Universitat de Girona
Escola Politècnica Superior

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Determinació de la resistència a fractura pel mode II per materials reforçats unidireccionalment utilitzant una prova de càrrega final calibrada (C-ELS) i una longitud efectiva de fissura aproximada

Document: MEMÒRIA I ANNEXOS

Alumne: Darío Yáñez Alabart

Tutor: Emilio Vicente Gonzalez Juan
Departament: Enginyeria mecànica i de la construcció industrial
Àrea: Enginyeria mecànica

Convocatòria (mes/any) Juny 2022

Agraïments

En primer lloc, m'agradaria donar les gràcies al meu tutor d'aquest treball Dr. Gonzalez Juan, Emilio Vicente, per haver-me donat l'oportunitat d'unir-me com a becari al grup de recerca AMADE i confiar en mi en la realització d'aquest projecte.

També donar les gràcies al Sr. Medina, Sergio Alonso, per resoldre els meus dubtes, donar-me les eines necessàries i ajudar-me tots aquests mesos per l'execució d'aquest treball que sense ell no hagués estat possible.

Per finalitzar m'agradaria agrair a la meva família i els meus amics pel suport que m'han donat sempre, i sobretot agrair a la meva parella per tota l'ajuda i comprensió.

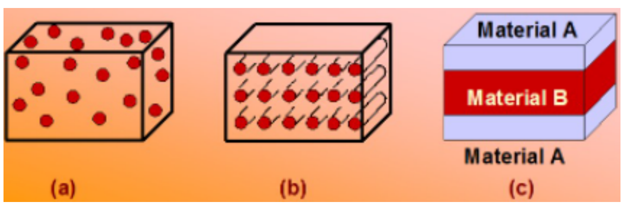
ÍNDEX

MEMÒRIA

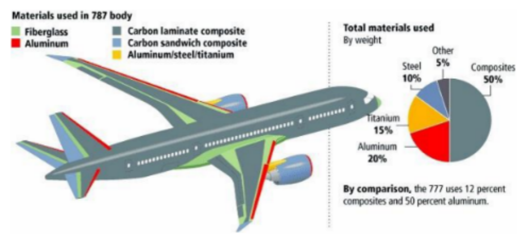
1 INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents.

Els materials compòsits[1] reforçats amb fibra [Il·lustració 1] estan incrementant la seva utilització en la indústria de l'automòbil i aviació [Il·lustració 2] a causa del seu rendiment (Soutis, 2005). Quan s'utilitza en estructures de seguretat en cas d'accident, es requereix una avaluació exhaustiva de la fallada, no només de manera quasi estàtica, sinó que també a altes taxes de càrrega. En aquests casos, una de les propietats més importants del material és la tenacitat a la fractura interlaminar per delaminació.[2]



Il·lustració 1: Material compòsit reforçat amb fibra.



Il·lustració 2: Ús de materials compòsits en un avió.

Exemple: Material (a) (Acer) + Material (b) (Fibra de carboni) = Material compòsit (c)

En el règim quasi estàtic[3], la mesura de la resistència a la fractura per Mode II està ben definida pel ELS (End-Loaded Split) test, terme millor definit en l'apartat 3.2, i descrit en estàndards com la ISO 15114:2014 (2014). A grans rangs de carregues, diferents configuracions de tests i mètodes de reducció de dades han sigut proposats(Cantwell & Blyton, 1999; Compston et al., 2001; Jacob et al., 2005). Tot i això, no hi ha acord sobre la tendència de resistència a la fractura ni el mètode de prova més adequat. Això es deu, en part, a la complexitat d'aquesta anàlisi de les forces inercials i les ones de tensió reflectides implicades, i la seva contribució a l'energia cinètica del sistema(Blackman et al., 1996; Colin de Verdiere et al., 2012).

[1] Material compòsit: Materials que es formen per la unió de dos o més materials per aconseguir la combinació de propietats que no es possible obtenir amb els materials originals.
[2] Tenacitat a la fractura interlaminar per delaminació: Resistència que presenta un material a trencar-se a causa de la separació entre les seves làmines que el composen a partir de la separació de les pròpies.
[3] Règim quasi-estàtic: Sistema que es troba en cada instant de temps en un estat infinitesimalment proper al equilibri.

Anteriorment, un estudiant de doctorar de la Universitat de Girona, Sergio Medina, amb la col·laboració dels professors Emilio González i Norbert Blanco, van realitzar un article d'estudi (Medina et al., 2021) on es planteja el criteri de llindar basat en el temps proposat per Nakamura (Nakamura et al., 2009), mètode quasi estàtic basat en la reducció de dades, com a solució per determinar el temps després el qual els efectes inercials es poden negligir.

1.2 Objecte.

Aquest treball té com a objectiu principal determinar quan és possible considerar treballar en un marc quasi estàtic per poder determinar la resistència a la fractura d'un material compòsit reforçat unidireccionalment[4] amb una esquerda preestablerta pel Mode II, evitant que els efectes inercials interfereixin en la determinació d'aquesta. Se seguirà el procés de determinació realitzat en l'article d'en Sergio Medina (Medina et al., 2021), el criteri de llindar basat en el temps, però en aquest cas pel Mode II en comptes del Mode I.

1.3 Abast.

En aquest estudi s'ha de demostrar que el criteri de llindar basat en el temps és una eina útil per calcular la resistència a la fractura sota grans taxes de càrrega pel Mode II, a més de determinar si l'efecte de la fricció en la zona de l'esquerda influencia en la dissipació d'energia o és negligible. Finalment, s'ha d'arribar a una expressió aproximada basada en el criteri de llindar per definir quan es pot considerar un estat de treball quasi estàtic i poder utilitzar l'equació de resistència de fractura interlaminar pel mode II, ja que en cas contrari els efectes inercials intervindrien i la determinació d'aquesta propietat es complicaria perquè l'equació seria invàlida.

[4] Unidireccionalment: Significa que el material està reforçat per suportar carregues més grans de lo habitual en només una direcció sense que es trenqui.

2 ESTAT DE LA QÜESTIÓ.

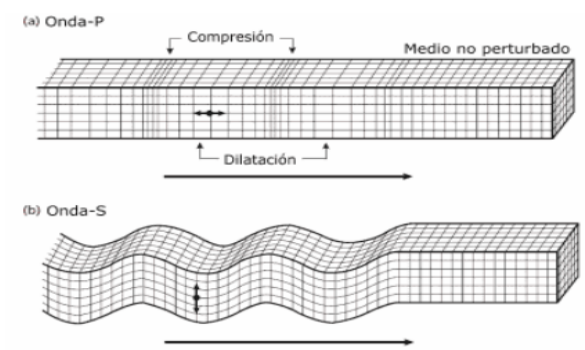
2.1 Problemes i propostes per la determinació de la resistència a la fractura.

A causa de l'efecte de les forces inercials i les ones de tensió, és complex elaborar una anàlisi dinàmica de la resistència a la fractura, ja que aquests dos esdeveniments provoquen una alteració en l'energia cinètica. Per tant, una possible solució seria estudiar la resistència a la fractura en un estat on ni les ones de tensió, ni les forces inercials, interfereixin en càlcul d'aquesta propietat.

2.1.1 Ones de tensió

La contribució cinètica en esdeveniments dinàmics es pot analitzar en diferents escenaris.

1. En el cas d'esdeveniments de càrrega ràpida, les ones de tensió reflectores[5] influeixen en els camps de tensió i deformació, tal i com s'observa en la Il·lustració 3, locals de la punta de l'esquerda, afectant l'inici o la propagació de la fractura.
2. En situacions on les ones de tensió es reflecteixen a la punta de l'esquerda, la intensitat de la tensió s'ha de determinar per a cada cas particular.

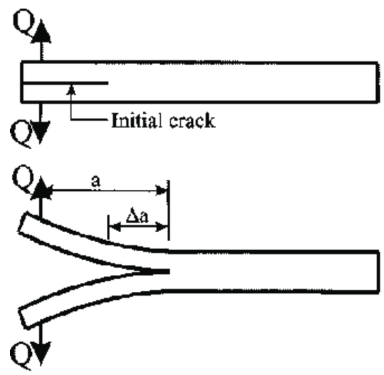


Il·lustració 3: Ones de tensió

[5] Reflexió: canvi de direcció d'un raig o una ona que succeeix sobre la superfície de separació entre dos medis, de manera que el raig reflectit retorna cap el primer.

2.1.2 Proposta per negligir les ones de tensió

Kalthoff et al., (1977) va estudiar l'efecte que tenen les ones d'estrès sobre el factor d'intensitat de tensió a l'aturada de l'esquerda, utilitzant mostres de DCB (Double Cantiveler Beam), o doble biga en validis, sotmeses al Mode I tal i com s'observa a la Il·lustració 4.

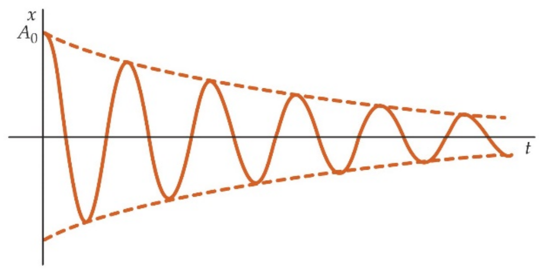


Il·lustració 4: Double Cantiveler Beam

El disseny de la geometria de l'espècimen de DCB comú és tal que les ones d'estrès poden arribar als límits de la mostra i tornar enrere a la punta de l'esquerda en molt poc temps. Així, si l'esdeveniment de fractura té lloc després que les ones elàstiques hagin fet diverses reflexions dins de la longitud de la mostra, es pot ignorar l'efecte de l'ona d'estrès i es pot suposar un equilibri estàtic. Aquesta consideració també és aplicable per una mostra d'ELS (End Loaded Split).

2.1.3 Efectes d'inèrcia

Quan l'estructura es carrega en poc temps, es pot ignorar l'efecte de l'ona d'estrès, però els efectes d'inèrcia poden ser rellevants a causa de les acceleracions del sistema. La càrrega tendeix a augmentar amb el temps, però oscil·la a una freqüència determinada, que depèn del material i la geometria de la mostra. L'amplitud d'aquestes oscil·lacions disminueix amb el temps, ja que l'energia cinètica és esmorteïda, tal i com s'observa a la Il·lustració 5, pel material de mostra, gràcies a la seva elasticitat.



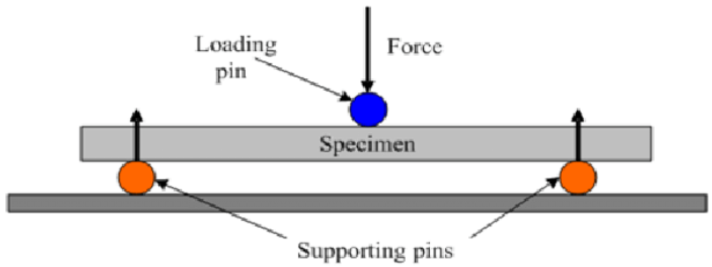
Il·lustració 5: Esmorteïment de l'energia cinètica pel material

2.1.4 Proposta per negligir els efectes d'inèrcia

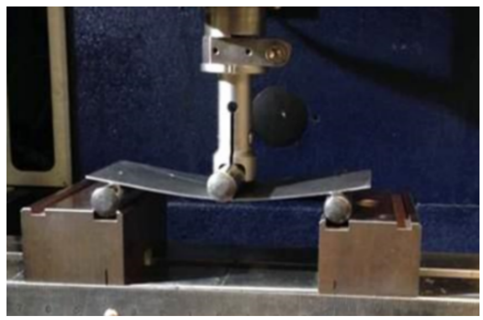
En els casos en què es requereixi una anàlisi dinàmica, es poden utilitzar diferents enfocaments com el proposat per Chen et al. (2020) que elabora una anàlisi ELS de mode II mitjançant una anàlisi de dinàmica i vibració de feixos d'Euler-Bernoulli. Per a esdeveniments de càrrega molt llargs, on el comportament és essencialment quasi estàtic, els efectes d'inèrcia són mínims.

Per tant, en aquests casos l'enfocament quasi estàtic és vàlid. Per avaluar els efectes de la inèrcia en una prova dinàmica, Nakamura et al. (2009) va definir un criteri de temps, el criteri de llindar basat en el temps, definit en l'apartat 2.2, que proporciona una estimació quan els efectes d'inèrcia es poden descuidar en un corbat de tres punts (3PB[6]) tal i com s'observa en la Il·lustració 6 i la Il·lustració 7.

[6] 3PB: "three points bending", en català es tradueix com flexió de tres punts, en el qual dels tres punts, dos son els suports i el tercer és la carrega, que combinats provoquen la flexió de la biga on estan aplicats.



Il·lustració 6: 3 punts de restricció esquema



Il·lustració 7: 3PB real

2.2 Definició del criteri de llindar basat en el temps.

El criteri determina quan un mètode de reducció de dades basat en un règim quasi estàtic pot ser utilitzat per calcular la resistència a la fractura sota grans taxes de càrregues. Per descuidar els efectes d'inèrcia, el criteri defineix un límit entre una càrrega ràpida dominada per ones elàstiques discretes i efectes d'inèrcia, i un temps llarg de càrrega dominada per l'energia elàstica. Bàsicament, es necessita assegurar que el temps quan la fractura comença a propagar-se, referit al temps de fractura t_f, es produeix després que el temps d'aquest criteri, t_c. Aquest temps de llindar s'expressa en funció del temps de transició, t_t.

$$t_f > t_c = \alpha t_t \qquad \text{(Eq. 1)}$$

En altres paraules, el temps de transició es defineix com el temps en què l'energia cinètica és igual a l'energia interna (o energia elàstica), per tant, es poden negligir els efectes de la inèrcia. Aquest temps es compara amb el temps d'iniciació de propagació de la fractura (o temps fins a la fractura), assegurant que l'esdeveniment de fractura es produeixi en un temps més llarg que el temps de transició, per tant, la resposta del sistema estarà dominada per la fonamental deformació estructural elàstica.

El criteri proposat per Nakamura et al. (2009) és que el temps de fractura ha de ser més gran que dues vegades el temps de transició:

$$t_f > 2t_t \qquad \text{(Eq. 2)}$$

Però en aquest treball, igual que en l'article d'en Medina et al. (2021), es considera que els efectes dinàmics en la iniciació de la propagació de la fractura pot ser negligida un cop la ràtio d'energia cinètica a l'energia elàstica (U_k/U_e) es troba per sota del 20%. Per tant, pels cops en què el temps de fractura és més gran que el temps de llindar en el qual la ràtio d'energies està per sota del 20%, es pot considerar que l'esdeveniment dinàmic és proper a un esdeveniment quasi estàtic i, llavors, el mètode de reducció de dades quasi estàtic pot ser utilitzat. D'aquesta forma es dona el marge suficient per negligir els efectes inercials.

En conseqüència es trobarà la variable α per definir el temps de llindar en funció del temps de transició i haurà de ser una equació pròxima a la (Eq. 2) proposada per Nakamura et al. (2009).

2.3 Resistència de la fractura interlaminar.

A continuació es mostra l'equació estàtica de la resistència a la fractura d'un material compòsit reforçat unidireccionalment amb una esquerda preestablerta amb una càrrega en mode II. La (Eq. 3) és obtinguda de la normativa ISO 15114:2014 (2014) basada en la teoria de bigues simple.

$$G_{IIC} = \frac{9P^2a^2}{4b^2h^3E_1} \qquad \text{(Eq. 3)}$$

P és la càrrega.

h és la meitat del gruix de tota la proveta.

b és l'amplada.

E_1 és el mòdul de Young del material.

a és la longitud d'esquerda.

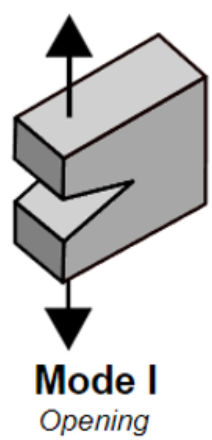
En el cas que no treballes en el règim quasi estàtic, els efectes inercials comportarien un problema a la determinació de la tenacitat a la fractura i ,per tant, aquesta equació no seria vàlida.

2.4 Tipus de modes.

Fins ara, hem tractat una condició de càrrega molt específica en la qual s'aplica una força de tracció perpendicular a l'esquerda, és a dir, la força és vertical mentre que l'esquerda és horitzontal. Aquesta és l'orientació natural per estudiar al principi. Però no és l'únic possible.

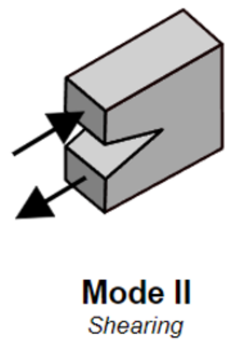
En general, un objecte es pot carregar en qualsevol direcció relativa a l'esquerda. És majoritàriament perpendicular a l'esquerda, però també conté components que produeixen cisalla dins i fora del pla.

- Mode I [Il·lustració 8]: La càrrega del mode I es produeix amb més freqüència i produeix més danys. Per això, naturalment, rep l'atenció més gran en investigació, disseny estructural, anàlisi de fallades, etc. Se l'anomena habitualment mode d'obertura.



