb un radi de curvatura R , que correspon al radi de la semi-esfera.
2. En l'impacte aresta-pla, o impacte lineal, s'ha suposat que l'aresta té una forma semi-cilíndrica, amb un radi de curvatura R .

Tant la hipòtesi 1 com 2 són raonables, doncs a escala de detall (mil·limètrica-centimètrica), els vèrtex i les arestes no acostumen a ser completament angulars, sinó que habitualment es troben arrodonits.

3. En tots els casos anteriors, el pla del substrat es suposa infinit i perfectament regular a escala de l'impacte. Considerant que l'àrea d'impacte és d'unes dimensions molt més ínfimes que el pla del substrat, la hipòtesi 3 es pot considerar també com a vàlida.

En els contactes puntuals i en els lineals hi ha un paràmetre geomètric que és difícil de determinar i que influeix significativament en els resultats. Es tracta dels radis de la semi-esfera i del cilindre. Per tenir present aquest factor, s'han realitzat els càlculs amb un rang de valors del radi d'entre 1 mm i 5 mm.

Per a cadascun dels impactes es detalla la formulació seguida en els pròxims apartats.

4.2.1. Impacte puntual

En aquest cas, es considera l'impacte entre una semi-esfera rígida i un pla. Per realitzar els càlculs s'ha seguit la llei constitutiva per contactes esfèrics elaborada per Hertz al 1882. La força normal generada (MN) per l'impacte es defineix com:

$$F_n = \frac{4}{3} * E_{eff} * \sqrt{R} * \delta^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

On:

E_{eff} : mòdul elàstic efectiu (GPa)

$$\frac{1}{E_{eff}} = \frac{(1 - \nu_{bloc})^2}{E_{bloc}} + \frac{(1 - \nu_{substrat})^2}{E_{substrat}} \quad (2)$$

Si $E_{bloc} = E_{substrat} = E$ i $\nu_{bloc} = \nu_{substrat} = \nu$ llavors:

$$E_{eff} = \frac{2(1 - \nu^2)}{E} \quad (3)$$

R : és el radi de curvatura equivalent del contacte (m):

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{bloc}} + \frac{1}{R_{substrat}} \quad (4)$$

Si el substrat és pla, com en aquest cas: $R_{substrat} = \infty \rightarrow R = R_{bloc}$

δ : és la indentació (mm). Al ser variable durant la fase de compressió, en aquest cas s'ha realitzat el càlcul amb la indentació màxima:

$$\delta_{max} = \left(\frac{5}{2} \times \frac{Tn_0}{Cn} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (5)$$

On:

Tn_0 : és l'energia cinètica translacional inicial (kJ). Es defineix com:

$$Tn_0 = \frac{1}{2} \times m \times (\sin \beta_0 \times V_{approx})^2 \quad (6)$$

On:

β_0 : l'angle d'aproximació (°)

V_{approx} : velocitat d'aproximació (m/s)

Cn : coeficient de l'equació constitutiva, útil per parametritzar el càlcul.

$$Cn = \frac{4}{3} \times E_{eff} \times \sqrt{R_{vertex}} \quad (7)$$

Una vegada conegut la força normal màxima, es busca el valor de l'àrea màxima (A_{max} , mm²), a partir del radi màxim de l'esfera o del cilindre. Aquesta ens serà útil per poder calcular la pressió mitja i màxima (MPa) en el centre de l'àrea d'impacte:

$$R_{max} = \sqrt{R_{vertex} \times \delta_{max}} \quad (8)$$

$$A_{max} = \pi \times R_{max} \quad (9)$$

$$P_{mitja} = \frac{F_{n_{max}}}{A_{max}} \quad (10)$$

$$P_{max} = \frac{3}{2\pi \times R_{vertex}} \times \left(\frac{5}{2} \times Cn^4 \times Tn_0 \right)^{\frac{1}{5}} \quad (11)$$

4.2.2. Impacte lineal

En l'impacte lineal hi ha diversos aspectes significativament més complexes que en el cas de l'impacte puntual. Per un costat, la simetria del contacte és menor que en el cas puntual, és a dir, no és axisimètric. Aquest fet implica una anisotropia geomètrica, que es veu accentuada per la longitud finita de l'aresta de contacte i que es tradueix en l'existència d'un gradient d'esforç al llarg de l'aresta. Per altra banda, els extrems de l'aresta es troben delimitats típicament per un canvi bruscat en el gradient "topogràfic" de la superfície del bloc, on l'aresta passa a un altre element (un altre aresta, cara o vèrtex). Aquesta discontinuïtat resulta en una singularitat del esforç elàstic en els extrems de l'aresta, on seria infinit segons la teoria d'elasticitat lineal.

Per resoldre aquest problema s'ha optat per la hipòtesi 2, explicada en l'apartat anterior i que pren a l'aresta del maó com a un semi-cilindre.

Existeixen diversos models constitutius de contacte. Tots ells, parteixen de la formació d'una banda de contacte amb una longitud L (la del cilindre) i una amplada $(2a)$ en la que la distribució de pressions és hertziana. Prenent els eixos de coordenades X e Y en el pla tangent comú, l'eix X en la direcció perpendicular a l'aresta i l'eix Y en la direcció paral·lela, i l'origen de coordenades en el centre de la zona rectangular del contacte, la distribució de pressions és (Johnson, 1985, pag. 101, eq. 4.44):

$$P(x,y) = P_0 \times \left(1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{per a tot "y"} \quad (12)$$

On:

P_0 : és la pressió màxima (MPa), que es registra a l'origen de coordenades (Johnson, 1985, pag. 101, eq. 4.45):

$$P_0 = 2 \times \frac{F_n}{\pi \times a \times L} \quad (13)$$

Integrant $P(x,y)$ per a tota l'àrea de contacte s'obté la força normal total (MN) (Johnson, 1985, pag. 101, eq. 4.43)

$$F_n = \frac{\pi}{4} \times \frac{L}{R} \times E_{eff} \times a^2 \quad (14)$$

Que expressada en termes de "a":

$$a^2 = \frac{4 \times R}{\pi \times L \times E_{eff}} \times F_n \quad (15)$$

On:

E_{eff} : mòdul elàstic efectiu (GPa)

R : radi equivalent del cilindre (m)

La part difícil és obtenir la relació entre la semi-amplada “a” i la indentació. Cada model implica una relació diferent, en funció de les hipòtesis simplificadores. En els dos models més senzills, la força normal és directament proporcional a la indentació.

S'utilitzarà el model de Johnson-Hamrock, que és el més contrastat experimentalment. És l'únic model de deformació elàstica de cilindres que es menciona a (Ghaednia et al., 2017). És també el model utilitzat per (Green, 2005) per definir les condicions inicials de plastificació del contacte esfèric i del contacte cilíndric. El model utilitza la següent relació entre “a” i δ (mm) (Johnson, 1985, pag. 131, eq. 5.56):

$$\delta = \frac{F_n}{\pi \times E_{eff} \times L} \times \left(\ln \frac{4 \times R}{a} - 1 \right) \quad (16)$$

Tal com s'ha anomenat abans, la semi-amplada de la zona de contacte regular “a” varia amb F_n segons l'equació (14). Llavors substituint a (16) s'obté l'equació constitutiva:

$$\delta = \frac{F_n}{\pi \times E_{eff} \times L} \times \left(\ln \frac{4 \times \pi \times R \times E_{eff} \times L}{F_n} - 1 \right) \quad (17)$$

L'equació anterior es pot parametritzar d'una forma més pràctica per al càlcul:

$$\delta = Psi1 \times (Psi2 - \log F_n) \times F_n \quad (18)$$

On:

$$Psi1 = \frac{1}{\pi \times E_{eff} \times L} \quad \text{i} \quad Psi2 = \log(4 \times \pi \times R \times E_{eff} \times L) - 1$$

Integrant (17) respecte a δ s'obté el treball realitzat per la força normal de compressió (W_n), que al final de la fase de compressió val W_{nc} i és igual a l'energia cinètica de translació normal inicial:

$$W_{nc}(Fn_{\max}) = Tn_0 \quad (19)$$

On:

$$Tn_0 = \frac{Fn_{\max}^2}{B_1} \times \left(2 \times \log \frac{B_2}{Fn_{\max}} \right) - B_3 \quad (20)$$

On:

$$B_1 = 4 \times \pi \times E_{eff} \times L$$

$$B_2 = B_1 \times R$$

$$B_3 = 3$$

A partir de l'equació (19), s'ha d'anar iterant valors de Fn_{\max} fins que els dos costats de l'equació s'igualen.

Una vegada coneguda la força normal màxima (MN) es poden calcular l'àrea màxima (mm^2), la pressió mitja i la pressió màxima (MPa) en el centre de l'impacte:

$$A_{\max} = 2 \times a \times L \quad (21)$$

$$P_{mitja} = \frac{Fn_{\max}}{A_{\max}} \quad (22)$$

$$P_{\max} = \sqrt{\frac{E_{eff} \times Fn_{\max}}{\pi \times L \times R}} \quad (23)$$

4.3. Càlcul de les variables d'entrada

Les variables d'entrada, els paràmetres del nostre problema, s'han obtingut a partir de l'assaig de llançament realitzat al laboratori, de l'anàlisi dels vídeos d'alta velocitat i anàlisi de GIS.