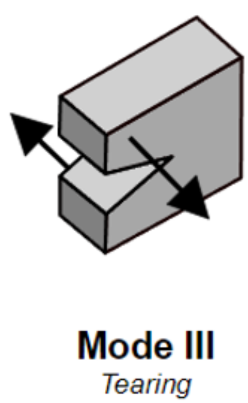
Il·lustració 8: Mode I

- Mode II [Il·lustració 9]: Correspon al cisallament de la cara de l'esquerda a causa dels esforços de tall en el pla. Probablement, rep la segona més atenció perquè el problema encara és en 2-D, ja que tota l'acció és en el pla. La càrrega del mode II influeix en la direcció del creixement de les esquerdes d'una manera que minimitza la càrrega addicional del mode II alhora que maximitza el mode I. Aquest és el mode que s’estudia en l’estudi present.



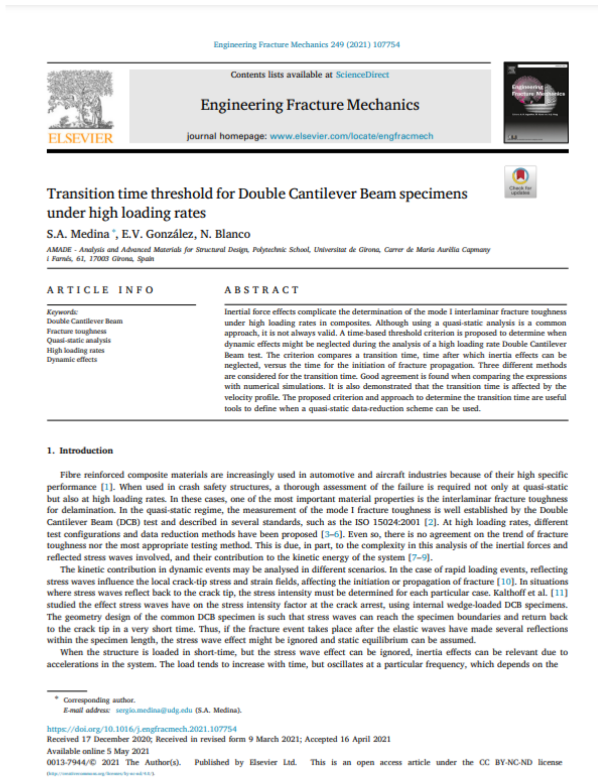
Il·lustració 9: Mode II

- Mode III [Il·lustració 10]: El mode III és el mode de trencament per raons òbvies. Està impulsat per esforços de tall fora del pla i no sembla que es produeixi tan sovint com els altres dos.



Il·lustració 10: Mode III

2.5 Estudi anterior pel mode I.



Engineering Fracture Mechanics 249 (2021) 107754

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering Fracture Mechanics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/engfracmech

Transition time threshold for Double Cantilever Beam specimens under high loading rates

S.A. Medina *, E.V. González, N. Blanco

AMADE - Analysis and Advanced Materials for Structural Design, Polytechnic School, Universitat de Girona, Carrer de Maria Aurèlia Capmany i Farnés, 61, 17003 Girona, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:
Double Cantilever Beam
Fracture toughness
Quasi-static analysis
High loading rates
Dynamic effects

ABSTRACT

Inertial force effects complicate the determination of the mode I interlaminar fracture toughness under high loading rates in composites. Although using a quasi-static analysis is a common approach, it is not always valid. A time-based threshold criterion is proposed to determine when dynamic effects might be neglected during the analysis of a high loading rate Double Cantilever Beam test. The criterion compares a transition time, time after which inertia effects can be neglected, versus the time for the initiation of fracture propagation. Three different methods are considered for the transition time. Good agreement is found when comparing the expressions with numerical simulations. It is also demonstrated that the transition time is affected by the velocity profile. The proposed criterion and approach to determine the transition time are useful tools to define when a quasi-static data-reduction scheme can be used.

1. Introduction

Fibre reinforced composite materials are increasingly used in automotive and aircraft industries because of their high specific performance [1]. When used in crash safety structures, a thorough assessment of the failure is required not only at quasi-static but also at high loading rates. In these cases, one of the most important material properties is the interlaminar fracture toughness for delamination. In the quasi-static regime, the measurement of the mode I fracture toughness is well established by the Double Cantilever Beam (DCB) test and described in several standards, such as the ISO 15024:2001 [2]. At high loading rates, different test configurations and data reduction methods have been proposed [3–6]. Even so, there is no agreement on the trend of fracture toughness nor the most appropriate testing method. This is due, in part, to the complexity in this analysis of the inertial forces and reflected stress waves involved, and their contribution to the kinetic energy of the system [7–9].

The kinetic contribution in dynamic events may be analysed in different scenarios. In the case of rapid loading events, reflecting stress waves influence the local crack-tip stress and strain fields, affecting the initiation or propagation of fracture [10]. In situations where stress waves reflect back to the crack tip, the stress intensity must be determined for each particular case. Kalthoff et al. [11] studied the effect stress waves have on the stress intensity factor at the crack arrest, using internal wedge-loaded DCB specimens. The geometry design of the common DCB specimen is such that stress waves can reach the specimen boundaries and return back to the crack tip in a very short time. Thus, if the fracture event takes place after the elastic waves have made several reflections within the specimen length, the stress wave effect might be ignored and static equilibrium can be assumed.

When the structure is loaded in short-time, but the stress wave effect can be ignored, inertia effects can be relevant due to accelerations in the system. The load tends to increase with time, but oscillates at a particular frequency, which depends on the

* Corresponding author.
E-mail address: sergio.medina@udg.edu (S.A. Medina).

https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.107754
Received 17 December 2020; Received in revised form 9 March 2021; Accepted 16 April 2021
Available online 5 May 2021

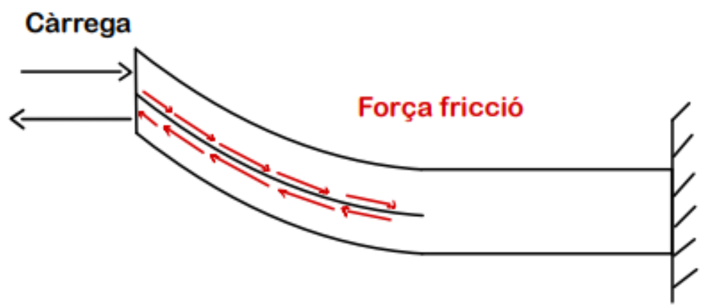
Il·lustració 11: Paper temps de transició mode I

La tenacitat a la fractura pel mode I, ja ha sigut estudiat per l'enginyer Sergio Medina conjuntament amb la col·laboració d'Emilio Vicente Gonzalez i Norbert Blanco (Medina et al., 2021). S'aplica tres mètodes diferents per determinar el temps de transició, que defineix el temps del criteri de llindar, per a un test de DCB (aproximació analítica, aproximació basada numèricament i mètode gràfic). Els seus resultats mostren que l'enfocament proposat per determinar el temps de transició i l'ús del temps basat en el criteri de llindar, podrien ser eines útils per definir quan es pot aplicar un esquema de reducció de dades quasi estàtic per calcular la tenacitat a la fractura mitjançant el mode I en proves de DCB d'obertura simètrica sota altes taxes de càrrega.

Ara bé, en aquest estudi se seguirà el mateix model de procediment però pel mode II.

2.6 Efecte de la fricció

Un paràmetre nou que apareix en aquest estudi, a diferència del Mode I, és la fricció. La fricció té lloc entre els dos braços formats per l'esquerda els quals llisquen entre ells, tal i com s'observa en la Il·lustració 12, quan l'alçada del punt d'aplicació de la força va incrementant. Per tant, és importar comprovar l'efecte d'aquest paràmetre per veure si s'haurà d'incloure en la fórmula del temps de transició o no.



Il·lustració 12: Força de fricció

L'efecte de la fricció en els diferents tests pel Mode II també ha sigut àmpliament debatut i normalment ha introduït errors entre l'1 i el 3% de la determinació de G_{IIC} (taxa d'alliberament d'energia crítica per a la càrrega de cisalla en Mode II o, en altres paraules, tenacitat a la fractura) per exemplars d'ELS (ISO 15114:2014, 2014). Inicialment, es farà l'estudi sense tenir en compte la fricció per determinar el temps de transició, i més tard es compararà aplicant diversos coeficients de fricció per comprovar si comporta un efecte significant.

3 METEDOLOGIA.

3.1 Esquema de tasques a realitzar en aquest estudi:

1. Determinar l'equació del temps de transició: En aquesta part, per determinar l'equació del temps de transició es porta a terme tres aproximacions.

    1.1. Primera aproximació (analítica): anàlisi analítica de les energies i generació d'equació de temps de transició.

    1.2. Segona aproximació (basat numèricament): Deducció d'una expressió basada numèricament utilitzant el teorema de PI Buckingham(Sonin, 2004) i simulacions FE[7] (Elements finits).

    1.3. Tercera aproximació (gràfica): Anàlisi de l'evolució de la ràtio d'energia versus un paràmetre adimensional de temps basat en simulacions FE. Aquesta aproximació és la més realista, però no proporciona una fórmula, sinó que mostra el temps de transició més realista, que s'haurà de comparar amb els mètodes anteriors per escollir quina fórmula és la més adequada per definir el temps de transició.

2. Comprovació de l'efecte de la fricció: La tasca anterior es realitzarà principalment sense tenir en compte la força de fricció entre els dos braços que forma l'esquerda. Per tant, es farà una comparació del temps de transició afegint fricció i utilitzant el mètode gràfic. Si finalment el temps de transició, entre la proveta sense fricció amb la qual si té fricció, són molt semblants, es podrà considerar negligir la fricció.

3. Determinació de temps de fractura: a partir d'una proveta dissenyada en el programa Abaqus, amb les propietats que indica la normativa (ISO 15114:2014, 2014) i amb el mètode gràfic, es trobarà per diferents velocitats el temps de fractura.

[7] FE: Vol dir element finits i consta en una eina de càlcul que consisteix en crear un model degudament simplificat i informatitzat d'un objecte o conjunt d'objectes, sotmetre'l a una sol·licitació degudament simplificada i analitzar-ne uns resultats específics.

4. Comparació del temps de fractura amb el temps de transició per comprovar si el mètode de reducció de dades basada en una anàlisi quasi estàtica (criteri de llindar basat en el temps) es pot utilitzar per calcular la tenacitat a la fractura a una taxa de càrrega elevada determinada.

3.2 Mode II.

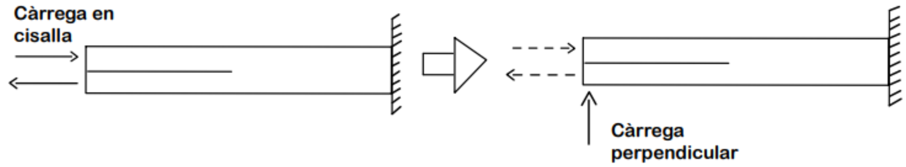
Intents anteriors per determinar les corbes de resistència a la laminació pel mode II per compòsits, ha estat obstaculitzat per la dificultat experimental de determinació de la longitud de l'esquerda en absència de qualsevol moviment d'obertura de la biga (a diferència del mode I) i quan una zona complexa de danys es desenvolupa per davant del front de l'esquerda (ISO 15114:2014, 2014)

El mètode per trobar la resistència a la delaminació de càrrega de cisalla en mode II, s'utilitza el G_{IIC} de materials plàstics compostos reforçats unidireccionalment amb fibra utilitzant la prova de divisió de càrrega final calibrada (C-ELS). És aplicable a la fibra de carboni i a la fibra de vidre reforçat amb termoestables[8] o termoplàstics[9].

Aquest procediment especifica un mètode per a la determinació de la resistència a la delaminació de materials polímers[10] reforçats unidireccionalment amb fibra sota càrrega de cisalla pel mode II fent servir el test de la divisió de càrrega final calibrada (C-ELS).

Com que seria complicat a la realitat aplicar una càrrega en cisalla i que segueixi el moviment dels braços, es canvia per una càrrega perpendicular que provoca el mateix efecte, tal i com s'observa a la Il·lustració 13.

[8] Termoestable: polímer infusible e insoluble.
[9] Termoplàstic: plàstic rígid a temperatura ambient, però mal·leables a temperatures altes.
[10] Polímers: de compost químic on les molècules s'uneixen en cadenes llargues de repetició.

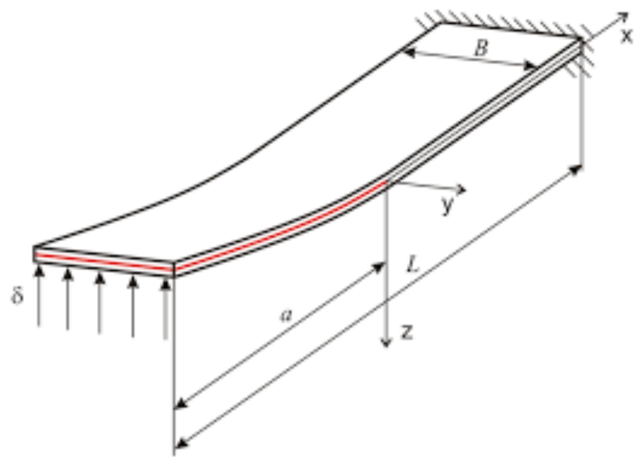


Il·lustració 13: Força aplicada.

3.3 Representació i paràmetres de la proveta.

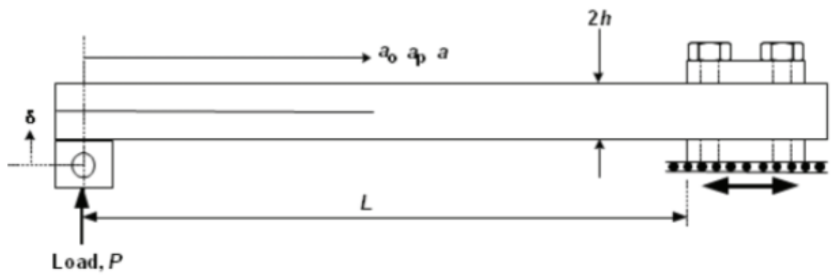
Tal i com s'observa en la Il·lustració 14, un extrem de la proveta està encastada, mentre que l'altre se li aplica un desplaçament.

"A partir d'ara, tots els símbols, variables i abreviatures es troben en l'annex A.1 Nomenclatura.*"*



Il·lustració 14: ELS perspectiva isomètrica

Tal i com s'observa a la Il·lustració 15, el gruix total de la proveta és $2h$, però cada braç generat a partir de l'esquerda té un gruix igual de h.



Il·lustració 15: Perfil de ELS

L= Longitud de la proveta.

$B\ /\ b$ = Amplada de la proveta (en tot l'estudi s'utilitza b)

a_0 = Longitud d'esquerda.

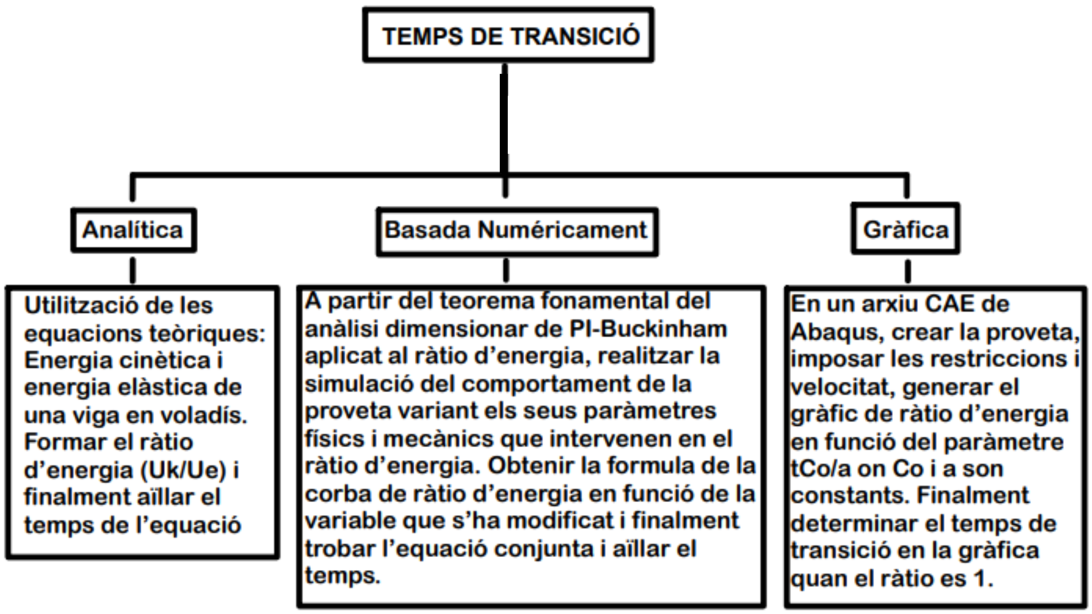
P = Carrega externa.

h = Gruix de braç de la proveta (l'esquerda és formada just a la meitat del gruix total de la proveta, i cada braç que forma té un gruix de h, per això el gruix total és 2h).

δ = Desplacament del punt de càrrega.

3.4 Les tres metodologies pel temps de transició

Per realitzar la determinació del temps de transició, se seguiran tres mètodes, tal i com s'observa en la Il·lustració 16, igual que l'estudi pel Mode I (Medina et al., 2021).



Il·lustració 16: Les tres aproximacions del temps de transició.

El millor mètode per trobar el temps de transició és la determinació gràfica, ja que és el més real en donar el temps de transició realitzant una simulació realista per ordinador. Però a vegades només es té la informació experimental, per tant, caldria l'equació que defineixi el temps de transició. Per la qual cosa es troba l'equació analítica (basada en la teoria de bigues d'Euler-Bernoulli) i l'equació basada numèricament (que s'obté a partir de simulacions FE no lineals).