4.3.1. Paràmetres elàstics

Els paràmetres elàstics que s'han necessitat per aquest estudi han sigut el mòdul de Young (E) i el coeficient de Poisson (ν). Per al cas dels maons, aquest s'han calculat a través d'assaigs de compressió sobre mostres del mateix material. Per als valors del substrat s'han obtingut de la fitxa tècnica de la planxa d'acer utilitzada (taula 2).

Taula 2. Paràmetres elàstics dels diferents materials assajats

Maó Vermell		Maó Salmó	
E_block (Gpa)	Nu_block	E_block (Gpa)	Nu_block
84,741	0,430	52,573	0,080

Maó Sahara		Planxa d'acer (Substrat)	
E_block (Gpa)	Nu_block	E_sust (Gpa)	Nu_sust
73,041	0,020	200,000	0,285

4.3.2. Pes específic

El pes específic γ (N/m³) també s'ha obtingut a partir de les dades obtingudes als assaigs de les mostres. Aquest s'ha calculat amb la densitat de cada material:

$$\gamma = \rho \times g \quad (35)$$

On:

ρ : densitat del material (kg/m³)

g : acceleració de la gravetat (m/s²)

4.3.3. Radi de l'esfera d'impacte

Com s'ha explicat en l'apartat 4.2, s'ha hagut de fer una simplificació de cara a obtenir l'àrea d'impacte. Aquesta ha consistit en suposar que el vèrtex del maó és una semi-esfera i l'aresta un cilindre. Per això, és necessari conèixer el radi de l'esfera d'aquestes dos figures.

Degut a que el maó té unes dimensions relativament reduïdes s'han pres dos valors: un radi mínim de 1 mm i un radi màxim de 5mm.

4.3.4. Àrea d'impacte

El paràmetre de l'àrea d'impacte va ser una dada que es va calcular en un principi per ser utilitzada com a variable d'entrada. No obstant, aquesta dada es va desestimar finalment degut a que mostrava uns resultats poc coherents i que no s'assimilaven a la realitat.

Per calcular-la es van escanejar les làmines amb l'impacte marcat, i un cop escanejades es van reestritzar per calcular les àrees amb el programa ArcGIS (figura 9).

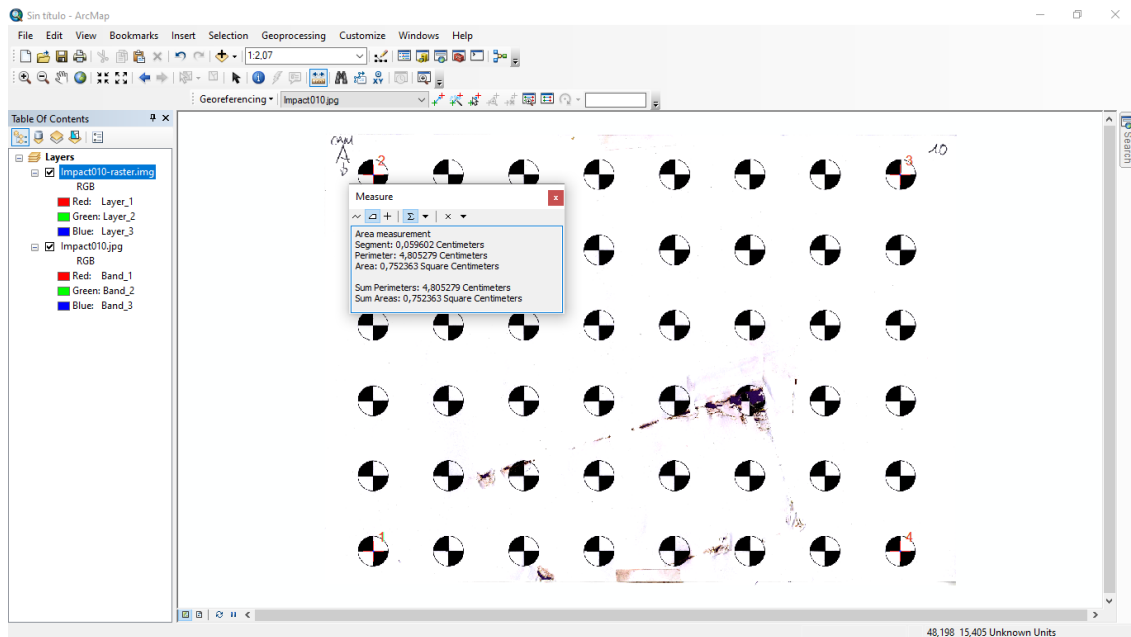


Figura 9. Càlcul de les àrees d'impacte des de ArcGIS a partir de la làmina rastrejada

Com es pot observar a la figura 10, l'àrea lila, corresponent a una làmina que es va utilitzar per fer contrast, hauria de correspondre a l'àrea d'impacte d'un vèrtex del maó. Si observem la forma de l'impacte, aquesta forma triangulada no correspon a un impacte completament elàstic, sinó que més bé, correspon a un impacte on ja s'ha produït el trencament i aquest no ha sigut completament fràgil. Per aquesta raó es va desestimar aquesta dada, perquè en moltes làmines es trobaven resultats més elevats als de la realitat.

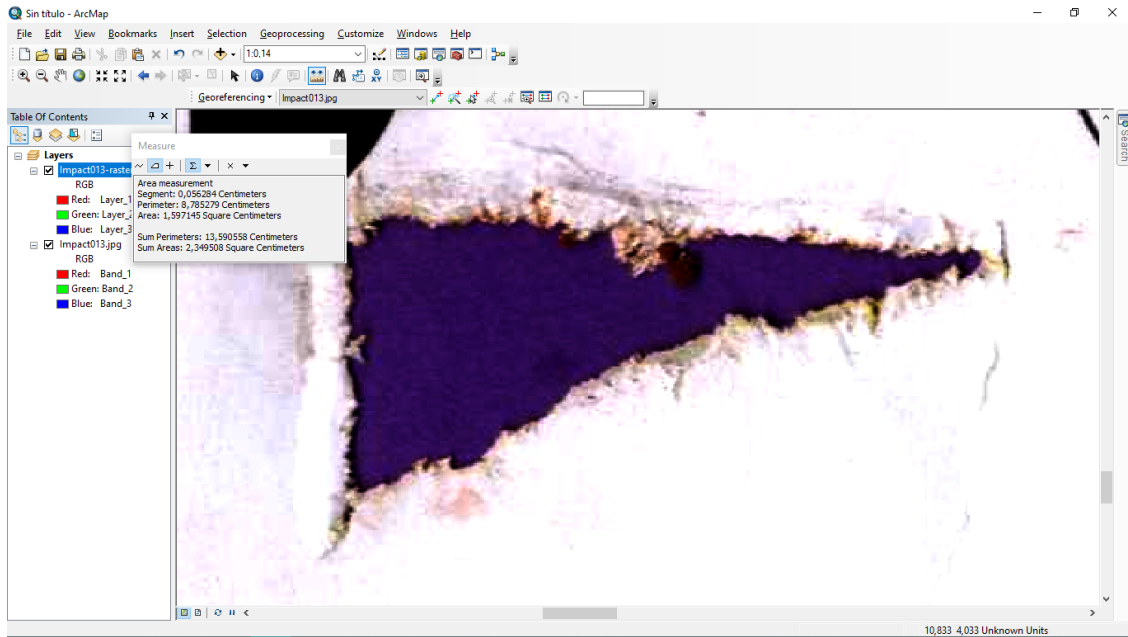


Figura 10. Ossa provocada per un impacte puntual analitzada des de ArcGIS

4.3.5. Morfologia de l'impacte

Tenint present les diferents morfologies que hi ha d'impacte, s'ha donat un valor segons cadascuna:

Valor d'1 per a impactes amb el vèrtex del maó

Valor de 2 per a impactes amb l'aresta del maó

Valor de 3 per a impactes amb la cara del maó

El càlcul de cada valor s'ha realitzat a través de l'anàlisi de vídeos d'alta velocitat.

4.3.6. Velocitat d'aproximació

S'entén com la velocitat que portava el bloc just abans de l'impacte. A l'haver-se produït tots els llançaments des de la mateixa altura i disposició, el valor de la velocitat d'aproximació (v_0) ha sigut el mateix en tots els casos. Es defineix la velocitat d'aproximació (m/s) com:

$$v_0 = \sqrt{2 \times g \times d} \quad (36)$$

on:

d : distància des de el punt inicial de caiguda fins al substrat.

g : acceleració de la gravetat.

4.3.7. Angle d'aproximació

S'entén com l'angle que forma el vector velocitat del centre de masses respecte al pla d'impacte. Com la caiguda del maó ha sigut sempre vertical i la superfície d'impacte ha estat sempre horitzontal, l'angle d'aproximació (β_0) ha sigut de 90° en tots els casos.

4.3.8. Longitud de l'aresta

Aquest valor ha sigut necessari per aquells impactes que han sigut amb una aresta del maó. Els valors s'han agafat de les dimensions del maó; 10cm per als impactes amb l'aresta curta i 20cm per als impactes amb l'aresta llarga.

4.3.9. Volum del maó

El volum inicial (V_0) s'ha calculat a partir de les dimensions del maó (figura 11). Aquestes eren de 5x10x20 cm, per tant el volum del maó ha sigut de 0.001 m^3 en tots els casos.

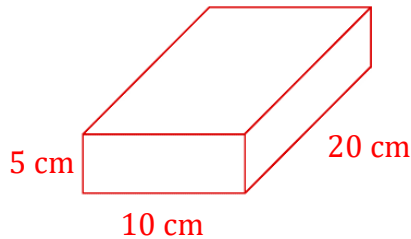


Figura 11. Esquema de les dimensions dels maons utilitzats

4.3.10. Grau de fragmentació

El grau de fragmentació s'ha calculat a partir del número de fragments i les dimensions d'aquests després dels impactes (taula 3). S'ha definit com:

$$Frag_degree = \left(1 - \frac{V_{max}}{V_0}\right) \times 100 \quad (37)$$

On:

V_{max} : volum del fragment més gran. Aquesta dada s'ha extret del TFM elaborat per Parras (2019).

V_0 : Volum inicial del maó.

Taula 3. Resultats del Grau de Fragmentació (Frag_Degree) de cada impacte. El número de referència dels maons no és correlatiu donat que, durant l'assaig, s'alternaven els llançaments d'un maó amb els de blocs formats per múltiples maons.

Impact_ref	Vmax (m³)	Frag_Degree (%)
1	0,0006312	36,88
4	0,0004874	51,26
7	0,0001866	81,34
10	0,0007131	28,69
13	0,0005268	47,32
16	0,0003702	62,98
19	0,0004881	51,19
22	0,0006271	37,29
25	0,0002236	77,64
28	0,0004152	58,48
31	0,0009527	4,73
34	0,0006319	36,81
37	0,0003588	64,12
40	0,0005604	43,96
43	0,0008409	15,91
46	0,0003334	66,66
49	0,0005071	49,29
52	0,0003528	64,72
55	0,0005861	41,39
58	0,0006962	30,38
61	0,0009263	7,37
64	0,0003581	64,19
67	0,0002864	71,36
70	0,000373	62,70
73	0,0006666	33,34

4.3.11. Angle d'impacte del centre de masses

L'angle d'impacte del centre de masses o ICM és el nom que se li ha donat a l'angle que forma la recta que va del centre de masses al punt o zona d'impacte respecte la recta normal del pla horitzontal (el substrat). Aquest angle (α en la figura 12) controla si hi haurà rotació durant l'impacte.

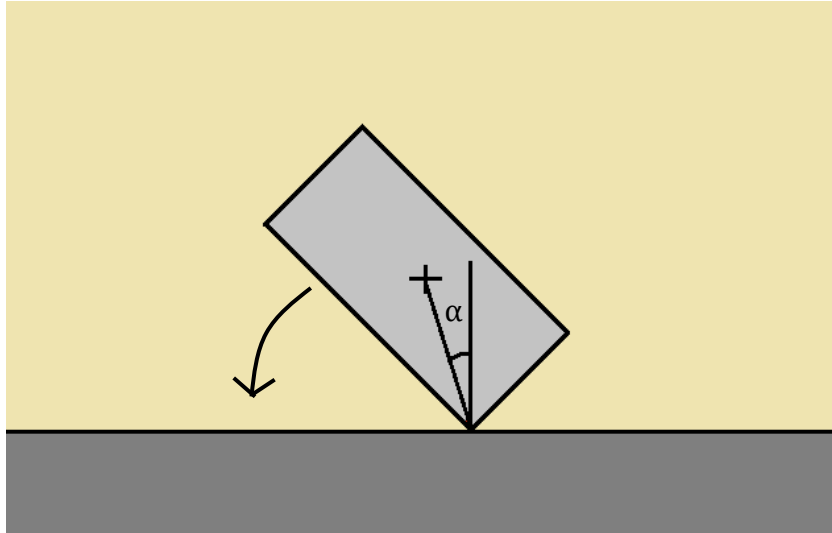


Figura 12. Esquema de l'angle ICM (α) i de la rotació que genera

Si la força d'impacte, que és normal a pla d'impacte no està alineada amb el centre de masses, es genera un moment de rotació durant l'impacte i, com a conseqüència, part de l'energia cinètica de translació del bloc es transforma en energia de rotació. La rotació associada a aquest efecte terminarà quan el bloc acabi tocant amb una cara o un altre aresta el terra. És a dir, hi haurà una segona col·lisió, i aquest serà un impacte compost. És el que havíem anomenat anteriorment "efecte martell".

Per mesurar l'angle ICM es va utilitzar un programari anomenat OrientationWIN, cedit pel departament d'enginyeria civil i ambiental de La universitat Politècnica de Catalunya. Aquest disposava d'una maqueta del bloc que s'havia d'ajustar a les fotografies preses just abans de l'impacte (figura 13). Un cop alineat, el programa mostrava els angles de cada cara del maó, i a partir d'aquests obtenia l'angle ICM (taula 4).

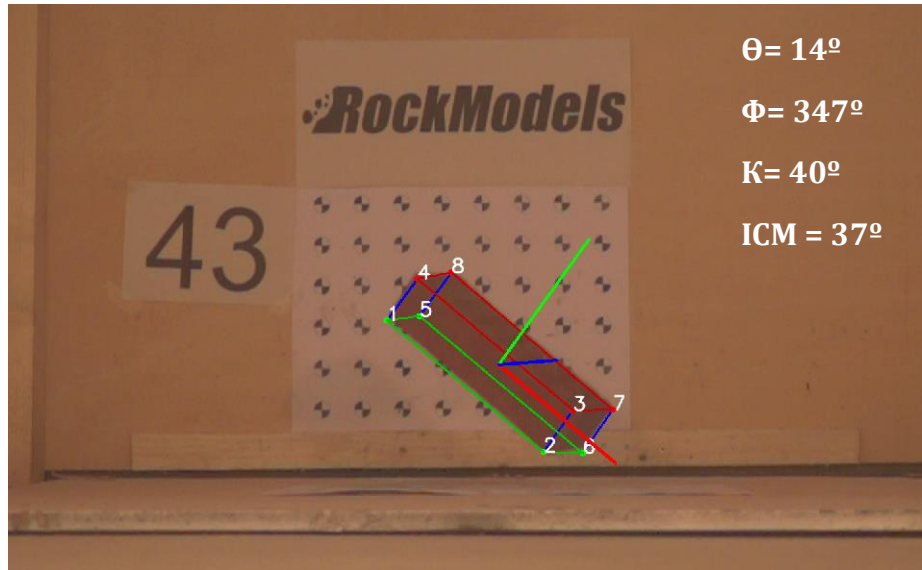


Figura 13. Frame de l'anàlisi de l'impacte 43 realitzat amb OrientationWIN

Taula 4. Valors de l'angle ICM per a cada impacte

Impact_ref	Angle ICM
1	33
4	42
7	37
10	45
13	58
16	33
19	56
22	23
25	33
28	61
31	12
34	15
37	55
40	2
43	37
46	62
49	46
52	69
55	60
58	31
61	15
64	55
67	33
70	55
73	37

Aquest angle es va calcular per estudiar els efectes que tenia la rotació sobre la fragmentació en els casos amb impactes composts. Malauradament, només s'ha acabat fent per a impactes puntuals, i estudiar així com varia l'àrea i la força normal en caigudes obliqües dels maons.

5. Resultats

5.1 Anàlisi qualitatiu dels vídeos

A partir dels vídeos que es van extreure durant l'assaig, s'ha realitzat un anàlisi amb el programa VideoPad per tal d'extreure informació detallada dels impactes. Amb aquest programa s'ha pogut analitzar els vídeos fotograma per fotograma i observar bé com ha sigut la morfologia de l'impacte i si va fragmentar amb el primer o el segon impacte. Així doncs, en la taula 4 es pot observar un resum de la quantitat de maons que fragmenten en un primer xoc segons la seva morfologia d'impacte.

Taula 5. Fragmentació dels maons en un primer impacte

Impactes vèrtex		Impactes aresta		Impactes cara	
17		8		0	
Trencament		Trencament		Trencament	
Sí	No	Sí	No	Sí	No
4	13	6	2	0	0

De primeres es pot observar que, malgrat la nombrosa quantitat de blocs que es van llençar, no n'hi va haver cap que impactés amb la cara del maó. Si bé és cert que, alguns llançaments semblaven impactar amb la base del maó, sempre ho acabaven fent amb un vèrtex o aresta.

Observem que la majoria dels casos que impacten de primeres amb una punta no fragmenten. En termes de percentatges, només un 23,53% dels blocs que impacten amb un vèrtex acaben fragmentant.

Cal anomenar, en el cas dels impactes amb un vèrtex, que una gran quantitat d'ells sí que patien petits trencaments al voltant de l'impacte que feien saltar alguns fragments del totxo. Es va decidir, però, que al ser fragments que no arribaven ni al 5% del volum total, no eren prou representatius per tenir-los en compte.

Pel que afecta als impactes amb una aresta del maó, en aquest cas, la majoria sí que fragmenten. Un total del 75% d'aquests trenquen en un primer impacte.

5.2 Anàlisi qualitatiu dels impactes

En aquest cas, per extreure els resultats dels impactes s'ha utilitzat el programari Matlab. Les variables d'entrada que s'ha utilitzat són les anomenades en el apartat 4.3.1 d'aquesta memòria. No obstant en la taula 5 es pot trobar un quadre resum d'aquestes.