Un cop obtingut el temps de transició pel mètode gràfic i les formules analítica i basada numèricament, es troba el temps de transició d'aquestes dues fórmules i se selecciona la fórmula que presenti una aproximació major al temps de transició del mètode gràfic.

3.4.1 Definició de la determinació analítica del temps de transició

En aquesta primera part, es troba el temps de transició de forma teòrica. Aquest temps de transició es determina amb la ràtio d'energies (U_k/U_e) igual a 1, ja que és el temps a partir el qual els efectes d'inèrcia es poden negligir, és a dir, el temps el qual l'energia cinètica i interna són iguals. Es basarà en les fórmules físiques bàsiques de l'energia cinètica i elàstica, com la teoria de bigues d'Euler-Bernoulli.

3.4.2 Definició de la determinació basada numèricament del temps de transició

S'utilitza un marc adimensional[11] basat en el teorema de PI-Buckingham (Sonin, 2004) (en l'apartat A.7 Teorema de PI-Buckingham es descriu el teorema) combinat amb una anàlisi inversa per la determinació numèrica del temps de transició. L'ús de simulacions FE (elements finits) permet obtenir un temps de transició precís que tingui en compte els efectes negligits per la metodologia teòrica. A més, el marc adimensional permet estudiar l'escalabilitat de resultats entre diferents geometries i materials, per tant, si compleix, es podrà fer servir aquest mètode per qualsevol mida geomètrica de la proveta sempre que es mantinguin constants els paràmetres PI.

3.4.3 Definició de la determinació gràfica del temps de transició

Aquesta tercera metodologia està basada en la representació gràfica de l'evolució de la ràtio d'energia en vers al temps obtingut a través de les simulacions FE. Seguint el mateix concepte de Nakamura(Nakamura et al., 2009), els valors del temps de transició és assolit quan la ràtio d'energia és igual a 1 ($Uk/Ue = 1$).

[11] Adimensional: Significa que no té dimensió física

3.5 Comprovació del temps de transició.

Una anàlisi paramètrica d'elements finits es porta a terme per validar les capacitats del teorema de PI-Buckinham (Sonin, 2004) i l'expressió del temps de transició en termes d'escalabilitat geomètrica i similitud dinàmica. Aquesta anàlisi considera un gran rang d'escenaris, variant les variables geomètriques i propietats de material mentre es manté la resta de PI-paràmetres constant. A més, dues situacions es tindran en compte: Velocitat constant (D=1) i acceleració constant (D=2), on D és el nombre de Nakamura et al. (2009) i els seus valors d'1 i 2 es defineixen en l'Annex A.9 Nombre de Nakamura (D). Un cop realitzat l'estudi, es compararà el mètode analític i basat numèric amb el gràfic, per determinar quina de les dues fórmules és la més adient. Finalment per comprovar que les equacions analítica i basada numèrica són correctes, haurien de proporcionar un valor de temps de transició molt semblant.

3.6 Comprovació del efecte de la fricció.

Per poder observar els efectes de la fricció, s'utilitzarà el mateix procediment que el mètode gràfic del temps de transició, a diferència d'anar aplicant diversos factors de fricció per observar el comportament del temps de transició. Finalment, es compara el temps de transició que s'originen per diferents factors de fricció amb el temps de transició sense fricció. En cas que hi hagi molta diferència, voldrà dir que els efectes de la fricció si afecten la dissipació d'energia i , per tant, s'hauria d'aplicar en la ràtio d'energia.

3.7 Temps de fractura.

Per determinar el temps de fractura es porta a terme l'estudi dels efectes per diferents velocitats i el seu valor màxim quan és considerada la iniciació de la propagació d'esquerda. Per tant, s'utilitzarà el model d'elements finits (FE) del mètode gràfic.

Es porta a terme un estudi de l'efecte del màxim valor de la velocitat aplicada en el temps de fractura, considerant una velocitat constant (D=1) i una acceleració constant (D=2). Diverses velocitats màximes són considerades per obtenir un ampli rang de càrregues i per determinar els límits de velocitat que ha de complir el criteri de llindar basat en el temps per aplicar una anàlisi quasi estàtica.

4 DETERMINACIÓ ANALÍTICA DEL TEMPS DE TRANSICIÓ.

4.1 Energia cinètica

Partint de la formula d'energia cinètica bàsica:

$$Uk = \frac{1}{2}\, m * v^2 \tag{Eq. 4}$$

i adaptant-la en la proveta que s'analitza, acaba tenint la forma:

$$Uk = \frac{33}{140} pbh\dot{\delta}^2 L \tag{Eq. 5}$$

4.2 Energia elàstica

$$U_e = \frac{1}{2}\frac{\delta^2}{C} \tag{Eq. 6}$$

On substituït la compliància (C):

$$U_e = \frac{1}{2}\frac{\delta^2 2bh^3 E_1}{3a^3 + L^3} \tag{Eq. 7}$$

El seu desenvolupament es pot trobar en l'Annex A.4 Compliància.

4.3 Ràtio d'energia

Simplement cal dividir l'energia cinètica amb la elàstica i simplificar.

$$\frac{U_k}{U_e} = \frac{33pbh\dot{\delta}^2 L(3a^3+L^3)}{140\delta^2 bh^3 E_1} \quad \text{(Eq. 8)}$$

Per obtenir la formula en funció de la velocitat de propagació d'ona Co, es substitueix la densitat p:

$$\frac{U_k}{U_e} = \frac{33\dot{\delta}^2 L(3a^3+L^3)}{140\delta^2 h^2 {C_0}^2} \quad \text{(Eq. 9)}$$

El desenvolupament d'aquesta equació es troba en l'apartat l'apèndix A.6 Ràtio d'energies

4.4 Temps de transició analític.

I com que l'objectiu principal és determinar el temps de transició, és convenient introduir el desplaçament adimensional D definit per Nakamura et al. (2009):

$$D = \frac{t\dot{\delta}}{\delta} \quad \text{(Eq. 10)}$$

$$\frac{D}{\mathrm{t}} = \frac{\dot{\delta}}{\delta} \quad \text{(Eq. 11)}$$

.

Finalment substituint a l'equació de ràtio d'energia:

$$\frac{U_k}{U_e} = \frac{33D^2 L(3a^3 + L^3)}{140{t_\tau}^2 h^2 {C_0}^2} \quad \text{(Eq. 12)}$$

I si es vol en funció del temps de transició:

$$t_\tau = \left(\frac{33D^2L(3a^3 + L^3)}{140h^2{C_0}^2}\right)^{1/2} \quad \text{(Eq. 13)}$$

5 DETERMINACIÓ BASADA NUMÈRICAMENT DEL TEMPS DE TRANSICIÓ.

En aquest apartat es trobarà la formula del temps de transició de forma experimental amb simulacions realitzades amb el programari Abaqus en base al teorema fonamental del anàlisi dimensional PI-Buckingham(Sonin, 2004).

Gràcies a aquest mètode es podrà trobar una equació homogènia, més precisa i, en el millor del casos, reduïda del temps de transició a comparació del mètode teòric.

A partir de la (Eq. 12) es troba que les variables que afecten al ràtio d'energia són les següents:

$$\frac{U_k}{U_e} = f(\delta, t, \dot{\delta}, a_0, C_0, h, b, L) \quad \text{(Eq. 14)}$$

Com que les magnitud físiques que intervenen només son la longitud {L} i el temps {T}, Només es pot escollir dos variables repetides. Seguint l'estudi anterior realitzat per Medina et al. (2021), les variables repetides son a_0(longitud inicial de l'esquerda) i t (temps).

$$\frac{U_k}{U_e} = f\left(\frac{tc_0}{a_0}, \frac{t\dot{\delta}}{\delta}, \frac{h}{a_0}, \frac{b}{a_0}, \frac{L}{a_0}\right) \quad \text{(Eq. 15)}$$

El desenvolupament es troba en l'Annex A.7.

Seguidament l'objectiu es trobar unes gràfiques de la ràtio d'energia en funció de la variació dels PI-paràmetres, agrupar les equacions de la corba que formen les gràfiques resultants i així trobar una formula molt més aproximada i precisa del temps de transició ja que les simulacions comprenen aspectes que les formules teòriques no tenen en compte.

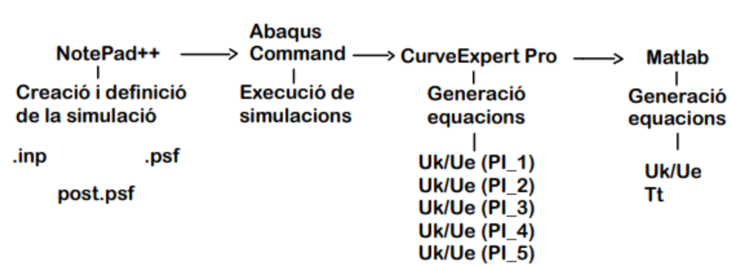
Cada simulació correspon a un resultat del ràtio d'energia per cada valor que s'assigna a la variable de cada PI-paràmetre mostrat a la Taula 1.

Pi	Variable	Valor mínim	Valor màxim	Increment	# Simulacions
1	Co	2.00E+06	1.40E+07	2.50E+05	49
2	$\dot{\delta}$	100	4000	100	40
3	h	0.6	3	0.1	25
4	b	10	40	1	31
5	L	80	200	5	25
				Total simulacions	155

Taula 1: Rang de les variables

Per exemple pel primer PI-paràmetre, començant per la variable Co i assignar-li el primer valor de 2.00E6, donarà un valor de ràtio d'energia (Uk/Ue) i així successivament amb la resta de Co. Després es repeteix el mateix procediment per la resta de PI-paràmetres.

Finalment es genera la gràfica de ràtio d'energia amb cada valor obtingut en funció del valor del PI-paràmetre. Si la corba de una gràfica és totalment horitzontal, es a dir que sempre té el mateix valor de ràtio d'energia encara que es canviï la variable, vol dir que podem negligir aquesta variable de la formula final del temps de transició. Tal i com es pot observar a la Il·lustració 17, el procediment per obtenir els valors requereix l'ús de diferents programes.



Il·lustració 17: Procediment de l'equació del temps de transició

Gràcies al Excel es poden trobar les gràfiques que s'originen amb les formules teòriques i amb les simulacions generades pel Abaqus i controlades i determinades per el programa Notepad C++ [B. PROGRAMACIÓ], ens donarà els valors experimentals de ràtio d'energia per trobar les gràfiques experimentals.

D'aquesta forma podem comparar les gràfiques teòriques i experimentals en l'Excel i comprovar que són semblants [C.3 Comparació Teòric-Experimental].

Una de les conclusions que es poden assumir gràcies a les gràfiques del Annex C2. Gràfiques experimentals., és que es pot negligir el paràmetre b (amplada), ja que no afecta al ràtio d'energia encara que variem aquesta dada.

Un cop obtinguts tots els valors experimentals, es passen al programa CurveExpertPro [D. GUIA C] (excepte pel PI_4), per generar les gràfiques i trobar les equacions característiques de les corbes (una equació per cada PI-paràmetre).

$$PI_1 = 1,3011E^5 * \left(\frac{tCo}{a}\right)^{-2.2672} \quad \text{(Eq. 16)}$$

$$PI_2 = 2.4972E^{-1} - 5,825E^{-1} * \left(\frac{\dot{\delta}t}{\delta}\right) + 5,4056E^{-1} * \left(\frac{\dot{\delta}t}{\delta}\right)^2 - 1,4484E^{-2} * \left(\frac{\dot{\delta}t}{\delta}\right)^3 + 1,4902E^{-3} * \left(\frac{\dot{\delta}t}{\delta}\right)^4 \quad \text{(Eq. 17)}$$

$$PI_3 = 6,8699E^{-5} * \left(\frac{h}{a}\right)^{-2,24497} \quad \text{(Eq. 18)}$$

$$PI_5 = 9,2536E^{-3} * \left(\frac{a}{L}\right)^{-4,6476} \quad \text{(Eq. 19)}$$

Finalment un cop s'obté les formules de les diferents corbes de cada PI-paràmetre, s'adjunten les formules en el MatLab [E. GUIA M] i ens proporcionarà la formula del ràtio d'energia i del temps de transició produïda per les simulacions.

$$\frac{\mathrm{U_k}}{\mathrm{U_e}} = \frac{\mathrm{L}^{4.6476}(0.00409\mathrm{D}^4 - 0.039750\mathrm{D}^3 + 0.14835\mathrm{D}^2 - 0.15986\mathrm{D} + 0.06853)}{\mathrm{a}^{0.44}\mathrm{c_o}^{2.2672}\mathrm{h}^{1.9404}\mathrm{t}^{2.2672}} \quad \text{(Eq. 20)}$$

$$t_\tau = \left(\frac{L^{4.6476}(0.00409D^4 - 0.03975D^3 + 0.14835D^2 - 0.15986D + 0.06853)}{a^{0.44}c_o^{2.2672}h^{1.9404}}\right)^{0.4411} \quad \text{(Eq. 21)}$$

El Matlab simplement multiplica les equacions de PI, però si el resultat no s'assembla al geomètric, vol dir que se li ha d'aplicar un factor multiplicant. Aquest factor té un valor de 55 i el seu valor es determina simplement en Matlab realitzant un "fitting", o en altres paraules, crear una aproximació fins que el temps de transició sigui igual al analític per exemple en el cas del material acer, paràmetres els quals es troben en la Taula 2 i la Taula 3, provant diferents valors multiplicant. Finalment les equacions tant de la ràtio d'energia com el temps de transició basats numèricament són:

$$\frac{\mathrm{U_k}}{\mathrm{U_e}} = 55\,\frac{\mathrm{L}^{4.6476}(0.00409\mathrm{D}^4 - 0.039750\mathrm{D}^3 + 0.14835\mathrm{D}^2 - 0.15986\mathrm{D} + 0.06853)}{\mathrm{a}^{0.44}\mathrm{c_o}^{2.2672}\mathrm{h}^{1.9404}\mathrm{t}^{2.2672}} \qquad \text{(Eq. 22)}$$

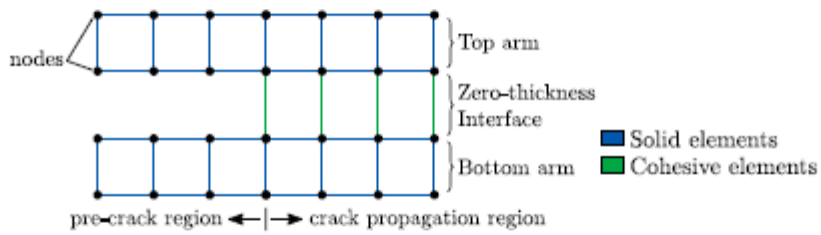
$$t_\tau = \left(55\,\frac{L^{4.6476}(0.00409D^4 - 0.03975D^3 + 0.14835D^2 - 0.15986D + 0.06853)}{a^{0.44}c_o^{2.2672}h^{1.9404}}\right)^{0.4411} \qquad \text{(Eq. 23)}$$

6 DETERMINACIÓ GRÀFICA DEL TEMPS DE TRANSICIÓ.

Amb el programa Abaqus CAE, es dissenya la proveta i s'apliquen les restriccions i paràmetres per defecte que s'ha anat seguint durant les metodologies anteriors. En aquest apartat no només és realitzarà el cas considerat, sinó que també es realitzarà un estudi d'escalabilitat, mantenint PI_2, PI_3 i PI_4 constants per assegurar que el mètode de PI-Buckinham (Sonin, 2004)és funcional.

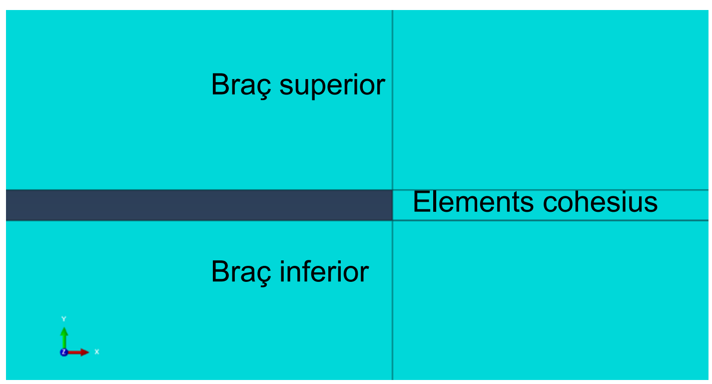
6.1.1 Model FE

En aquest nou model, la malla és redefinida i els elements cohesius (COH3D8), de gruix zero, tal i com s'observa en la Il·lustració 18, la Il·lustració 19 i la Il·lustració 20, son afegits per capturar l'inici de la delaminació(Soto et al., 2016). El comportament del constitutiu cohesiu considerat, és de la llibreria d'Abaqus, on l'inici de la delaminació es defineix per un criteri quadràtic basat en les tensions, mentre que la propagació de la delaminació es caracteritzada per el criteri de mode mixt basat en l'energia proposat per Benzeggagh i Kenane (1996).



Il·lustració 18: Esquema de posició dels elements cohesius

Il·lustració 19: Model FE en Abaqus.



Il·lustració 20: Augment de visió en l'inici de l'esquerda.

Tot el procediment per dissenyar el model FE pel mètode gràfic es troba en l’Annex F. GUIA PER REALITZAR LES SIMULACIONS EN A

6.1.2 Assignació de diferents materials i geometries per comprovar el teorema de PI Buckinham.

Quatre diferents materials són considerats els quals les seves propietats es mostren en la Taula 2.