Taula 6. Variables d'entrada introduïdes a Matlab

impact_ref	block_volume	ImpactMorf	Edge_Length	V_0	β_0	Frag_Degree
1	0.001	1	NaN	9,137	90	0
4	0.001	1	NaN	9,137	90	2
7	0.001	1	NaN	9,137	90	0
10	0.001	1	NaN	9,137	90	0
13	0.001	1	NaN	9,137	90	2
16	0.001	2	0,10	9,137	90	2
19	0.001	1	NaN	9,137	90	2
22	0.001	1	NaN	9,137	90	0
25	0.001	2	0,20	9,137	90	0
28	0.001	1	NaN	9,137	90	2
31	0.001	1	NaN	9,137	90	1
34	0.001	1	NaN	9,137	90	0
37	0.001	2	0,10	9,137	90	2
40	0.001	2	0,20	9,137	90	2
43	0.001	2	0,10	9,137	90	1
46	0.001	2	0,20	9,137	90	2
49	0.001	1	NaN	9,137	90	0
52	0.001	2	0,20	9,137	90	2
55	0.001	1	NaN	9,137	90	0
58	0.001	1	NaN	9,137	90	0
61	0.001	2	0,20	9,137	90	0
64	0.001	1	NaN	9,137	90	0
67	0.001	1	NaN	9,137	90	2
70	0.001	1	NaN	9,137	90	0
73	0.001	2	0,10	9,137	90	0

Els valors introduïts com a NaN són valors nuls i que en nomenclatura de Matlab s'han d'introduir d'aquesta manera per tal que no doni conflictes amb valors iguals a zero. Aquest valors es poden trobar en la columna Edge_Length, doncs en aquesta només hi ha valors per aquells impactes que han sigut amb l'aresta del bloc.

Variables de sortida

Com s'ha esmentat anteriorment, els valors de les variables s'han extret seguint diferents mètodes de càlcul: agafant radis d'entre 1 i 5 mm i amb un tipus de impacte perfectament elàstic. Les variables de sortida que el programa extreu són les següents:

- impact_ref: número de referència de l'impacte
- ImpactMorf: morfologia de l'impacte
- Tn0: Energia cinètica traslacional normal inicial (en kJ)
- FragDegree: Grau de fragmentació (%)
- R: Radi de curvatura de l'element que impacta (en m):
 - Contacte puntual: radi de la semiesfera.
 - Contacte lineal: radi del cilindre.
- Area_impacto: l'àrea d'impacte (en mm²)
- Delta_max: indentació màxima (en mm)
- Fn_max: força normal màxima (en MN)
- p_max: pressió normal màxima (en MPa)
- p_mean: pressió normal mitja (en MPa)

En la taula 7 es pot trobar un recull de les variables de sortida que s'han obtingut i que són necessàries per fer l'anàlisi del impacte, ordenades segons la varietat del material: Vermell, Salmó i Sahara, respectivament.

Taula 7. Variables de sortida obtingudes

impact_ref	ImpactMorf	Tn0	Àrea d'impacte	δ_{max}	Fn_{max}	P_{max}
1	1	0,0885	16,0458	1,0215	0,2166	5,32E+04
4	1	0,0885	16,0458	1,0215	0,2166	5,32E+04
7	1	0,0885	16,0458	1,0215	0,2166	5,32E+04
10	1	0,0885	16,0458	1,0215	0,2166	5,32E+04
13	1	0,0885	16,0458	1,0215	0,2166	5,32E+04
19	1	0,0885	16,0458	1,0215	0,2166	5,32E+04
22	1	0,0885	16,0458	1,0215	0,2166	5,32E+04
28	1	0,0885	16,0458	1,0215	0,2166	5,32E+04
31	1	0,0885	16,0458	1,0215	0,2166	5,32E+04
34	1	0,0885	16,0458	1,0215	0,2166	5,32E+04
16	2	0,0885	181,8733	0,2142	0,9140	1,62E+04
25	2	0,0885	299,9378	0,1565	1,2429	1,32E+04
37	2	0,0885	181,8733	0,2142	0,9140	1,62E+04
40	2	0,0885	299,9378	0,1565	1,2429	1,32E+04
43	2	0,0885	181,8733	0,2142	0,9140	1,62E+04
49	1	0,087	19,507	1,242	0.1756	13,5E+3
67	1	0,087	19,507	1,242	0.1756	13,5E+3
70	1	0,087	19,507	1,242	0.1756	13,5E+3
46	2	0,087	343,575	0,195	0.9865	3,7E+3
52	2	0,087	343,575	0,195	0.9865	3,7E+3
73	2	0,087	208,608	0,267	0.7274	4,4E+3
55	1	0.075	28,938	0.921	0.2039	10,6E+3
58	1	0.075	28,938	0.921	0.2039	10,6E+3
64	1	0.075	28,938	0.921	0.2039	10,6E+3
61	2	0.075	419,509	0.172	0.9451	2,9E+3

5.3 Anàlisi qualitatiu de la fragmentació

En aquest cas, part de les dades utilitzades han sigut aportades per l'Ester Parras, que va basar el seu treball final de màster en l'estudi de la fragmentació dels maons llançats en el assaig de comminació explicat a l'apartat 3.1. Si s'observa la taula 8, es pot veure un resum de la fragmentació en els llançaments d'un sol maó.

Taula 8. Resultats de l'anàlisi de fragmentació de l'assaig de comminació (Parras, 2019)

Test	Nº impactes fins a fragmentar	V_{max}	Nº fragments totals	Varietat
1	2	0,000631193	65	Vermell
4	1	0,000487429	22	Vermell
7	2	0,000186618	12	Vermell
10	2	0,000713137	83	Vermell
13	1	0,000526774	60	Vermell
16	1	0,000370184	34	Vermell
19	-	0,000488123	12	Vermell
22	2	0,00062708	43	Vermell
25	1	0,000223604	116	Vermell
28	1	0,000415222	106	Vermell
31	-	0,000952665	11	Vermell
34	2	0,00063191	15	Vermell
37	1	0,000358849	143	Vermell
40	1	0,000560373	7	Vermell
43	1	0,000840929	35	Vermell
46	1	0,000333354	139	Salmó
49	2	0,000507096	14	Salmó
52	1	0,000352813	81	Salmó
55	3	0,000586083	132	Sahara
58	2	0,000696183	43	Sahara
61	2	0,000926283	95	Sahara
64	2	0,000358128	170	Sahara
67	1	0,000286383	91	Salmó
70	2	0,000373043	91	Salmó
73	2	0,000666617	65	Salmó

6. Anàlisi i discussió de resultats

6.1 Anàlisi qualitatiu dels vídeos

Com s'ha vist abans, un 23.53% dels impactes amb un vèrtex i un 75% dels impactes amb una aresta acaben fragmentant en el primer impacte. Aquests dos últims percentatges ens permeten extreure una primera correlació molt clara: com major sigui l'àrea d'impacte entre el bloc i el substrat, amb major freqüència es produirà fragmentació.

A banda d'això, observant els vídeos es pot veure que segons el tipus de material que formi els maons, aquests seran més propens a trencar o no.

En el cas de la varietat de maó Vermell, fins a un total del 60% dels llançaments fragmenten en el primer impacte. En canvi, en el cas de la varietat Sahara veiem que cap dels llançaments ha patit fragmentació en un primer impacte. Pel que fa a la varietat Salmó hi trobem més igualtat, ja que el 50% dels llançaments van fragmentar en un primer xoc.

Si agafem el còmput global de tots els llançaments, trobem que el 40% dels maons llençats han fragmentat en el primer impacte.

6.2 Anàlisi qualitatiu dels impactes

Les discussions que es mostren a continuació han sigut extretes a partir d'observar els resultats obtinguts amb el mètode de càlcul per impactes perfectament elàstics i amb un radi màxim de 5mm.

Si ens fixem ara en la taula 6 podem veure uns resultats coherents i que ens permeten extreure unes correlacions clares.

En primer lloc, observem que l'àrea d'impacte augmenta amb la força normal d'impacte. Això és un resultat totalment lògic, doncs la força que es produeix del contacte entre dos cossos depèn de l'àrea de contacte entre aquests. En la figura 14 es veu com en els impactes amb una punta del maó, que tenen una àrea de contacte més petita, la força normal màxima és més petita. I en els contactes amb aresta, on la superfície de contacte és major, s'hi produeix una força normal més gran.

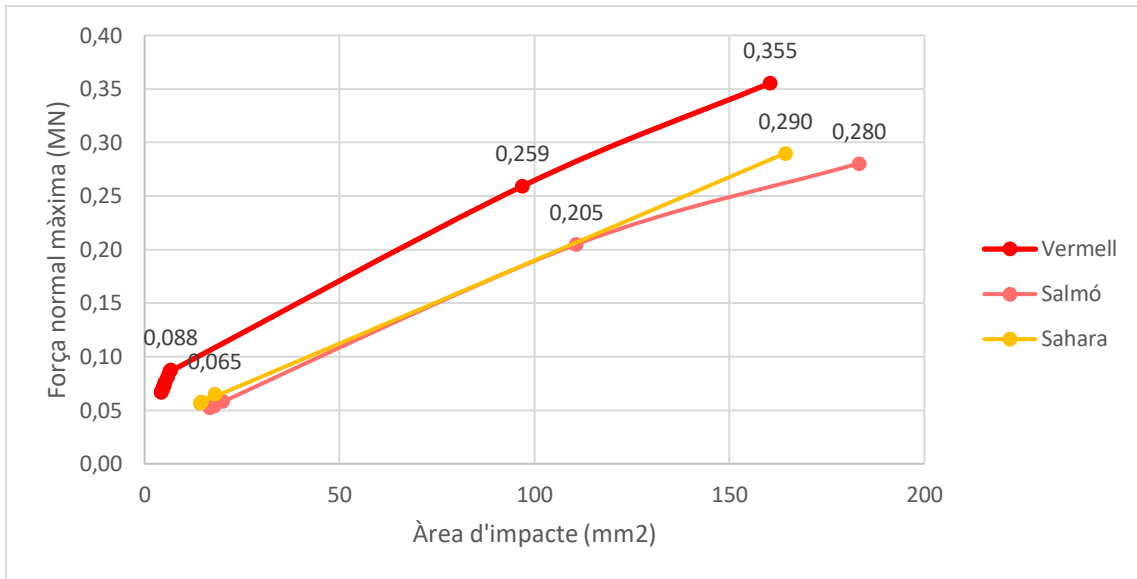


Figura 14. Relació entre l'àrea d'impacte i la força normal màxima

A contrapartida d'això, com podem veure en la figura 15, la pressió màxima durant l'impacte és major en els casos on l'àrea d'impacte és més petita. Aquest resultat també és coherent, doncs si mirem la fórmula (11) com major és el radi de l'esfera de contacte, i per tant, major és l'àrea d'impacte, més petit serà el valor de la pressió en el contacte.

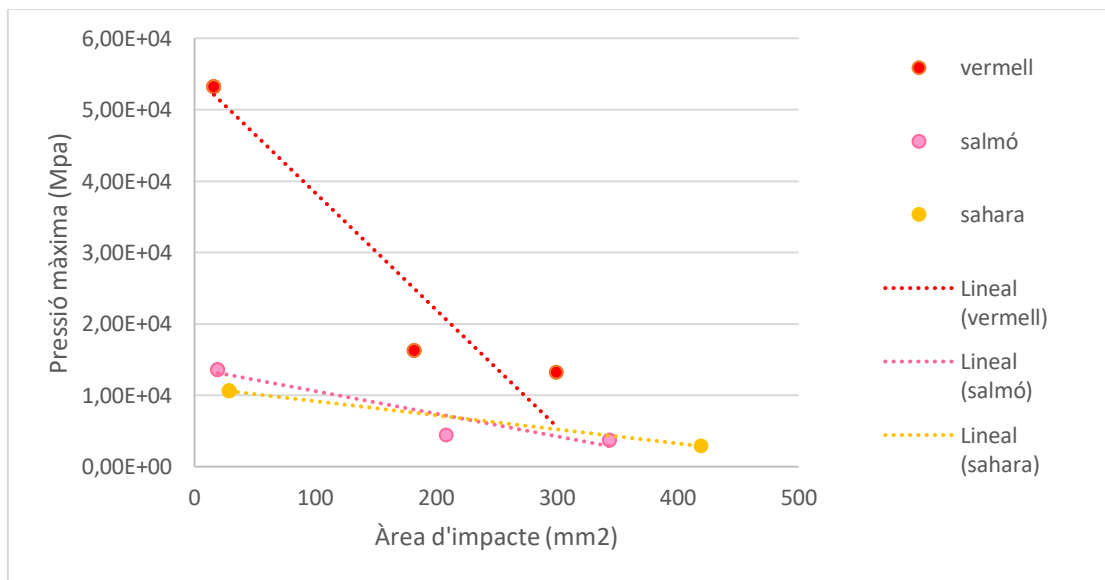


Figura 15. Relació entre l'àrea d'impacte i la pressió màxima

Un altre valor on hi veiem uns resultats clars és en la indentació. Com s'observa a la figura 16, els valors de Delta varien inversament amb l'àrea d'impacte. Així doncs, com major sigui l'àrea del contacte, menor indentació es produirà. Això també ens permet relacionar que, els impactes amb un vèrtex del maó tindran més indentació que aquells impactes que siguin amb l'aresta o la cara del totxo (figura 17).

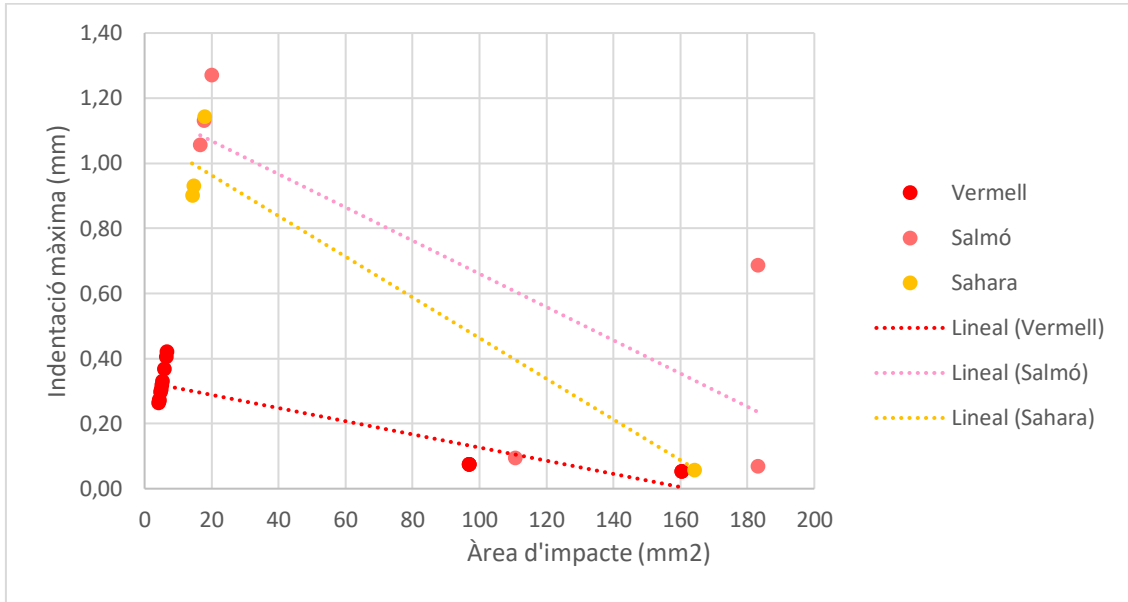


Figura 16. Relació entre l'àrea d'impacte i la indentació màxima

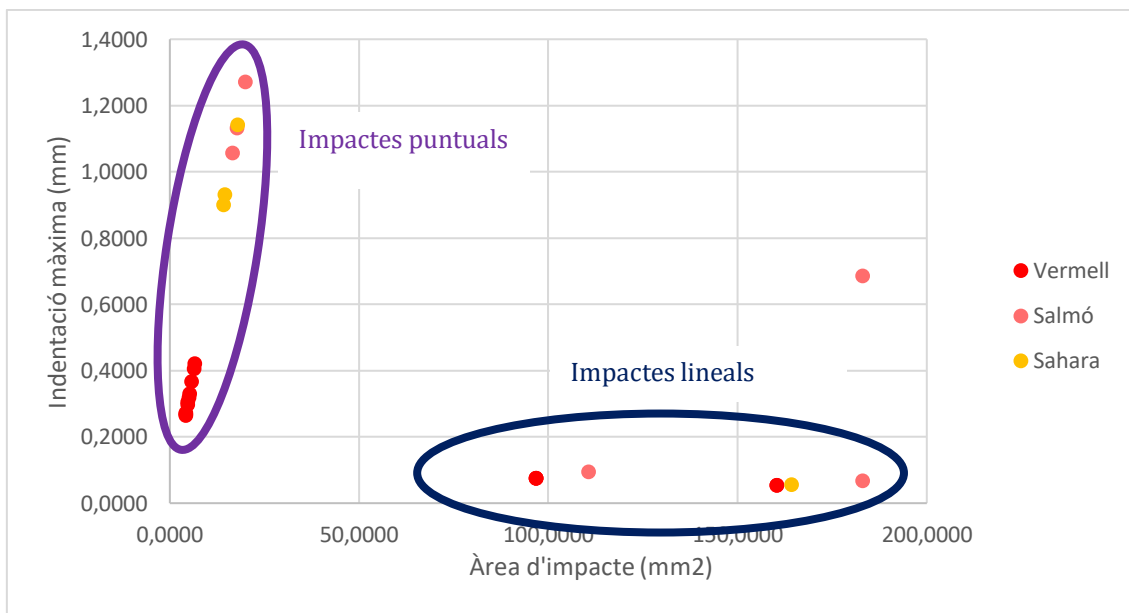


Figura 17. Relació entre l'àrea d'impacte i la indentació màxima segons la morfologia d'impacte

Pel que fa a l'energia cinètica inicial, de primeres, es podria pensar que hi hauria d'haver una correlació entre aquesta i la força normal, doncs és lògic pensar que, a major energia cinètica inicial, major força normal es produirà. Malgrat això, al tenir el mateix maó en la majoria de llançaments, la massa, la velocitat i l'angle d'aproximació, que són els valors que intervenen en el càlcul de l'energia cinètica inicial (T_{n0}), no varien. Per tant, no s'obtenen resultats diferents entre els llançaments amb el mateix maó.