Material	$\rho\ (kg/m^3)$	$E_1(GPa)$	V_{12}	$C_0 = (E/\rho)^{\frac{1}{2}}$
Acer	7850	210	0,3	5421,9
AS4/8552	1590	128	0,35	9578,2
TeXtreme	1500	61,4	0,042	6405,3

Taula 2: Propietats de materials.

Les propietats del AS4/8552 son esmentades en l'article Soto, et al., (2018b), mentre que els paràmetres del TeXtreme es troben en l'article Soto et al., (2018c).

En lo que respecta a la geometria de la proveta, es realitzarà tres casos diferents, tal i com s'observa a la Taula 3, sempre respectant en que els PI-paràmetres siguin iguals tal i com s'observa en Taula 4, per comprovar l'escalabilitat del teorema de PI-Buckinham:

Geometria escalabilitat	Cas 1	Cas 2	Cas 3
$a\ (mm)$	60	120	45
$L\ (mm)$	20	40	15
$b\ (mm)$	120	240	90
$h\ (mm)$	1.5	3	1.125

Taula 3: Geometries per diferents casos.

PI-Paràmetres	Cas 1	Cas 2	Cas 3
PI_1 (tC_0/a)	319.272568	319.272568	319.272568
PI_2 $(t\dot{\delta}/\delta)$	2	2	2
PI_3 (h/a)	0.025	0.025	0.025
PI_4 (b/a)	0.333333333	0.333333333	0.333333333
PI_5 (L/a)	2	2	2

Taula 4: Valors constants de PI per cada cas.

Per la validació del criteri de llindar, la geometria utilitzada serà segons els requisits de la normativa ISO 15114:2014 (2014), tal i com s'observa en la Taula 5, que és la recomanada per fer assajos de fractura, ja que s'utilitzarà el temps de transició de la proveta amb el material AS4/8552 per comparar amb el temps de fractura (en la fractura s'ha de complir que $\frac{a}{L} > 0{,}55$).

Geometria normativa	mm
$a\ (mm)$	60
$h\ (mm)$	1.5
$b\ (mm)$	20
$L\ (mm)$	100

Taula 5: Geometria normativa

Cal remarcar que com ja s'ha demostrat en que el paràmetre b (amplada) no afecta al ràtio d'energia, és a dir que es pot negligir, els models en el mètode gràfic es realitzen en 2D ja que a causa de la gran quantitat d'elements que implica realitzar el model en 3D, cada simulació podria durar dies.

6.1.3 Validació dels diferents mètodes proposats per determinar el temps de transició.

El diferents mètodes per determinar el temps de transició poden ser validats utilitzant un anàlisis d'escalabilitat. Primer l'evolució del ràtio d'energia en vers el temps obtingut a partir de les simulacions FE tant per D=1 (Velocitat constant) com per D=2 (Acceleració constant), pels diferents casos i materials, i per cada mètode de determinació. Pel mètode analític i basat numèric només cal assignar les dades de la Taula 2 i la Taula 3 a les equacions, però pel mètode gràfic cal realitzar les simulacions amb Abaqus. Per cada material, s'han de simular tres casos de geometries diferents però que mantenen els mateixos valors de PI de la Taula 4. Les gràfiques resultats son les següents:

Però si es realitza la gràfica en vers el paràmetre de temps adimensional PI1 (tC_0/a), per cada simulació de FE, a_0 i C_0 es mantenen constants i només el temps varia. Voldrà dir que les corbes no dependran del material, ni de la longitud d'esquerda inicial a_0 i al tenir els mateixos valors de PI's, les corbes han de ser idèntiques tant per D=1 com per D=2 , per a que es compleixi l'escalabilitat del teorema de PI-Buckinham(Sonin, 2004).

7 ESTUDI DEL EFECTE DE FRICCIÓ.

Els factors de fricció que s'utilitzaran per veure la seva importància en el sistema son els següents:

CAS 2 μ = 0.1 CAS 3 μ = 0.2 CAS 4 μ = 0.4

Per poder veure els resultats es seguirà el procediment del annex , modificant els paràmetres per cada cas. A més també s'ha de veure com afecta al temps de transició per D = 1 i D = 2. Un cop executat la simulació amb els paràmetres que li corresponen a cada cas, es genera la gràfica Uk/Ue en vers al temps, i es realitza una interpolació (amb un valor per sobre de Uk/Ue = 1 i un altre per sota per trobar el temps de transició quan Uk/Ue = 1).

Per finalitzar es calcula l'error relatiu entre el cas sense fricció amb els casos que sí tenen fricció. Segons la (ISO 15114:2014, 2014), l'efecte de la fricció normalment introdueix errors entre 1% i el 3%, per tant l'error relatiu hauria de situar-se entre aquests valors per poder negligir l'efecte de la fricció entre els dos braços.

8 DETERMINACIÓ DEL TEMPS DE FRACTURA.

Finalment per la determinació de la fractura, es realitzen simulacions FE a la proveta ELS per la geometria de la normativa, i a diferents velocitats en el punt de càrrega, i es recull el temps el qual s'inicia la fractura.

Per poder obtenir el temps de fractura, s'incrementa el temps de simulació a un valor molt més alt que en les simulacions d'escalabilitat i material. En aquest cas s'imposa un temps de 0.008 s i seguidament s'executen les simulacions a diferents velocitats i diferent nombre de Nakamura (D=1 i D=2). Les velocitats que s'han aplicat són les següents:

Vel. 1 = 2m/s Vel. 2 = 6 m/s Vel. 3 = 15 m/s

Per poder saber quan comença la fractura, en els resultats obtinguts es comprova el paràmetre SDEG (Degradació de la rigidesa a escala) i el temps de fractura comença quan SDEG màxim te valor de 1, és a dir quan comença la ruptura dels elements cohesius o en altres paraules que es propaga l'esquerda. El procés per trobar el temps de fractura es troba en l'Annex F.9.2 Temps de fractura.

També s'haurà de trobar la velocitat màxima per sota la qual l'estudi quasi estàtic es possible.

9 DETERMINACIÓ DEL COEFICIENT DE SEGURETAT.

Un cop s'obté el temps de fractura i el temps de transició, l'únic component que faltaria es el coeficient de seguretat α. Com s'ha esmentat en l'apartat 2.2, els efectes dinàmics en la iniciació de la propagació de la fractura pot ser negligida un cop la ràtio d'energia cinètica a l'energia elàstica (U_k/U_e) es troba per sota del 20%. En conseqüència, el coeficient de seguretat α de la (Eq. 1), es troba a partir de l'equació (Eq. 22) i imposant que $U_k/U_e = 0.2$. Aquest procediment es troba en l'Annex A.8 Temps criteri de llindar.

$$t_f > t_c = 2.034t_t \qquad \text{(Eq. 24)}$$

10 RESULTATS.

10.1 Avaluació dels diferents mètodes proposats per determinar el temps de transició.

A partir dels valors de la Taula 2 i Taula 3, es generarà les gràfiques de la ràtio d'energia en funció del temps, per $D = 1\ i\ D = 2$, amb el mètode gràfic per cada cas (geometria) per observar l'escalabilitat seguint els passos del Annex F. GUIA PER REALITZAR LES SIMULACIONS EN A i Annex G. GUIA DE MATLAB PER L'ESCALABILITAT I CANVI DE MATERIAL. A més, les variacions de ràtio d'energia predites utilitzant el mètode analític i mètode basat numèricament són incloses per comparar les gràfiques de variació de material. D'aquesta forma es pot determinar una millor precisió del dos mètodes i quina de les formules és la més precisa.

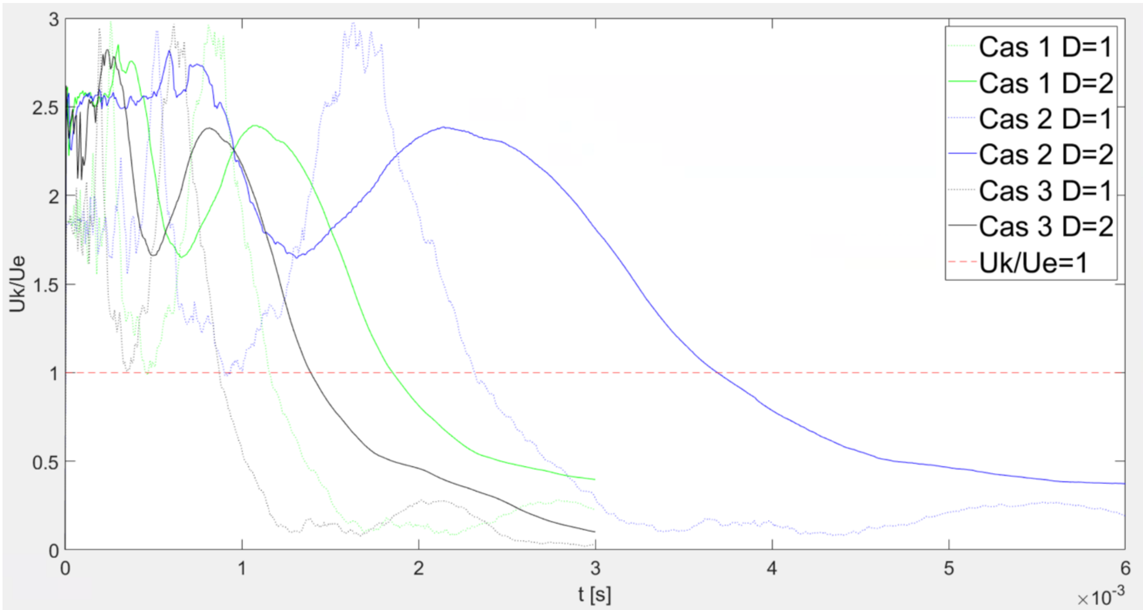
10.1.1 Escalabilitat.

Tal i com s'observa en la Il·lustració 21 (material acer), Il·lustració 23 (material AS4/8552) i Il·lustració 25 (material TeXtreme), per cada condició de velocitat (D=1 i D=2), l'evolució de ràtio d'energia és igual pels tres casos però amb un cert delay o offset. Com es pot observar en els gràfics, el ràtio d'energia incrementa de zero d'una manera inestable fins a un valor màxim. Finalment després de varies oscil·lacions, el ràtio d'energia redueix ràpidament per sota de 1, punt el qual correspon al temps de transició definit per Nakamura et al. (2009), i una tendència global cap a 0.

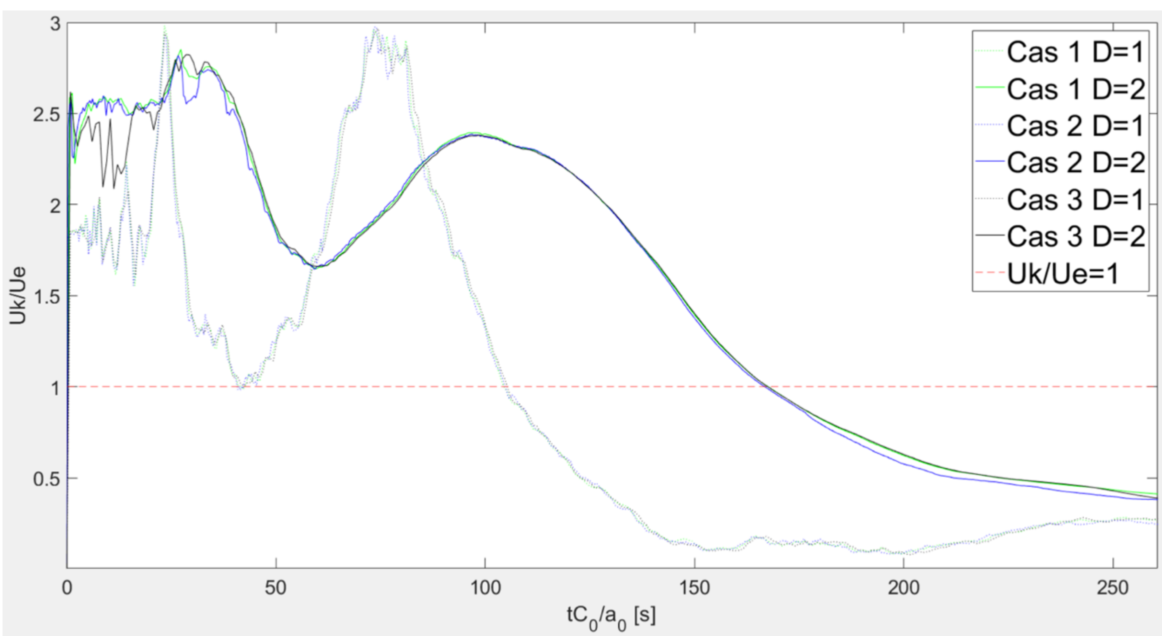
Per altre banda, les gràfiques representades en Il·lustració 22, Il·lustració 24 i Il·lustració 26, mostren les corbes de la variació del ràtio d'energia en vers al paràmetre de temps adimensional PI_1 (tC_o/a). Com es pot observar, per cada material i per cada condició de velocitat, el perfil de ràtio d'energia és el mateix pels tres casos geomètrics. Per tant, s'assumeix que l'escalabilitat és possible i el teorema de PI-Buckinham(Sonin, 2004) és validat ja que al comprovar que per un paràmetre de PI, el resultat de les corbes son iguals per qualsevol geometria mentre es mantingui la resta de PI-paràmetres constants.

Cal remarcar que el soroll que contenen les corbes per D=2 i els materials AS4/8552 i TeXtreme al inici de la simulació es a causa del xoc inicial entre els dos braços de la proveta i de les propietats del material.

- Acer.

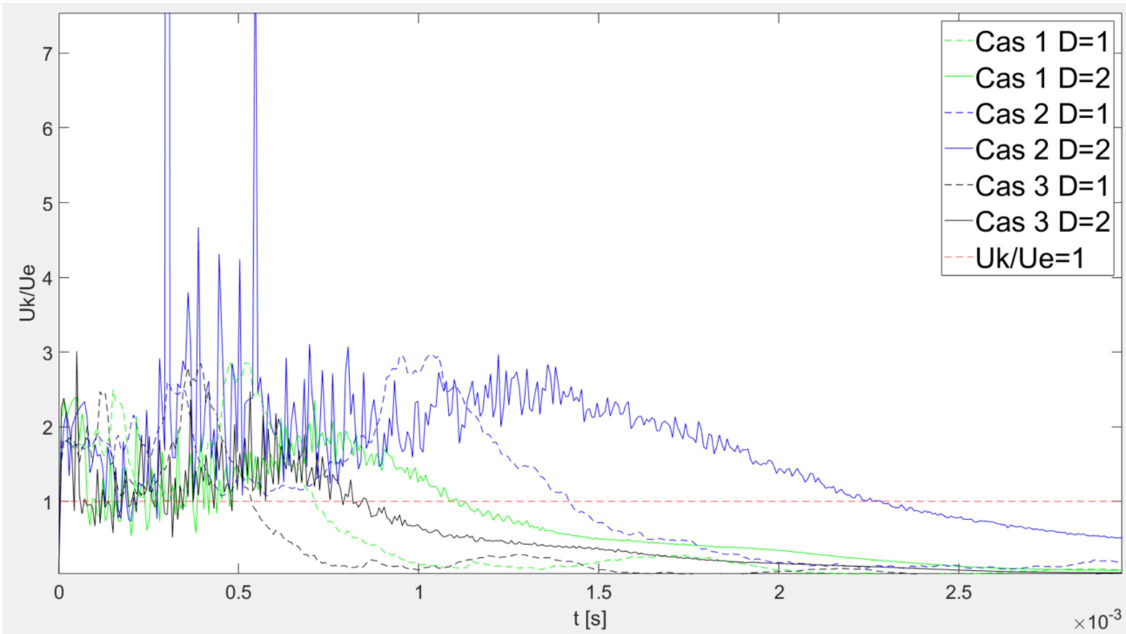


Il·lustració 21: Ràtio d'energia en vers al temps per Acer.

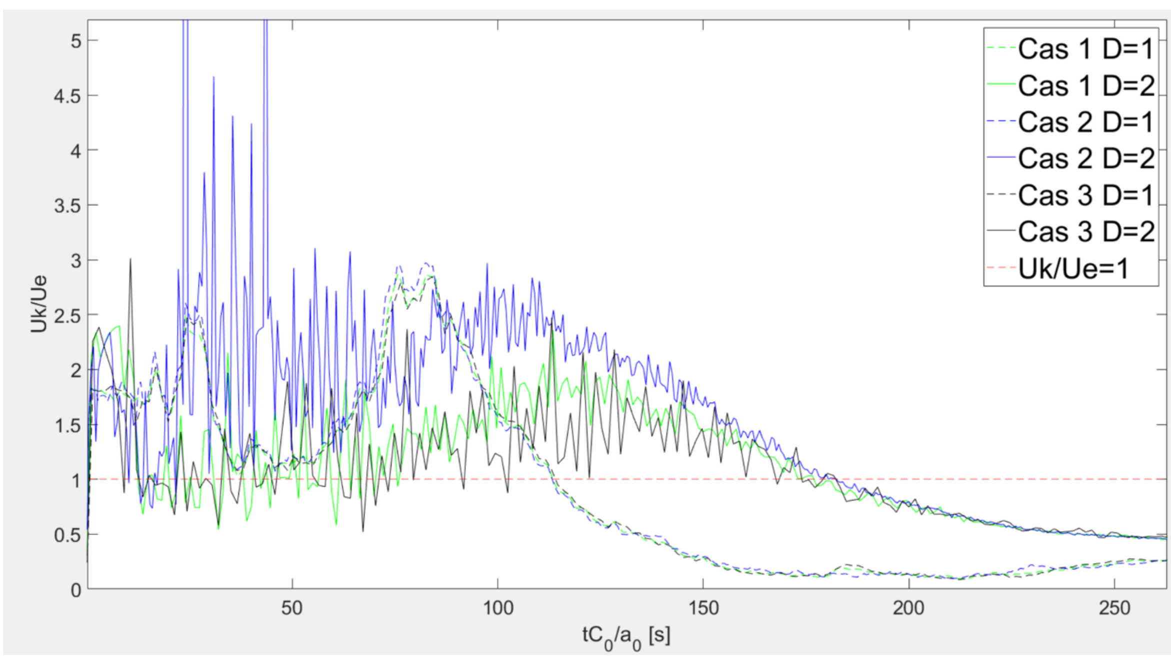


Il·lustració 22: Ràtio d'energia en vers al paràmetre adimensional PI_1 per Acer.