Si es fa aquesta comparació entre llançaments de diferents materials, s'observa una mica aquesta tendència, però no en tots els llançaments es dona. Per tant els resultats obtinguts no són prou clars per extreure'n una correlació.

6.3 Anàlisi qualitatiu de la fragmentació

Seguint la línia comentada en l'apartat anterior, al tenir igual energia cinètica inicial no s'ha pogut trobar un llindar a partir del qual els maons tenen més possibilitats de trencar. Estudiant-ho gràficament sí que s'observa mínimament (figura 18), i es podria pensar que existeix un llindar per sobre el qual els maons trenquen, doncs tots els punts que han quedat a l'esquerra no han fragmentat, en canvi, una gran majoria dels de la dreta sí. No obstant, fixant-nos bé en les diferències de valors de l'energia cinètica, aquesta és tant ínfima que no resulta prou concloent per extreure aquest raonament.

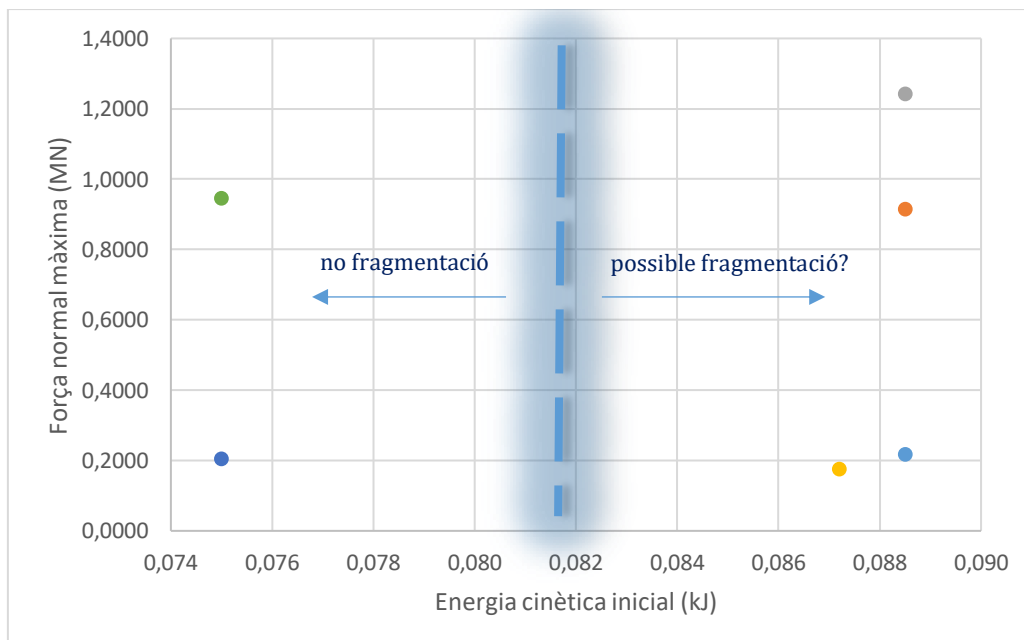


Figura 18. Relació entre l'energia cinètica inicial i la força normal màxima

Si analitzem ara, l'efecte que té la inclinació amb la que cau el bloc respecte la fragmentació sí que trobem els resultats esperats.

En primer lloc s'ha comparat la força normal d'impacte amb l'angle ICM en els impactes amb un vèrtex del maó, doncs és del que es disposaven més dades de la força normal. Sabem que si la força d'impacte, que és normal al pla d'impacte, no està alineada amb el centre de masses, es genera un moment de rotació i, com a conseqüència, part de l'energia cinètica de translació del bloc es transforma en energia de rotació. Per tant, com major sigui l'angle ICM, menor serà la força normal generada durant l'impacte (figura 29).

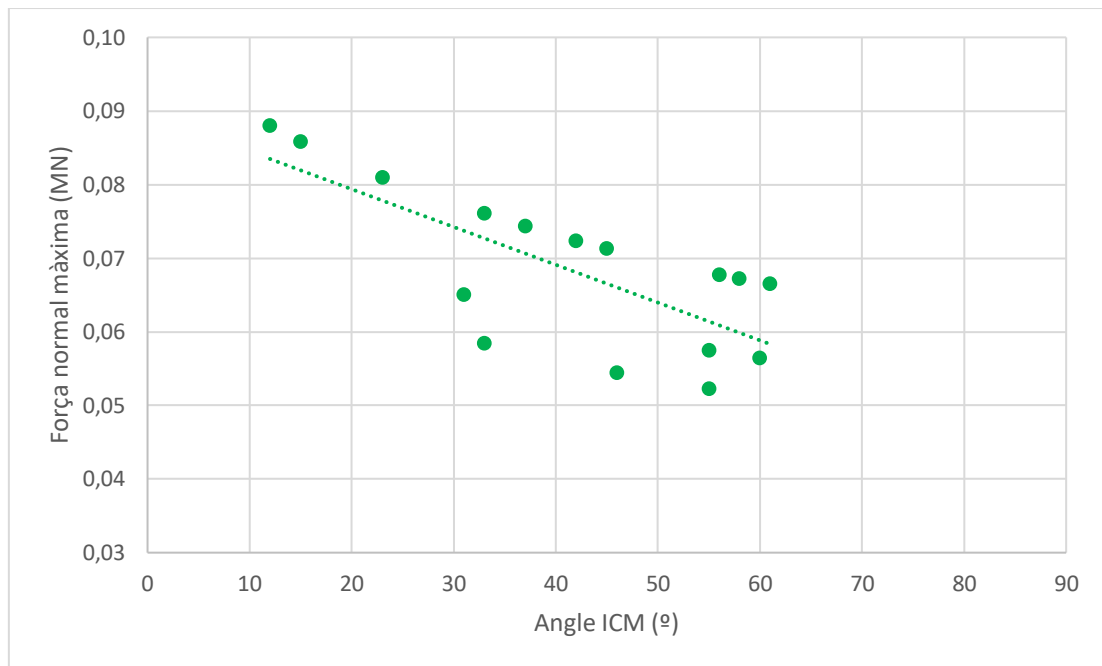


Figura 19. Relació entre l'angle ICM i la força normal màxima en impactes puntuals

S'ha analitzat també la relació entre la fragmentació i l'angle ICM. En aquest cas, s'ha tingut present el grau de fragmentació per a impactes compostos, doncs així s'observa la importància que pot arribar a tenir l'efecte de la rotació. En la figura 20 podem observar, en línies generals, que com major és la inclinació amb la que cau el maó, major és el grau de fragmentació. Per tant, veiem que l'efecte de la rotació està molt relacionat amb la fragmentació i que com més energia de rotació disposa el bloc, més probabilitats de fragmentar-se té.

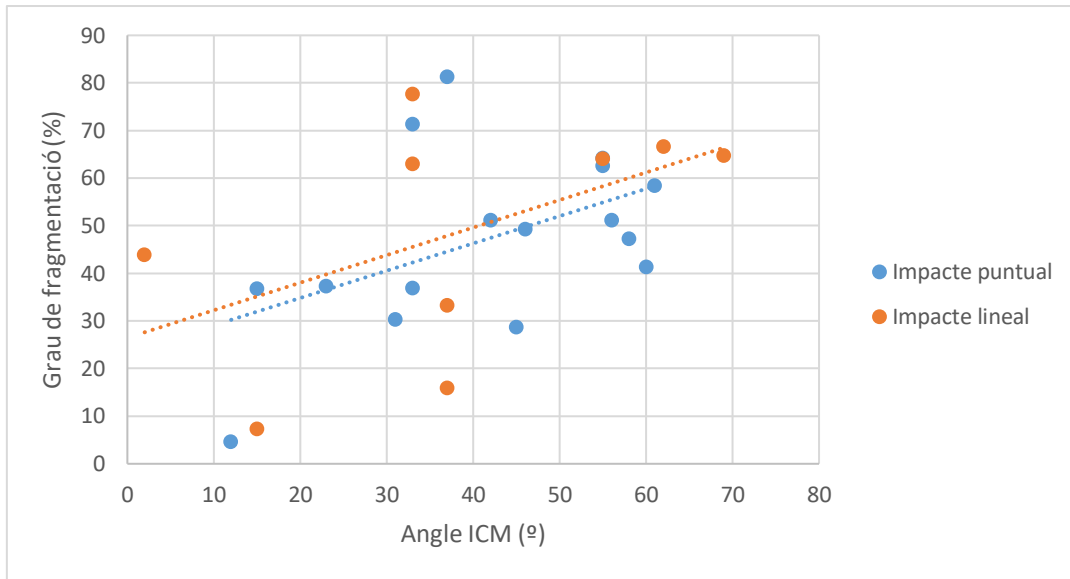


Figura 20. Relació entre l'angle ICM i el grau de fragmentació.

Finalment s'ha fet estudiat la relació entre la força normal màxima amb el grau de fragmentació, i també, la pressió màxima generada amb el grau de fragmentació.