- AS4/8552:

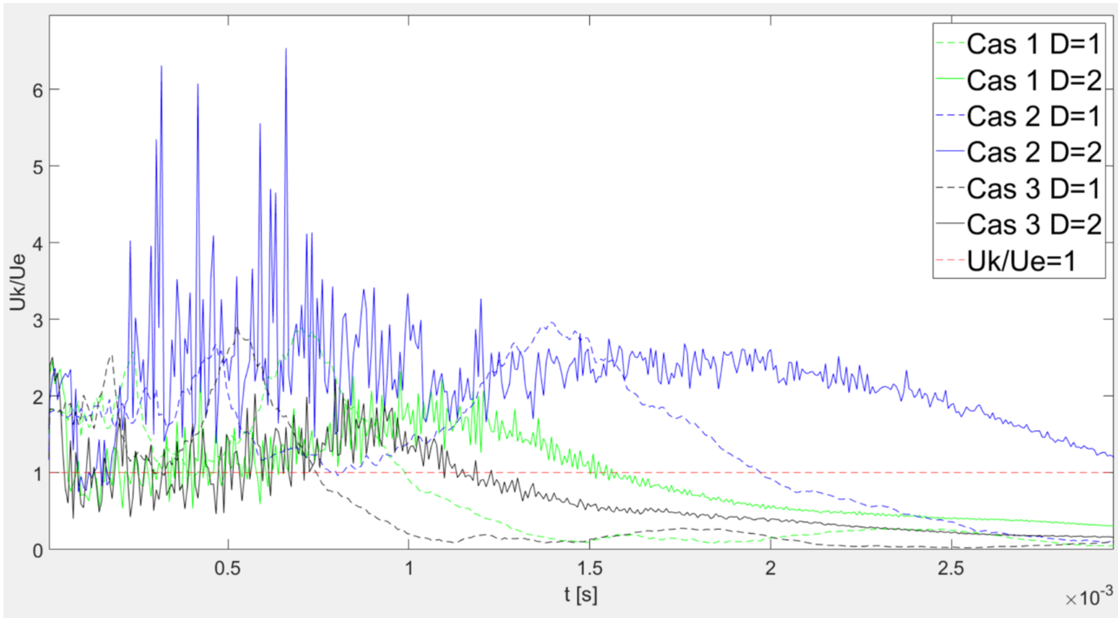


Il·lustració 23: Ràtio d’energia en vers al temps per AS4/8552.

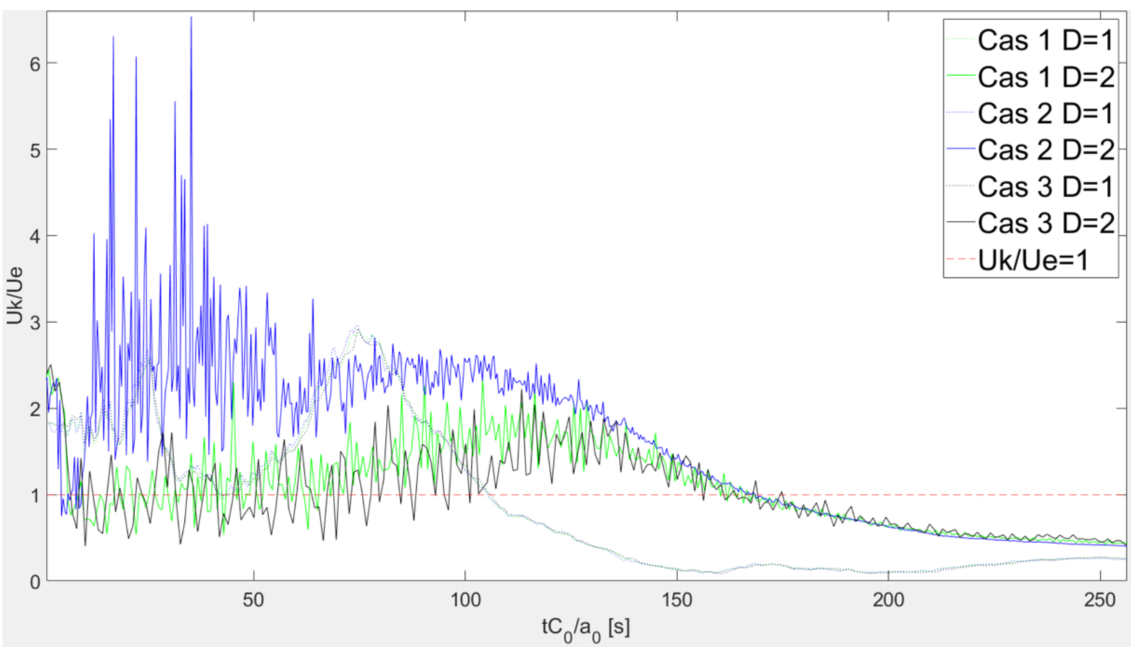


Il·lustració 24: Ràtio d’energia en vers al paràmetre adimensional PI_1 per AS4/8552.

- TeXtreme:



Il·lustració 25: Ràtio d'energia en vers al temps per TeXtreme.



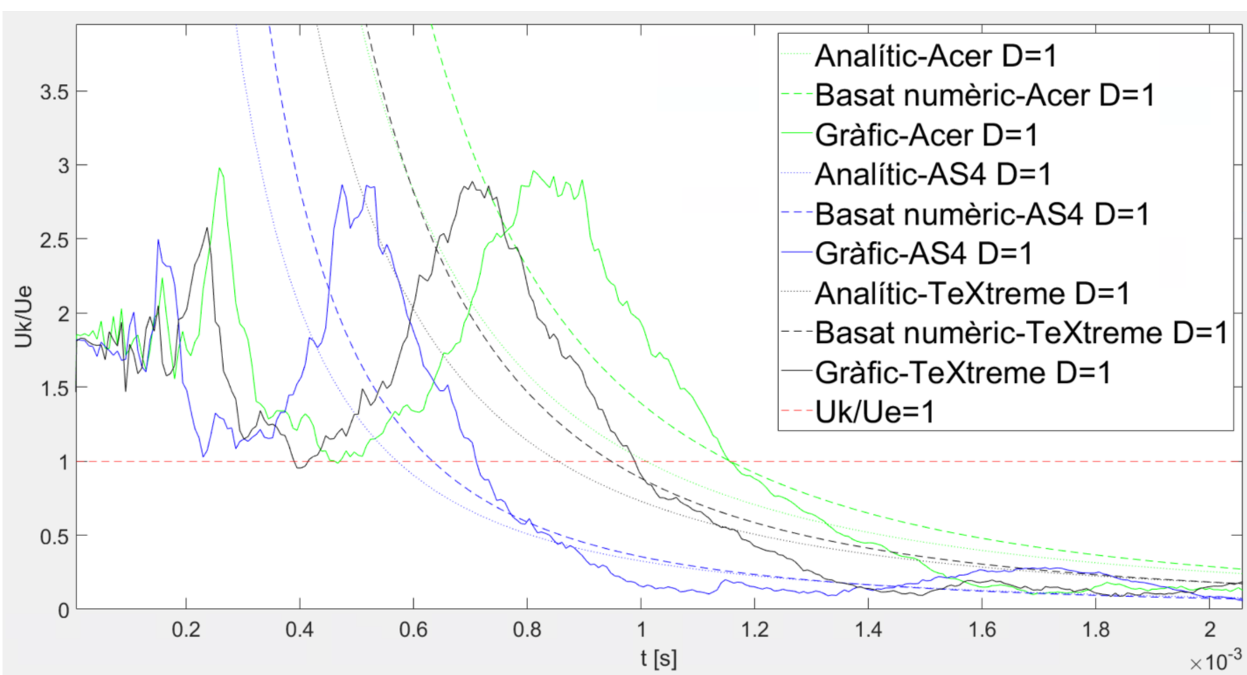
Il·lustració 26: Ràtio d'energia en vers al paràmetre adimensional PI_1 per TeXtreme.

Com s'observa, en el material AS4/8552 i TeXtreme, hi ha molt de soroll al inici de la simulació i finalment s'atenua una mica al passar per Uk/Ue=1 a diferencia del acer que no té pràcticament soroll. Això és degut a les propietats mecàniques del material, on l'acer esmorteix molt be el xoc inicial entre els dos braços de la proveta a diferència dels altres dos materials. A més aclarir que les grans variacions de ràtio d'energia al inici de la corba és a causa dels efectes inercials i que aquestes s'atenuen un cop el ràtio d'energia és 1.

10.1.2 Comparació de les tres aproximacions per diferents materials.

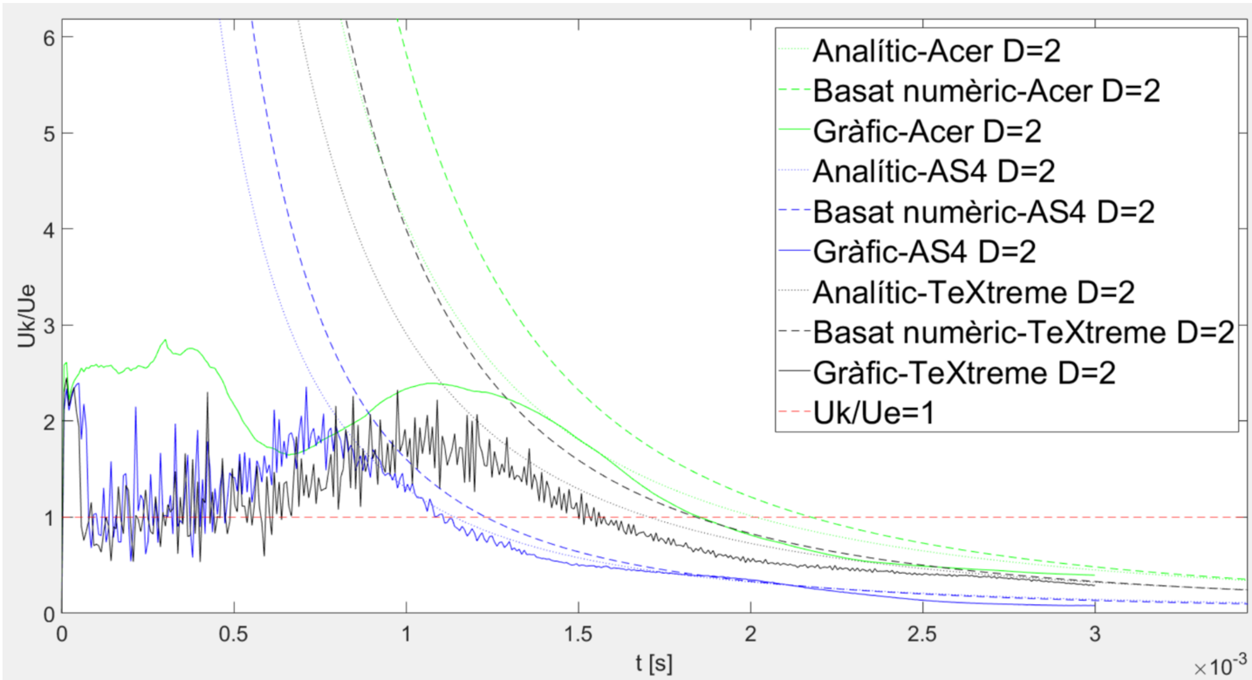
A continuació es representa els gràfics per velocitat constant (D=1) tal i com es mostra en la Il·lustració 27 i per acceleració constant (D=2), tal i com es mostra en la Il·lustració 28, amb la geometria del CAS 1 i comparant les diferents aproximacions amb el mètode gràfic per cada material.

- Canvi de material per D=1:



Il·lustració 27: Canvi de material per D=1

- Canvi de material per D=2:



Il·lustració 28: Canvi de material per D=2

10.1.3 Comparació i error de temps de transició.

Totes les simulacions s'han portat a terme a una velocitat màxima de 2 m/s on l'aplicació de la carrega. Els resultats de temps pels diferents mètodes per diversos materials i variant entre velocitat constant D=1 i acceleració constant D=2 son els següents:

Material	D	Gràfica	Analítica	Error (100%)	Basat Numèric	Error (100%)
Acer	1	0,001157	0,001008	12,87175	0,001156	0,092695
	2	0,001865	0,002016	8,10089	0,002176	16,68643
AS4/8552	1	0,000711	0,000571	19,79151	0,000654	8,030614
	2	0,001092	0,001141	4,537533	0,001232	12,83609
TeXtreme	1	0,000989	0,0008	19,07108	0,000918	7,2026
	2	0,00156	0,0016	2,614704	0,001727	10,76294

Taula 6: Temps de transició i errors

Analitzant els resultats de la Taula 6, es pot concloure que hi ha una bona relació entre les tres aproximacions. La aproximació basada-numèrica demostra una precisió millor (on el seu error màxim és de 16,7% i de 12,84% en materials compòsits) a diferència de la aproximació analítica (on el seu error màxim és de 19,78%). Per tant, a partir d'aquests resultats, es pot establir que l'equació basada numèricament és més precisa que la analítica.

10.2 Efecte de la fricció.

Un cop finalitzades les simulacions a diferents coeficients de fricció per una proveta ELS de material AS4/8552, es pot observar el temps de transició en la Taula 7:

Casos	Coef. Fricció	Nakamura (D)	T_t Gràfic
CAS 1	0	1	0,000711
	0	2	0,001092
CAS 2	0,1	1	0,000712
	0,1	2	0,001095
CAS 3	0,2	1	0,000708
	0,2	2	0,001118
CAS 4	0,4	1	0,000710
	0,4	2	0,001102

Taula 7: Efecte de la fricció

I per veure la magnitud del efecte que té la fricció en la taxa d'alliberació d'energia crítica per una càrrega a tallant en mode II, es mostra l'error relatiu en la Taula 8:

Casos	D	Error (100%)
1-2	1	0,081897328
	2	0,296703297
1-3	1	0,361102672
	2	2,375274725
1-4	1	0,10616737
	2	0,907142857

Taula 8: Error relatiu amb i sense fricció

Com es pot observar l'error es molt petit encara que s'apliqui un coeficient de fricció del 40%. Segons diu la normativa ISO 15114:2014 (2014) la fricció produeix errors entre el 1 i el 3 %, la qual segons aquest estudi compleix. Com que el material AS4 per D2 té molt de soroll com s'ha vist en l'estudi del temps de transició, els valors s'han recollit fent interpolació. L'error màxim és de 2,38% per una fricció de 0,2 i a velocitat constant, però també cal dir que com per aquesta configuració hi ha molt de soroll, els erros pels casos en D=2 no son realment molt precisos. En definitiva cap coeficient de fricció ha resultat en un efecte important en el temps de transició i , llavors, es pot negligir.

10.3 Validació del criteri de llindar.

A partir de les velocitats imposades en l'apartat 8, es troba el temps de fractura i s'observa si compleix amb el criteri de (Eq. 24). La geometria a seguir serà la imposada en la Taula 5 ja que és la segons la normativa ISO 15114:2014 (2014).

Com es pot observar en la Taula 9, a la velocitat de 15 m/s, el temps de fractura és més petit que el temps del criteri de llindar per tant no compleix amb el criteri. Això vol dir que hi ha una velocitat màxima la qual l'aproximació quasi-estàtica no es possible. En canvi per acceleració constant, tal i com s'observa a la Taula 10, el criteri compleix per les tres velocitats.

Per D=1 velocitat constant:

Velocitat	Temps de transició basat numèric (s)	Temps de fractura (s)	$t_f > 2.034t_t$
2 m/s	4,50E-04	6,224E-03	6,224E-03 > 9,158E-04
6 m/s	4,50E-04	2,096E-03	2,096E-03 > 9,158E-04
15 m/s	4,50E-04	3,68E-04	3,680E-04 > 9,158E-04

Taula 9: Avaluació del temps de llindar per D=1.

Per D=2 acceleració constant:

Velocitat	Temps de transició basat numèric (s)	Temps de fractura (s)	$t_f > 2.034t_t$
2 m/s	8,476E-04	7,780E-03	7,780E-03 > 1,724E-03
6 m/s	8,476E-04	5,776E-03	5,776E-03 > 1,724E-03
15 m/s	8,476E-04	3,664E-03	3,664E-03 > 1,724E-03

Taula 10: Avaluació del temps de llindar per D=2.