S'ha analitzat la relació amb la força normal per a totes les morfologies d'impacte (figura 21) i per a impactes puntuals (figura 22). Els resultats obtinguts però, no són els esperats. Fixant-se en les gràfiques es veu que hi ha casos amb forces normals grans, però poc grau de fragmentació, com en el llançament 31. En canvi, d'altres han patit molta fragmentació, però la força normal d'impacte ha sigut més baixa.

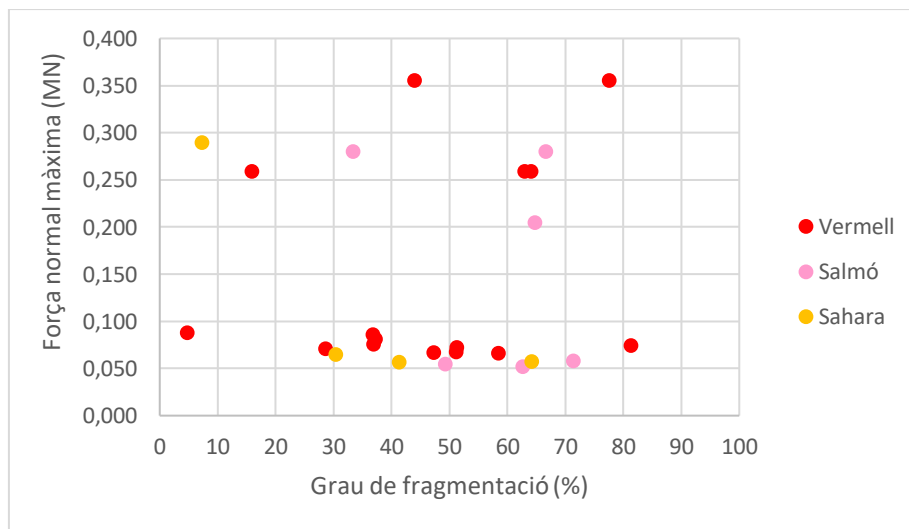


Figura 21. Relació entre el grau de fragmentació i la força normal màxima de totes les morfologies d'impacte.

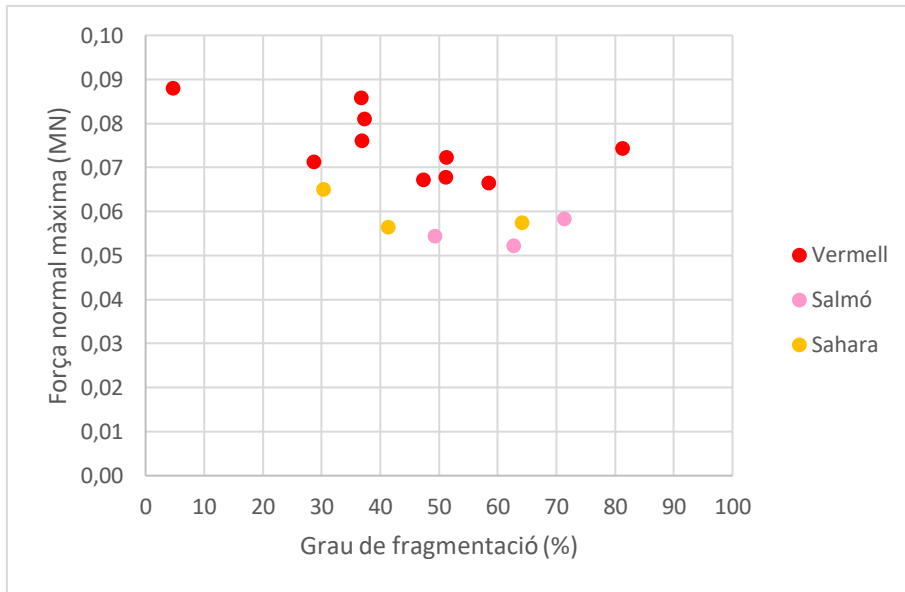


Figura 22. Relació entre el grau de fragmentació i la força normal màxima dels impactes puntuals

Per al cas de les pressions, també s'ha analitzat per totes les morfologies d'impacte (figura 23) i per als impactes puntuals (figura 24). Observant les gràfiques s'extreu la mateixa conclusió que amb la força normal, on tenim impactes amb pressions altes i poca fragmentació, i d'altres amb pressions més baixes i molta fragmentació.

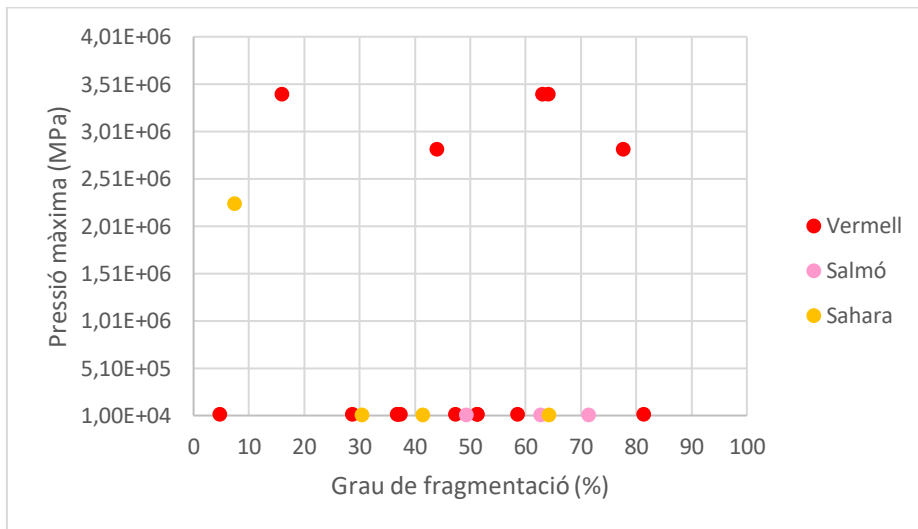


Figura 23. Relació entre el grau de fragmentació i la pressió màxima de totes les morfologies d'impacte

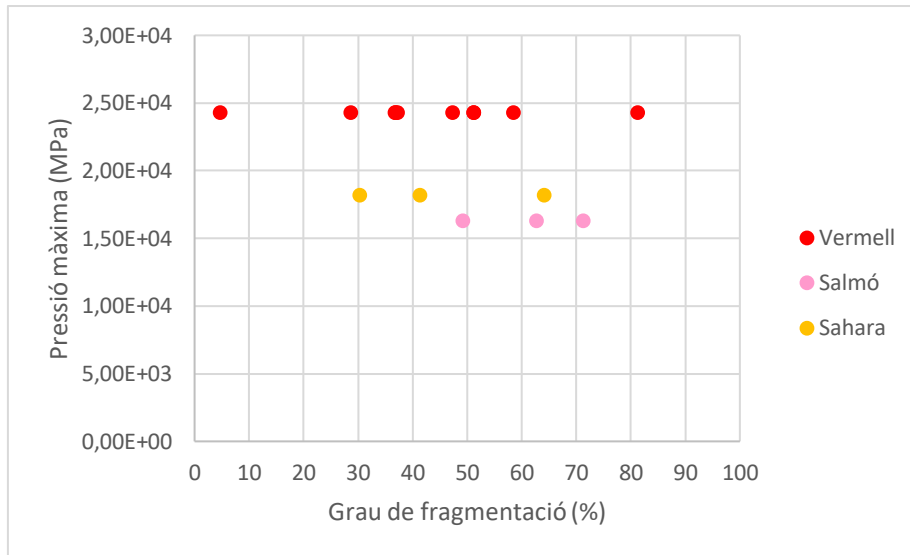


Figura 24. Relació entre el grau de fragmentació i la pressió màxima dels impactes puntuals

El perquè de que aquests resultats no siguin prou concloents es deu a que, el valor del grau de fragmentació és el total obtingut després d'un o més impactes consecutius. Per tant, per trobar una bona relació, s'hauria d'analitzar de forma complerta els segons impactes, tal com s'ha fet amb els primers, considerant totes les variables que intervenen i que varien respecte al primer impacte: morfologia d'impacte, energia cinètica i angle ICM.

7. Conclusions

Durant tot el treball s'ha seguit una metodologia clara per assolir els objectius marcats. S'han dut a terme tasques d'anàlisi de vídeos, per a definir la morfologia de cada impacte. S'ha mesurat l'àrea i l'angle del centre de masses de cada d'impacte i s'ha calculat la força i la pressió d'impacte.

Arrel de les anàlisis dels vídeos s'ha observat que la morfologia de l'impacte afecta molt en la fragmentació. Els impactes amb un vèrtex del maó han patit menys fragmentació que aquells maons que realitzaven un primer impacte amb l'aresta. Aquesta relació es veu molt clarament si comparem els percentatges de la fragmentació en un primer impacte extrets de l'anàlisi dels vídeos. Només un 23,5% dels impactes puntuals han fragmentat i fins a un 75% dels impactes lineals han fragmentat. Això ens deixa veure que, l'àrea de contacte entre el bloc i el substrat juga un paper molt important a l'hora de produir-se la fragmentació.