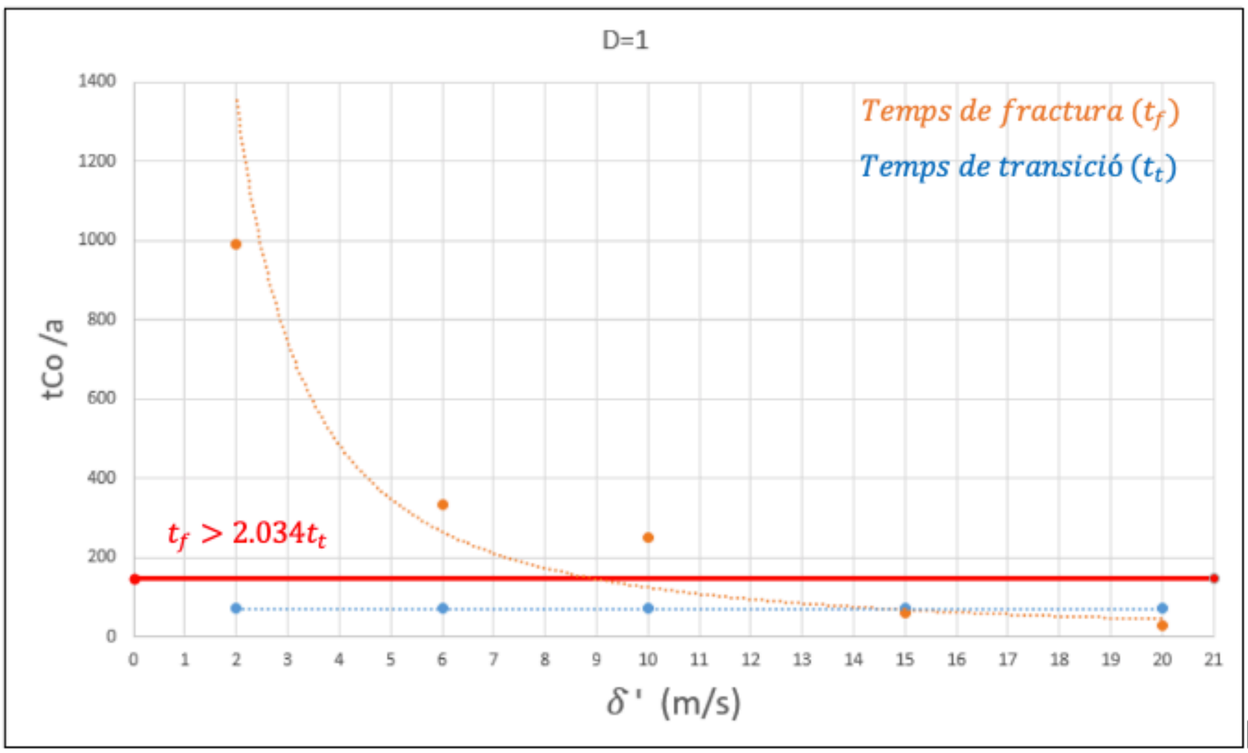
A partir dels resultats anteriors, es realitza un estudi aplicant diferents velocitats fins que el temps de fractura és inferior al temps del criteri de llindar per trobar la velocitat màxima a la que està limitada el criteri.

10.4 Velocitat màxima.

S'utilitzen varies velocitats per definir un gràfic on la corba del temps de fractura i el temps de llindar han de creuar-se. El punt on es creuen defineix la velocitat màxima. A continuació es mostra la Taula 11 els diferents temps per diferents velocitats i la gràfica s'observa en la Il·lustració 29.

Velocitat (m/s)	PI-1 amb temps de transició numèric	PI-1 amb temps de fractura
2	71,87304414	993,5762315
6	71,87304414	334,5976512
10	71,87304414	249,032603
15	71,87304414	58,74615251
20	71,87304414	28,09598598

Taula 11: Velocitat màxima per D=1.

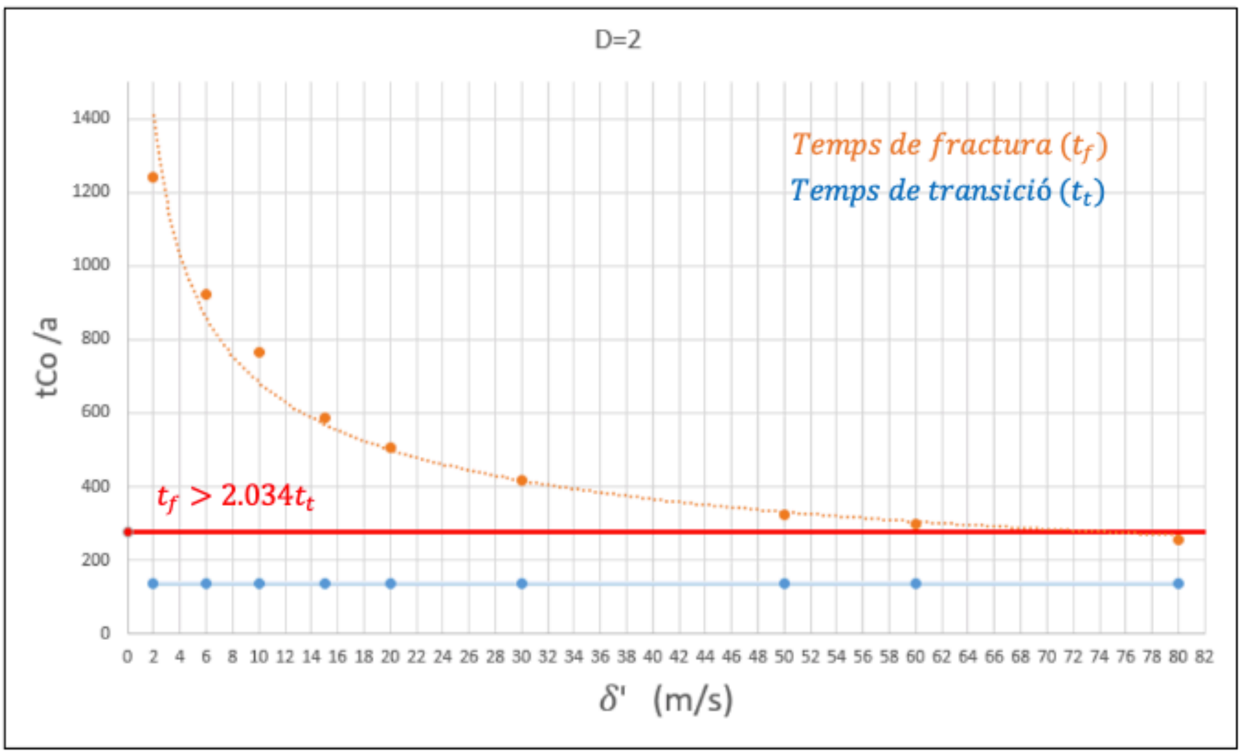


Il·lustració 29: Velocitat màxima per D=1.

Finalment per D=2, es mostra la Taula 12 els diferents temps per diferents velocitats en acceleració constant i la gràfica s'observa en Il·lustració 30.

Velocitat (m/s)	PI-1 amb temps de transició numèric	PI-1 amb temps de fractura
2	135,314419	1241,970289
6	135,314419	922,0591763
10	135,314419	766,2541631
15	135,314419	584,9073445
20	135,314419	508,2819282
30	135,314419	416,3314286
50	135,314419	324,3809291
60	135,314419	296,2849431
80	135,314419	255,4180544

Taula 12: Velocitat màxima per D=2.



Il·lustració 30: Velocitat màxima per D=2.

Finalment, tal i com es pot observar a la Il·lustració 29, la velocitat màxima per considerar la aproximació quasi estàtica és de 9 m/s per D=1 (velocitat constant) i de 74 m/s per D=2 en la Il·lustració 30 (acceleració constant).

11 CONCLUSIONS.

S'ha introduït el concepte de temps de transició per una proveta ELS per diferents materials, proposant el criteri de llindar basat en el temps per definir quan els efectes inercials poden ser negligits i es pot utilitzar un mètode quasi-estàtic de reducció de dades per facilitar el càlcul. S'han proposat res mètodes diferents per determinar el temps de transició en un test de ELS: una aproximació analítica, una aproximació basada numèricament i un mètode gràfic. Un anàlisi adimensional es porta a terme utilitzant el teorema de PI-Buckinham per obtenir l'expressió basada numèricament.

Addicionalment, un estudi d'escalabilitat geomètrica s'ha portat a terme per validar l'ús del mètode gràfic i l'aproximació basada numèricament. Qualsevol proveta de dimensions diferents, o material, pot extrapolar la corba obtinguda gràficament mentre el PI_2, el PI_3 i el PI_5 es mantinguin constants. L'aproximació basada numèricament ha demostrat ser una eina poderosa per determinar el temps de transició, resultant en petites diferencies d'error amb el mètode gràfic a comparació de l'aproximació analítica.

A més, s'ha demostrat que l'efecte de la fricció es negligible ja que desprès d'aplicar diferents coeficients, cap ha suposat un canvi significatiu en el temps de transició. Per acabar s'ha realitzat un estudi del efecte de la velocitat aplicant diverses velocitats per arribar a la conclusió que el criteri de llindar té un límit en el qual el marc quasi estàtic es aplicable fins a una velocitat màxima. Per D=1 si que la velocitat es limitada, però per D=2 el límit de velocitat és molt gran i per tant es pot concloure que la velocitat màxima que es significativa quan es treballa a velocitat constant.

La proporcionalitat del criteri de llindar basat en el temps ha sigut definit basat en el límit d'un 20% del ràtio d'energia com el temps de fractura t_f a de ser al menys 2,034 vegades més gran que el temps de transició t_t. Els resultats mostren que l'aproximació proposada per determinar el temps de transició i l'ús del criteri de llindar basat en el temps poden ser eines útils per definir quan un esquema quasi-estàtic de reducció de dades pot ser aplicat per calcular la resistència a la fractura per una proveta ELS en mode II sota grans rangs de càrrega.

En la pràctica, si una persona té les eines informàtiques, podria fer ús d'aquestes per calcular el temps de transició d'una forma més precisa pel mètode gràfic i el temps de fractura, i aplicant el criteri de llindar basat en el temps pot establir si és possible aplicar un marc quasi estàtic i llavors utilitzar la equació de resistència a la fractura (Eq. 3). En el cas que no tingui possibilitat de accedir a les eines informàtiques, pot utilitzar l'equació basada numèricament ja que és una aproximació millor que la analítica al mètode gràfic, i amb el temps de fractura després de realitzar un assaig amb una proveta real determinar si compleix amb el criteri de llindar i per tant decidir si pot utilitzar l'equació simplificada de la resistència a la fractura o s'ha de considerar els efectes inercials els quals compliquen molt més la determinació de la resistència a la fractura.

12 BIBLIOGRAFIA.

Benzeggagh, M. L., & Kenane, M. (1996). Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus. *Composites Science and Technology*, *56*(4). https://doi.org/10.1016/0266-3538(96)00005-X

Blackman, B. R. K., Dear, J. P., Kinloch, A. J., MacGillivray, H., Wang, Y., Williams, J. G., & Yayla, P. (1996). The failure of fibre composites and adhesively bonded fibre composites under high rates of test: Part III mixed-mode I/II and mode II loadings. *Journal of Materials Science*, *31*(17). https://doi.org/10.1007/BF00366342

Cantwell, W. J., & Blyton, M. (1999). Influence of loading rate on the interlaminar fracture properties of high performance composites - A review. *Applied Mechanics Reviews*, *52*(6). https://doi.org/10.1115/1.3098934

Chen, T., Harvey, C. M., Wang, S., & Silberschmidt, V. v. (2020). Theory of dynamic mode-II delamination in end-loaded split tests. *Composites Part C: Open Access*, *3*. https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100055

Colin de Verdiere, M., Skordos, A. A., Walton, A. C., & May, M. (2012). Influence of loading rate on the delamination response of untufted and tufted carbon epoxy non-crimp fabric composites/Mode II. *Engineering Fracture Mechanics*, *96*. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2011.12.011

Compston, P., Jar, P. Y. B., Burchill, P. J., & Takahashi, K. (2001). Effect of matrix toughness and loading rate on the mode-II interlaminar fracture toughness of glass-fibre/vinyl-ester composites. *Composites Science and Technology*, *61*(2). https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00226-8

ISO 15114:2014. (2014). *Fibre-reinforced plastic composites- Determination of the mose II fracture resistance for unidirectionally reinforced materials using the calibrated end-loaded split (C-ELS) test and an effective crack length approach*. https://www.iso.org/standard/55357.html

Jacob, G. C., Starbuck, J. M., Fellers, J. F., Simunovic, S., & Boeman, R. G. (2005). The effect of loading rate on the fracture toughness of fiber reinforced polymer composites. In *Journal of Applied Polymer Science* (Vol. 96, Issue 3). https://doi.org/10.1002/app.21535

Kalthoff, J. F., Beinert, J., & Winkler, S. (1977). MEASUREMENTS OF DYNAMIC STRESS INTENSITY FACTORS FOR FAST RUNNING AND ARRESTING CRACKS IN DOUBLE-CANTILEVER-BEAM SPECIMENS. *ASTM Special Technical Publication*, *627*. https://doi.org/10.1520/stp27387s

Medina, S. A., González, E. v., & Blanco, N. (2021). Transition time threshold for Double Cantilever Beam specimens under high loading rates. *Engineering Fracture Mechanics*, *249*. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.107754

Nakamura, T., Shih, C., & Freund, L. (2009). Three-Dimensional Transient Analysis of a Dynamically Loaded Three-Point-Bend Ductile Fracture Specimen. In *Nonlinear Fracture Mechanics: Volume I Time-Dependent Fracture*. https://doi.org/10.1520/stp26778s

Sonin, A. A. (2004). A generalization of the ∏-theorem and dimensional analysis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *101*(23). https://doi.org/10.1073/pnas.0402931101

Soto, A., González, E. v., Maimí, P., Martín de la Escalera, F., Sainz de Aja, J. R., & Alvarez, E. (2018). Low velocity impact and compression after impact simulation of thin ply laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *109*. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.03.017

Soto, A., González, E. v., Maimí, P., Mayugo, J. A., Pasquali, P. R., & Camanho, P. P. (2018). A methodology to simulate low velocity impact and compression after impact in large composite stiffened panels. *Composite Structures*, *204*. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.081

Soto, A., González, E. v., Maimí, P., Turon, A., Sainz de Aja, J. R., & de la Escalera, F. M. (2016). Cohesive zone length of orthotropic materials undergoing delamination. *Engineering Fracture Mechanics*, *159*. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.03.033

Soutis, C. (2005). Fibre reinforced composites in aircraft construction. In *Progress in Aerospace Sciences* (Vol. 41, Issue 2). https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2005.02.004

13 RELACIÓ DE DOCUMENTS.

Document 1. Memòria i Annexos

Memòria.

Annex A: Annex de càlculs.

Annex B: Programació.

Annex C: Generació de gràfiques (EXCEL).

Annex D: Guia de CurveExpert Pro.

Annex E: Guia de MatLab.

Annex F: Guia Abaqus.

Document 2. Pressupost

ANNEXOS

A ANNEX DE CÀLCUL

A.1 Nomenclatura.

A.1.1 Paràmetres geomètrics de la proveta

L = Longitud de la proveta

b (o B) = Amplitud de la proveta

a = Longitud de l'esquerda

h = Alçada de mitja proveta o de un braç.

a_0 = Longitud inicial de l'esquerda

V = Volum

A = Àrea

I = Inèrcia

A.1.2 Paràmetres mecànics de la proveta

p (o rho)= Densitat de la proveta

nu = Coeficient de Poisson

E (o E_{11}) = Mòdul de Young de la proveta

m = massa

A.1.3 Paràmetres externs.

C = Compliància

M = Moment

P = Carrega externa

A.1.4 Cinemàtica.

δ ó $Delta$ = Desplaçament en el punt de càrrega

$\dot{\delta}$ ó $Delta\_V$= Velocitat en el punt de càrrega

t = Temps

t_c = Temps de llindar

t_t = Temps de transició

D = Desplaçament adimensional Nakamura.

v = Velocitat

t_f = Temps de fractura.

A.1.4 Energies i tenacitat a la fractura.

Uk = Energía cinètica

G_{IIC} = Tenacitat a la fractura.

Ue = Energia elàstica o interna

A.2 Energía cinètica.

La formula de l'energia cinètica és:

$$Uk = \frac{1}{2}\, m * v^2 \qquad \text{(Eq. 25)}$$

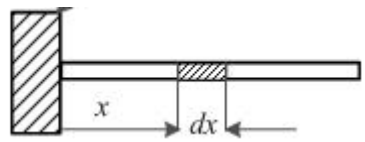
La massa es pot igualar a: $m = pV = pAx = pb2hx$

On p és densitat, V el volum, A és la secció, x es tram de longitud i h es l'alçada de la meitat de la proveta.

Que substituint a la energia cinètica quedaria:

$$Uk = \frac{1}{2}\, pb2hxv^2 \qquad \text{(Eq. 26)}$$

Considerant un element petit de la longitud dx a una distància x, tal i com es mostra en la Il·lustració 31, l'equació de la energia quedaria:



Il·lustració 31: Tram de longitud

$$dUk = \frac{1}{2}\, pb2h(dx)v^2 \qquad \text{(Eq. 27)}$$

La velocitat v és la velocitat de desplaçament $\dot{\delta}$, i per trobar l'energia cinètica total de tota la biga, s'aplica la integració en els dos costats del igual. Com que es vol trobar l'energia màxima de tota la biga ja que es deforma des de l'encastament fins el final de la biga, i la velocitat que s'utilitza és al extrem, la integració te uns límits de 0 fins L (longitud de la biga):

$$\int_0^L dUk = \int_0^L \tfrac{1}{2} pb2h\left[\dot{\delta}(x)\right]^2 dx \qquad \text{(Eq. 28)}$$

Finalment la formula es pot simplificar com:

$$Uk = (\tfrac{1}{2} pb2h \int_0^L \left[\dot{\delta}(x)\right]^2 dx) \qquad \text{(Eq. 29)}$$

p = densitat. b = amplada. h = gruix. a = longitud d'esquerda.