Pel que fa a l'estudi numèric, utilitzant models analítics d'elasticitat per a cada tipologia d'impacte, s'ha obtingut resultats coherents i esperables. De primeres, s'observa com l'àrea d'impacte augmenta amb la força normal. Això ens indica que, en impactes amb una aresta o una cara del maó, es generarà més força normal i farà

que es produeixi la fragmentació en més mesura. Això s'ha pogut corroborar a través dels vídeos enregistrats durant l'assaig. Per altra banda, la pressió màxima durant l'impacte s'ha vist que és més elevada com més petita sigui l'àrea d'impacte. Aquesta relació s'ha observat també amb la indentació, on s'ha vist com es produeix més en els impactes amb superfícies de contacte més petites.

S'ha mostrat que l'angle d'impacte del centre de masses afecta a la força normal i a la fragmentació. En el cas de la força normal, veiem que aquesta és més elevada com menor és l'angle ICM. Resultat lògic, doncs la major part de l'energia cinètica inicial passa a força normal d'impacte si aquest angle és petit. Pel que fa a la fragmentació, veiem que el grau de fragmentació és més elevat com més gran és l'angle ICM. Aquest dos resultats, a priori, semblen contraposar-se, però aquí hi ha un aspecte molt important, que és el número d'impactes. Podem veure que si l'angle és petit tindrà més possibilitats de fragmentar en un primer impacte, ja que en l'impacte es generarà més força normal. En canvi si l'angle és gran, la major part de l'energia es transformarà en energia de rotació, i tindrà més probabilitats de fragmentar-se en posteriors impactes.

En l'anàlisi de les forces i pressions generades durant l'impacte i la seva influència en la fragmentació, no s'ha obtingut els resultats esperats. La raó principal es deu a que no s'ha pogut realitzar l'anàlisi de segons impactes ja que les variables que es necessiten per realitzar-ho no són fàcils de conèixer. El difícil és calcular i mesurar la velocitat normal inicial al segon impacte, i per tant, l'energia cinètica normal. En tota la bibliografia consultada no s'ha trobat cap estudi on això es calculi, i per tant, no s'ha pogut analitzar la influència dels impactes complets amb la fragmentació.

Per acabar, en aquest treball s'ha realitzat un estudi en un camp on el coneixement que hi ha no és gaire extens. Malgrat això, s'ha pogut obtenir resultats coherents i s'ha observat aspectes de possible millora de cara a posteriors estudis. Els resultats obtinguts han mostrat clarament que la morfologia de l'impacte és un factor molt rellevant, degut a la influència que té en les forces generades i aquestes sobre la fragmentació dels maons.

8. Perspectives futures

Durant la realització del treball s'ha topat amb algunes mancances d'informació que s'han suplert amb hipòtesis i simplificacions, i que en alguns apartats han dificultat l'extracció de conclusions clares.

De cara a posteriors estudis en l'àmbit de la fragmentació, s'hauria de tenir present els següents aspectes relacionats amb l'assaig de llançament:

- Realització de més mostres per obtenir millors resultats. S'ha vist com de la varietat de maó Vermell es disposaven 15 mostres, però de la varietat Sahara només 4. Això ha provocat que la informació extreta d'aquesta última varietat sigui escassa.

Pel que afecta al càlcul de forces, seria interessant que el model analític que s'utilitzi tingués present els següents punts:

- Combinació d'elasticitat i plasticitat. Com s'ha observat arrel d'analitzar les àrees d'impacte marcades en les làmines, en alguns llançaments s'observa com les marques no corresponen a impactes perfectament elàstics, sinó que tenen una component plàstica.
- El programa hauria de ser capaç d'analitzar segons impactes que ocorrin amb efecte martell, és a dir, amb rotació. Molts impactes han fracturat en el segon impacte, degut a la rotació generada a partir del primer impacte.
- Introduir els diversos angles calculats, com el del centre de masses, per a totes les morfologies d'impacte.

9. Agraïments

En aquest treball s'ha utilitzat dades del projecte d'investigació, caracterització i modelització de despreniments rocosos (RockModels), finançat per el Ministeri d'Economia, Industria i Competitivitat del Govern d'Espanya (Ref. BIA2016-75668-PAEI/FEDER, UE).; que es realitza a la secció d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica del Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental (Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech, UPC) <https://rockmodels.upc.edu>

10. Referències

- Bourrier, F., Eckert, N., Nicot, F., and Darve, F.: Bayesian stochastic modeling of a spherical rock bouncing on a coarse soil, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 831–846, <https://doi.org/10.5194/nhess-9-831-2009>, 2009.
- Chen, C. C., Telesca, L., Lee, C. T., & Sun, Y. S. (2011). Statistical physics of landslides: New paradigm. *Epl*, 95(4), 10–14. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/95/49001>
- Corominas, J. [et al.]. Simplified approach for obtaining the block volume distribution of fragmental rockfalls. A: International Symposium on Landslides. "Landslides and Engineered Slopes". Banff: CRC Press. Taylor & Francies Group, 2013, p. 1159-1164.
- Corominas, J.; Matas, G.; Ruiz, R. Quantitative analysis of risk from fragmental rockfalls. "Landslides", *Gener* 2019, vol. 16, núm. 1, p. 5-21. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1087-9>
- Corominas, J., Mavrouli, O., & Ruiz-Carulla, R. (2017). Rockfall Occurrence and Fragmentation. *Advancing Culture of Living with Landslides*, 75–97. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59469-9_4
- Crosta, G. B., & Agliardi, F. (2003). Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(1), 176–191. <https://doi.org/10.1139/t02-085>
- David J. Varnes. (1978). Slope Movement Types and Processes. <https://doi.org/10.1016/j.msar.2018.11.001>
- Dorren, L. K. A. (2003). A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, 27(1), 69–87. <https://doi.org/10.1191/0309133303pp359ra>
- Evans, G., & Hungr, O. (1993). The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, 30:620-636, <https://doi.org/10.1139/t93-054>
- Matas, G., Lantada, N., Corominas, J., Gili, J., Ruiz, R., Prades, A. Modelización de desprendimientos rocosos considerando la fragmentación. A: Simposio

- Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. "IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables". Santander: International Centre for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), 2017, p. 881-892.
- Ghaednia, H., Wang, X., Saha, S., Xu, Y., Sharma, A., & Jackson, R. L. (2017). A Review of Elastic-Plastic Contact Mechanics. *Applied Mechanics Reviews*, 69(6), 1–30. <https://doi.org/10.1115/1.4038187>
- Giacomini, A., Buzzi, O., Renard, B., y Giani, G.P. (2009). Experimental studies on fragmentation of rock falls on impact with rock surfaces. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 46, 708-715.
- Gili, J.A., Ruiz-Carulla, R., Matas, G., Corominas, J., Lantada, N., Núñez, M.A., Mavrouli, O., Buill, F., Moya, J., Prades, A., Moreno, S. (2016) Experimental study on rockfall fragmentation: in situ test design and firsts results. *International Symposium Landslides 2016 (ISL2016)*, Napoli (Italia).
- Green, I. (2005). Poisson ratio effects and critical values in spherical and cylindrical hertzian contacts. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 10(3), 451–462.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M. H., Loye, A., Metzger, R., & Pedrazzini, A. (2012). Use of LIDAR in landslide investigations: A review. *Natural Hazards*, 61(1), 5–28. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9634-2>
- Johnson, K. (1985). *Contact Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CB09781139171731
- L. Popov, V. (2010). *Contact Mechanics and Friction* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CB09781107415324.004>
- Lekuona, B. (2018). Anàlisi simplificado de la mecànica de impacte de blocs rocosos sobre sustrato rígid i su aplicació a casos de ensayos de lanzamiento. Treball final de màster. Dpt. d'Enginyeria Civil i Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya. 58 p.
- Matas, G., Lantada, N., Corominas, J., Gili, J., Ruiz, R., Prades, A. RockGIS: a GIS-based model for the analysis of fragmentation in rockfalls. "Landslides", Octubre 2017, vol. 14, núm. 5, p. 1565–1578
- Parras, E. (2019). Diseño y realización de ensayos de lanzamiento de bloques de roca a escala reducida para el estudio de la fragmentación por conminución. Treball final de màster. Dpt. d'Enginyeria Civil i Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya. 137 p.
- Sarro, Roberto & Mateos, Rosa & García-Moreno, Inmaculada & Herrera, G.. (2017). Anàlisi del desprendiment rocoso de Son Poc (Mallorca, 2013) mediante modelización 3d.
- Ruiz Carulla, R. "Rockfall analysis : failure, fragmentation and propagation characterization : a fractal fragmentation of rockfalls". Tesi doctoral, UPC, Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental, 2018. Available at: <http://hdl.handle.net/2117/121044>

Vijayakumar, S. & Yacoub, Thamer & Ranjram, M. & Curran, J.H.. (2012). Effect of rockfall shape on normal coefficient of restitution. 46th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium 2012. 2. 1420-1427.

Stronge, W. (2000). Impact Mechanics. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CB09780511626432

Wang, Y., & Mason, M. T. (1992). Two-dimensional rigid-body collisions with friction. Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME, 59(3), 635-642. <https://doi.org/10.1115/1.2893771>

PROGRAMES

WolframAlpha

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

VideoPad

<https://www.nchsoftware.com/videopad>

Matlab

<https://es.mathworks.com/products/matlab>

ArcGIS

<https://www.esri.es/arcgis/>

OrientationWIN

Cedit pel departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