On p x b x 2h representa la massa de la biga.

El desplaçament en qualsevol punt de la biga ve donada per la següent formula:

$$\delta(x,t) = \frac{1}{2}\delta_0(3\left(\frac{x}{L}\right)^2 - \left(\frac{x}{L}\right)^3) \quad \text{(Eq. 30)}$$

L'equació 18, es troba explicada en l'Annex A.3 Desplaçament del punt on s'aplica la càrrega.

On derivant l'equació anterior per trobar la velocitat:

$$\dot{\delta}(x) = \frac{1}{2}\dot{\delta}_0(3\left(\frac{x}{L}\right)^2 - \left(\frac{x}{L}\right)^3) \quad \text{(Eq. 31)}$$

Que simplificada quedaria:

$$\dot{\delta}(x) = \dot{\delta}_0(\frac{3Lx^2 - x^3}{2L^3}) \quad \text{(Eq. 32)}$$

I ara, reemplaçant en (Eq. 29) i simplificant aquesta:

$$Uk = (\frac{1}{2}pb2h\int_0^L \left[\dot{\delta}_0(\frac{3Lx^2 - x^3}{2L^3})\right]^2 dx) \quad \text{(Eq. 33)}$$

$$Uk = (\frac{1}{2}pb2h\int_0^L \dot{\delta_0}^2 \cdot \left(\frac{3Lx^2 - x^3}{2L^3}\right)^2 dx) \quad \text{(Eq. 34)}$$

$$Uk = (\frac{1}{2}pb2h\int_0^L \dot{\delta_0}^2 \cdot (\frac{9L^2x^4 - 6Lx^5 + x^6}{4L^6})dx) \quad \text{(Eq. 35)}$$

$$Uk = (\frac{1}{2}pb2h\dot{\delta_0}^2\int_0^L \dot{\delta_0}^2 \cdot (\frac{9L^2x^4 - 6Lx^5 + x^6}{4L^6})dx) \quad \text{(Eq. 36)}$$

$$Uk = (\frac{1}{8L^6}pb2h\dot{\delta_0}^2\int_0^L (9L^2x^4 - 6Lx^5 + x^6)dx \quad \text{(Eq. 37)}$$

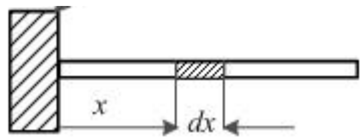
$$Uk = (\frac{1}{8L^6}pb2h\dot{\delta_0}^2(\frac{9L^2x^5}{5} - \frac{6Lx^6}{6} + \frac{x^7}{7})_0^L \quad \text{(Eq. 38)}$$

$$Uk = (\frac{1}{8L^6}pb2h\dot{\delta_0}^2(\frac{33L^7}{35}) \quad \text{(Eq. 39)}$$

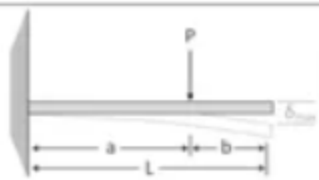
$$Uk = \frac{33}{140}pbh\dot{\delta_0}^2L \quad \text{(Eq. 40)}$$

A.3 Desplaçament del punt on s’aplica la càrrega.

Al igual que l’annex anterior, s’agafa un petit element de dx a una distància x des del encastament, tal i com s’observa en la Il·lustració 32.



Il·lustració 32: Tram de longitud

Beam and load cases	Maximum Beam Deflection
	$\delta_{max} = \frac{PL^3}{3EI}$
	$\delta_{max} = \frac{Pa^2(3L-a)}{6EI}$

Taula 13: Desplaçament punt d'aplicació

Sabent que el desplaçament en un punt a una distància x del encastament és:

$$\delta = \frac{Px^2(3L-x)}{6EI} \qquad \text{(Eq. 41)}$$

I que el desplaçament màxim en el punt extrem de la biga és:

$$\delta_0 = \frac{PL^3}{3EI} \qquad \text{(Eq. 42)}$$

Aïllant P de l'equació anterior:

$$P = \frac{\delta_0 3EI}{L^3} \qquad \text{(Eq. 43)}$$

I finalment substituint a la (Eq. 41) I simplificant:

$$\delta = \frac{\frac{\delta_0 3EI}{L^3} x^2(3L - x)}{6EI} \qquad \text{(Eq. 44)}$$

$$\delta = \frac{\frac{\delta_0}{L^3} x^2(3L - x)}{2} \qquad \text{(Eq. 45)}$$

$$\delta = \frac{\delta_0(\frac{3Lx^2}{L^3} - \frac{x^3}{L^3})}{2} \qquad \text{(Eq. 46)}$$

$$\delta = \frac{1}{2}\delta_0(3\frac{x^2}{L^2} - \frac{x^3}{L^3}) \qquad \text{(Eq. 47)}$$

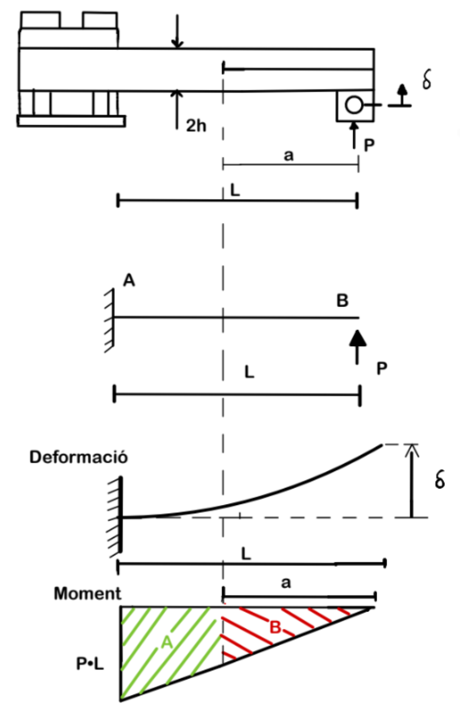
$$\delta(x,t) = \frac{1}{2}\delta_0(3\left(\frac{x}{L}\right)^2 - \left(\frac{x}{L}\right)^3) \qquad \text{(Eq. 48)}$$

A.4 Compliància

La compliància es la fracció entre el desplaçament i la càrrega P. El desplaçament vertical en el punt de la càrrega prové del segon teorema de Mohr.

$$\delta_{AB} = \int_A^B \frac{M}{EI} \cdot (L - x)dx = \frac{S_{AB} \cdot d}{EI} \qquad \text{(Eq. 49)}$$

Primer es representa el diagrama de moment:



Il·lustració 33: Diagrama de moment

Es separa l'àrea A ,del encastament fins l'inici de l'esquerda (de 0 a L-a), i la àrea B, el tram on es troba l'esquerda (de L-a a L), perquè aquest dos trams tenen inèrcies diferents.

Àrea A :

$$I = \frac{b \cdot (2h)^3}{12} \quad \text{(Eq. 50)}$$

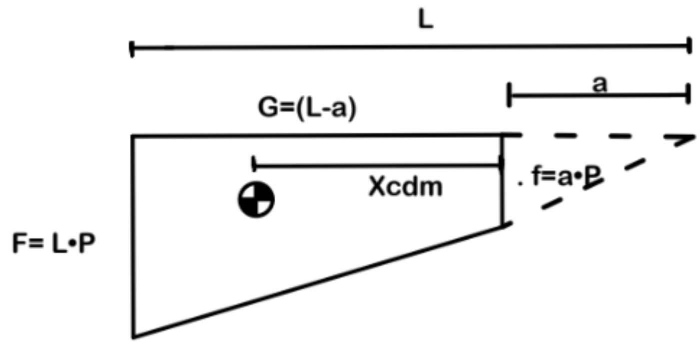
El gruix total de la proveta és 2h.

Àrea B:

$$I = 2 \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} \quad \text{(Eq. 51)}$$

El gruix és h, però al haver-hi 2 seccions, llavors es multiplica la inercia per dos.

Àrea A:



Il·lustració 34: Moment tram NO esquerda

$$\delta_{ABa} = \frac{S_{AB} \cdot d}{EI} = \frac{1}{EI} \cdot G \cdot \frac{(F+f)}{2} \cdot \left(\frac{G \cdot (2F+f)}{3(F+b)} + a \right) \qquad \text{(Eq. 52)}$$

$$\delta_{ABa} = \frac{1}{EI} \cdot G \cdot \frac{(F+f)}{2} \cdot \left(\frac{G \cdot (2F+f) + 3(F+f)a}{3(F+f)} \right) = \qquad \text{(Eq. 53)}$$

$$\delta_{ABa} = \frac{1}{6EI} \cdot (G^2 \cdot (2F+f) + 3G(F+f)a) \qquad \text{(Eq. 54)}$$

G= L-a (Eq. 55)

F=L·P (Eq. 56)

f=a·P (Eq. 57)

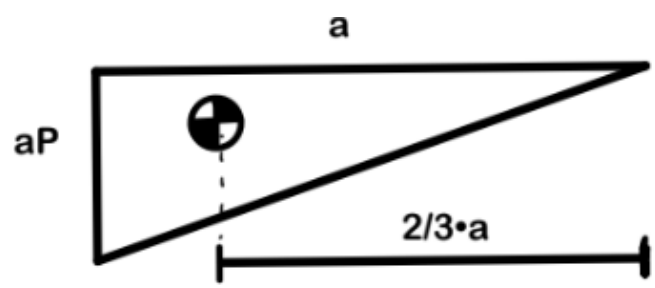
$$\delta_{ABa} = \frac{1}{6EI} \cdot ((L-a)^2 \cdot (2PL+Pa) + 3 \cdot (L-a) \cdot (PL+Pa) \cdot a) \qquad \text{(Eq. 58)}$$

$$\delta_{ABa} = \frac{1}{6EI} \cdot (2PL^3 + PaL^2 + 2PLa^2 + Pa^3 - 4aPL^2 - 2a^2PL + 3aPL^2 - 3Pa^3) \qquad \text{(Eq. 59)}$$

$$\delta_{ABa} = \frac{1}{6EI} \cdot (-2Pa^3 + 2PL^3) = \frac{1}{6E\frac{2}{3}bh^3} \cdot (-2Pa^3 + 2PL^3) \qquad \text{(Eq. 60)}$$

$$\delta_{ABa} = \frac{1}{2Ebh^3} \cdot (-Pa^3 + PL^3) \quad \text{(Eq. 61)}$$

Àrea B:



Il·lustració 35: Moment tram esquerda

$$\delta_{ABb} = \frac{1}{EI} \cdot aP \cdot a \cdot \frac{2}{3}a = \frac{1}{EI}\frac{2}{3}a^3P \quad \text{(Eq. 62)}$$

$$\delta_{ABb} = \frac{1}{E\frac{2}{12}bh^3} \cdot \frac{2}{3}a^3P \quad \text{(Eq. 63)}$$

$$\delta_{ABb} = \frac{1}{2Ebh^3} \cdot 4a^3P \quad \text{(Eq. 64)}$$

Desplaçament total:

$$\delta_{AB} = \delta_{ABa} + \delta_{ABb} \quad \text{(Eq. 65)}$$

$$\delta_{AB} = \frac{1}{2Ebh^3} \cdot (-Pa^3 + PL^3) + \frac{1}{2Ebh^3} \cdot 4a^3P \quad \text{(Eq. 66)}$$

$$\delta_{AB} = \frac{3a^3P + L^3P}{2Ebh^3} \quad \text{(Eq. 67)}$$

Finalment la compliància és:

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{3a^3 + L^3}{2Ebh^3} \quad \text{(Eq. 68)}$$

Un cop ja tenim el ràtio d'energia, es pot aplicar el teorema de PI-Buckingham a un exemplar de ELS per obtenir un enteniment millor de les variables que podrien afectar al temps de transició del exemplar.

A.5 Energia elàstica

$$U_e = \frac{1}{2}\frac{\delta^2}{C} \quad \text{(Eq. 69)}$$

On la compliància segons la ISO i demostrada en l'Annex A.4 Compliància:

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{3a^3 + L^3}{2bh^3E_1} \quad \text{(Eq. 70)}$$

Per tant si substituïm a l'equació anterior la compliància:

$$U_e = \frac{1}{2}\frac{\delta^2 2bh^3E_1}{3a^3 + L^3} \quad \text{(Eq. 71)}$$

A.6 Ràtio d'energies

Un cop tenim l'energia cinètica i elàstica, només cal dividir aquests dos factors i simplificar.

$$\frac{U_k}{U_e} = \frac{\frac{33}{140}pbh\dot{\delta}^2L}{\frac{1}{2}\frac{\delta^2 2bh^3E_1}{3a^3 + L^3}} \quad \text{(Eq. 72)}$$

$$\frac{U_k}{U_e} = \frac{33pbh\dot{\delta}^2L(3a^3 + L^3)}{140\delta^2bh^3E_1} \quad \text{(Eq. 73)}$$

SI es vol introduir el paràmetre de velocitat longitudinal de propagació d'ona, la formula d'aquesta velocitat és la següent:

$$Co = \left(\frac{E}{p}\right)^2 \qquad \text{(Eq. 74)}$$

Aïllant la densitat p:

$$p = \frac{E}{Co^2} \qquad \text{(Eq. 75)}$$

I substituït en la formula de ràtio d'energia:

$$\frac{U_k}{U_e} = \frac{33\dot{\delta}^2 L(3a^3 + L^3)}{140\delta^2 h^2 {c_0}^2} \qquad \text{(Eq. 76)}$$

A.7 Teorema de PI-Buckingham

El Teorema de PI-Buckinham, és el teorema fonamental de l'anàlisi dimensional. El teorema estableix que donada una relació física expressable mitjançant una equació en la qual estan involucrades n magnituds físiques o variables, i si aquestes variables s'expressen en termes de k quantitats físiques dimensionalment independents (com és la massa, el temps o la longitud), llavors l'equació original es pot escriure equivalentment com una equació amb una sèrie de n - k nombres adimensionals construïts amb les variables originals. De tota manera l'elecció de paràmetres adimensionals no és única i el teorema no tria quins tenen significat físic.

Si tenim una equació física que reflecteix la relació existent entre les variables que intervenen en un cert problema ha d'existir una funció f tal que:

$$f(a_1, a_2, \ldots, A_n) = 0 \qquad \text{(Eq. 77)}$$

on a1, a2, ..., An, són les n variables o magnituds físiques rellevants, i s'expressen en termes de k unitats físiques independents. Llavors l'anterior equació es pot reescriure com:

$$\tilde{f}(\pi_1, \Pi_2, \ldots, \Pi_{nk}) = 0 \quad \text{(Eq. 78)}$$

on són els paràmetres adimensionals, Pi-paràmetres, construïts de n - k equacions de la forma:

$$\Pi_i = A_1^{M_1} a_2^{M_2} \cdots A_n^{m_n} \quad \text{(Eq. 79)}$$

on els exponents m són nombres enters. El nombre de termes adimensionals construïts n - k és igual a la nul·litat de la matriu dimensional on k és el rang de la matriu.

En el nostre cas es pot aplicar aquest teorema en la formula de ràtio d'energia.

1. Primer especifiquem quines son totes les variables que estan involucrades en el problema:

$$\frac{U_k}{U_e} = f(\delta, t, \dot{\delta}, a_0, C_0, h, b, L) \quad \text{(Eq. 80)}$$

δ: Desplaçament en el punt de càrrega

t: Temps

δ ̇: Velocitat en el punt de càrrega

a_0: Longitud inicial de l'esquerda

C_0: Velocitat de propagació de soroll en el material.

h: Gruix de un braç format per l'esquerda

b: Amplada de la biga

L: Longitud lliure de la biga (no longitud total sinó fins on comença l'encastament)

2. Expressar cada variable en termes de dimensions bàsiques [M(massa), L(longitud), T(temps)]:

δ=[L]

t=[T]

δ̇=[LT^(-1)]

a_0=[L]

C_0=[LT^(-1)]

h=[L]

b=[L]

l=[L]

3. Determinar el nombre de Pi-termes:
   Variables n = 8.
   Dimensions m = 2.
   Grups de PI n-m = 2 (expressions adimensionals)

$$\delta = [L]$$

$$t = [T]$$

$$\dot{\delta} = [LT^{-1}]$$

$$a_0 = [L]$$

$$C_0 = [LT^{-1}]$$

$$h = [L]$$

$$b = [L]$$

4. Seleccionar les variables repetides.
   Com que el nom de variables adimensionals son m=2, es poden escollir dos variables com a repetides aleatòriament. Però seguint l'estudi realitzat per en Sergio Medina, s'escollirà:

a_0 [L] i t [T]

5. Combinar les variables repetides amb una variable addicional ($\dot{\delta}, \delta, C_0, h, b, l$), fins haver utilitzat totes per aconseguir els termes de PI.
   - PI_1:

$$\pi_1 = {a_0}^a \cdot t^b \cdot C_0 = (L)^a \cdot (T)^b \cdot (LT^{-1}) \quad \text{(Eq. 81)}$$

$$L^{(a+1)} \cdot T^{(b-1)} = M^0 L^0 T^0 \quad \text{(Eq. 82)}$$

$$(L): \quad a + 1 = 0 \quad \text{(Eq. 83)}$$

$$(T): \quad b - 1 = 0 \quad \text{(Eq. 84)}$$

$$a = -1 \quad b = 1 \quad \text{(Eq. 85)}$$

$$\pi_1 = {a_0}^{-1} \cdot t^1 \cdot c_0 = \frac{tc_0}{a_c} = M^0 L^0 T^0 \quad \text{(Eq. 86)}$$

- PI_2:

$$\pi_2 = {a_0}^a t^b \dot{\delta} = (L)^a \cdot (T)^b \cdot (LT^{-1})$$ (Eq. 87)

$$L^{(a+1)} \cdot T^{(b-1)} = M^0 L^0 T^0$$ (Eq. 88)

$$(L): \quad a + 1 = 0$$ (Eq. 89)

$$(T): \quad b - 1 = 0$$ (Eq. 90)

$$a = -1 \quad b = 1$$ (Eq. 91)

$$\pi_2 = {a_0}^{-1} \cdot t^1 \cdot \dot{\delta} = \frac{t\dot{\delta}}{a_0} = M^0 L^0 T^0$$ (Eq. 92)

- PI_3:

$$\pi_3 = {a_0}^a \cdot t^b \cdot \delta = (L)^a \cdot (T)^b \cdot (L)$$ (Eq. 93)

$$L^{(a+1)} \cdot T^{(b)} = M^0 L^0 T^0$$ (Eq. 94)

$$(L): \quad a + 1 = 0$$ (Eq. 95)

$$(T): \quad b = 0$$ (Eq. 96)

$$a = -1 \quad b = 0$$ (Eq. 97)

$$\pi_3 = {a_0}^{-1} \cdot \delta = \frac{\delta}{a_0} = M^0 L^0 T^0$$ (Eq. 98)

- PI_4:

$$\pi_4 = {a_0}^a \cdot t^b \cdot h = (L)^a \cdot (T)^b \cdot (L)$$ (Eq. 99)

$$L^{(a+1)} \cdot T^{(b)} = M^0 L^0 T^0$$ (Eq. 100)

$$(L): \quad a + 1 = 0$$ (Eq. 101)

$$(T): \quad b = 0$$ (Eq. 102)

$$a = -1 \quad b = 0$$ (Eq. 103)

$$\pi_4 = {a_0}^{-1} \cdot h = \frac{h}{a_0} = M^0 L^0 T^0$$ (Eq. 104)

- PI_5:

$$\pi_5 = {a_0}^a \cdot t^b \cdot b = (L)^a \cdot (T)^b \cdot (L)$$ (Eq. 105)

$$L^{(a+1)} \cdot T^{(b)} = M^0 L^0 T^0$$ (Eq. 106)

$$(L): \quad a + 1 = 0$$ (Eq. 107)

$$(T): \quad b = 0$$ (Eq. 108)

$$a = -1 \quad b = 0$$ (Eq. 109)

$$\pi_5 = {a_0}^{-1} \cdot b = \frac{b}{a_0} = M^0 L^0 T^0$$ (Eq. 110)

- PI_6:

$$\pi_6 = {a_0}^a \cdot t^b \cdot b = (L)^a \cdot (T)^b \cdot (L)$$ (Eq. 111)

$$L^{(a+1)} \cdot T^{(b)} = M^0 L^0 T^0$$ (Eq. 112)

$$(L): \quad a + 1 = 0$$ (Eq. 113)

$$(T): \quad b = 0$$ (Eq. 114)

$$a = -1 \quad b = 0 \tag{Eq. 115}$$

$$\pi_6 = {a_0}^{-1} \cdot L = \frac{L}{a_0} = M^0 L^0 T^0 \tag{Eq. 116}$$

6. Expressar la forma final com una relació entre els diferents termes de PI:

$$\frac{U_k}{U_e} = f\left(\frac{tc_0}{a_0}, \frac{t\dot{\delta}}{a_0}, \frac{\delta}{a_0}, \frac{h}{a_0}, \frac{b}{a_0}, \frac{l}{a_0}\right) \tag{Eq. 117}$$

Per poder reduir el nombre de paràmetres adimensionals, es podria introduir el paràmetre adimensional D (coeficient de desplaçament adimensional) definit per Nakamura.

Com que el Pi Buckinham ens permet fer les consideracions i canvis que considerem mentre es compleixi els paràmetres adimensionals, s'inverteix la fracció del tercer PI-paràmetre aplicant un exponent de -1 a la fracció.

$$\frac{U_k}{U_e} = f\left(\frac{tc_0}{a_0}, \frac{t\dot{\delta}}{a_0}, \frac{a_0}{\delta}, \frac{h}{a_0}, \frac{b}{a_0}, \frac{l}{a_0}\right) \tag{Eq. 118}$$

Finalment per reduir els PI-paràmetres, es multiplica el PI-2 amb el PI-3, d'aquesta manera es troba el paràmetre D de Nakamura.

$$\frac{U_k}{U_e} = f\left(\frac{tc_0}{a_0}, D = \frac{t\dot{\delta}}{\delta}, \frac{h}{a_0}, \frac{b}{a_0}, \frac{l}{a_0}\right) \tag{Eq. 119}$$

En poques paraules, l'assignació de cada PI-paràmetre finalment és:

PI_1 = $\frac{tc_0}{a_0}$ (Eq. 120)

PI_2 = $\frac{t\dot{\delta}}{\delta}$ (Eq. 121)

PI_3 = $\frac{h}{a_0}$ (Eq. 122)

PI_4 = $\frac{b}{a_0}$ (Eq. 123)

PI_5 = $\frac{l}{a_0}$ (Eq. 124)

A.8 Temps criteri de llindar.

A partir de l'(Eq. 22) i que el temps de transició és quan U_k/U_e= 1 i el temps del criteri de llindar és quan U_k/U_e= 0.2, es determina el coeficient de seguretat:

$$\frac{U_k}{U_e} = 1 = 55\frac{L^{4.6476}(0.00409D^4 - 0.039750D^3 + 0.14835D^2 - 0.15986D + 0.06853)}{a^{0.44}c_o^{2.2672}h^{1.9404}t_t^{2.2672}} \quad \text{(Eq. 125)}$$

$$\frac{U_k}{U_e} = 0.2 = 55\frac{L^{4.6476}(0.00409D^4 - 0.039750D^3 + 0.14835D^2 - 0.15986D + 0.06853)}{a^{0.44}c_o^{2.2672}h^{1.9404}t_c^{2.2672}} \quad \text{(Eq.120)}$$

$$t_t^{2.2672} = 55\frac{L^{4.6476}(0.00409D^4 - 0.039750D^3 + 0.14835D^2 - 0.15986D + 0.06853)}{a^{0.44}c_o^{2.2672}h^{1.9404}} \quad \text{(Eq. 121)}$$

$$0.2t_c^{2.2672} = t_t^{2.2672} \quad \text{(Eq. 126)}$$

$$t_c = \left(\frac{1}{0.2}\right)^{\frac{1}{2.2672}} t_t = 2.034t_t \quad \text{(Eq. 127)}$$

A.9 Nombre de Nakamura (D).

El nombre de Nakamura està definit per la (Eq. 10) i durant el treball es deineix que a velocitat constant té un valor de D=1 i a acceleració constant té un valor de D=2. Aquests dos valors defineixen aquestes velocitats a partir de l'anàlisi de la pendent de velocitat en la

D	$\dot{\delta}$ (mm/s)	velocitat	S (Beta)	D	$\dot{\delta}$ (mm/s)	velocitat	S (Beta)
0,25	250	d. = S t^-0.75	2,364354	1,75	1750	d. = S t^0.75	185040
0,5	500	d. = S t^-0.5	22,36068	2	2000	d. = S t	1000000
0,75	750	d. = S t^-0.25	158,6057	2,25	2250	d. = S t^1.25	5319797
1	1000	d. = S	1000	2,5	2500	d. = S t^1.5	27950850
1,25	1250	d. = S t^0.25	5910,885	2,75	2750	d. = S t^1.75	1,45E+08
1,5	1500	d. = S t^0.5	33541,02	3	3000	d. = S t^2	7,5E+08

Taula 14: Pendent de velocitat.

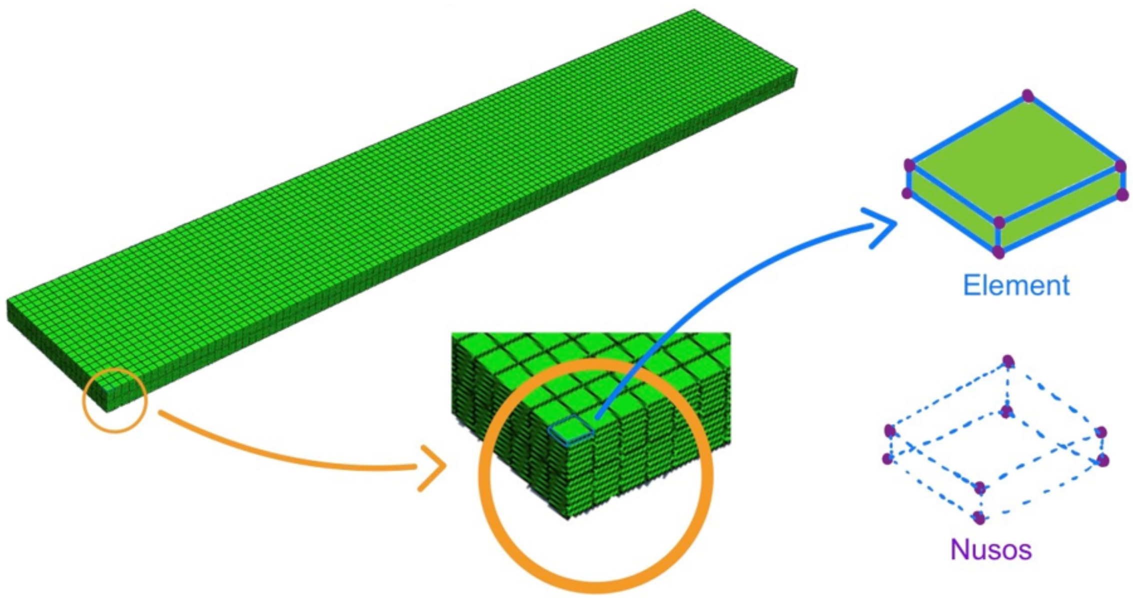
Com es pot observar per D=1, la velocitat te una equació constant i no depèn de la variable temps, en canvi per D=2, la velocitat depèn del temps i per tant la acceleració és constant.

B. PROGRAMACIÓ

En aquest cas s'ha utilitzat el programa Notepad++ per escriure el codi que definirà les simulacions. El llenguatge que s'utilitza és el Python. Es definirà la proveta en elements finits.

B.1 Arxiu INP

L'arxiu inp ("input file"), és l'arxiu on s'estableixen tots els paràmetres que intervenen en les simulacions: com la geometria de l'exemplar, les seves propietats físiques i mecàniques, orientació del sistema, factors externs que intervenen, restriccions, etc. També defineix el mallat de la proveta ja que l'anàlisi es realitzarà a partir del mètode d'elements finits.



Il·lustració 36: Proveta representada en Abaqus.

B.1.1 Paràmetres independents

```
*PARAMETER
**
**Parametres independents
 B=20                    # Amplada proveta
 n_capes=6               # Nombre de capes
 h_1=0.250               # Gruix d'una capa
 a0=60                   # Distancia preesquerda
 L=120                   # Longitud proveta
 elemmx = 1              # Elements per mm longitud proveta
 elemmy = 1              # Elements per mm amplada proveta
 n0 = 100000000          # Primer node-element
 nincz = 10000           # Increment per alçada
 nincy = 1000000         # Increments per amplada
 nvelinf = 200020001     # Node inferior on s'aplica velocitat
 nfixsup = 100010121     # Primer node superior fixat en totes direccions
 nfixinf = 200010121     # Primer node inferior fixat en totes direccions
 ncontsup = 100000001    # Primer node superior on s'aplica contacte
 vel = 2000              # Velocitat
 beta = 1000000          # Pendent de la corva de velocitat
 E = 128000              # Mòdul de Young
 nu = 0.35               # Relació de Poisson
 rho = 1.59e-9           # Densitat
 delta = 2               # Desplaçament per l'analysis
 time = 0.002            # Temps per l'analisi
**
```

Com es pot observar es defineixen tant els paràmetres geomètrics com propietats del material i factors externs.

- Geometria: S'assigna les dimensions originals i per defecte (B, n_capes, h_1, a0, L) de la proveta al igual que l'apartat **Representació i paràmetres de la proveta.** La diferencia amb l'apartat 3.3, és que el gruix de la proveta (h = 3mm) es divideix per capes (n_capes) ja que serà el nombre de capes que s'anirà modificant en les simulacions.

- Mallat: Es defineix els nusos que formen els elements finits que composen la proveta per una enumeració. En aquest cas el primer nus rep l'assignació de n0=100000000. El següent nus en l'eix de les z se l'assignarà una enumeració incrementada en nincz = 10000 (com exemple el següent nus en l'eix z seria n = 100010000). I el següent nus en l'eix de les y s'incrementa 1000000 (per tant el següent nus en l'eix de les y seria el 101000000) i així successivament.

- Restriccions:
  - Encastament: Es vol encastar la cara de la proveta ja que es una biga en voladís. La proveta es crea a partir de dos prismes rectangulars fixats en un tram (el tram es defineix en l'apartat [B.1.4 Nodes contacte]) entre les cares dels dos prismes. Per tant del prisma superior, el primer nus que s'encasta correspon al 100010121, i del inferior el 200010121, aquest nusos seran l'inici de l'encastament de la cara de la proveta.
  - Velocitat: el primer nus del tram d'aplicació de la velocitat s'aplica en el prisma inferior en el nus 200020001. S'aplica només en el prisma inferior ja que com la direcció de la velocitat serà vertical, el tram de prisma inferior a l'esquerda, farà contacte amb el prisma superior transmetent la mateixa velocitat.
  - Contacte: S'ha d'assignar el contacte entre les superfícies que forma l'esquerda, per tant el primer node que delimitarà aquesta superfície és el 100000001.

- Material: A la proveta se l'assigna les seves propietats mecàniques (E, nu, rho)
- Factors externs:
  - Velocitat: en el tram d'aplicació té un valor de 2000 mm/s.
  - Delta: Els desplaçament màxim vertical que pot realitzar el tram d'aplicació de la velocitat és de 2mm.
  - Temps: El temps de durada de la simulació ha de ser de 2 ms.
  - Beta: És el pendent de la corba de velocitat amb un valor de 1000000. Aquest valor ja es va definir en l'apartat **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

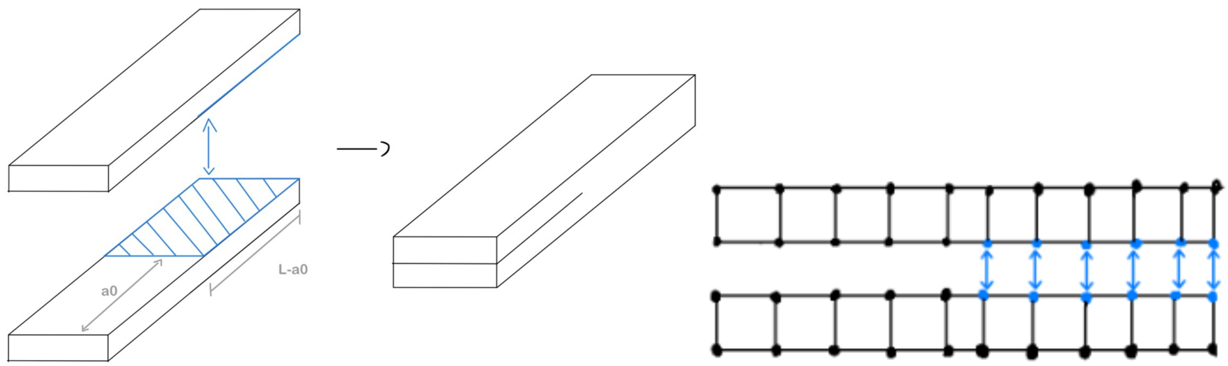
B.1.2 Paràmetres dependents

```
**Parametres dependents
 h=h_l*n_capes          # Alçada 1/2 proveta (un braç)
 n_el=elemmx*L          # Nombre d'elements en la direcció x
 time2=time/2           # Mig temps per doble aplicació de velocitat
**
```

En aquest bloc es defineix el gruix de la meitat de la proveta, es a dir el gruix de cada prisma rectangular, el nombre d'elements que tindrà la proveta al llarg del eix x (es a dir 1 element/mm x 120 mm = 120 elements) i el temps per la doble aplicació de la velocitat.

B.1.3 Nodes connectors

```
**Nodes connectors
 n_con1=n0+(a0*elemmx)+1     # Node superior del primer connector
 n_con2=2*n0+(a0*elemmx)+1   # Node inferior del primer connector
 n_con3=((L-a0)*elemmx)+1    # Nombre connectors en la direcció x
 n_con4=(B*elemmy)+1         # Nombre connectors en la direcció y
**
```



Il·lustració 37: Unió dels dos braços

En aquest bloc es defineix els primers nusos que es fixaran entre ells (més ben dit es fusionen els nusos del prisma superior amb el inferior) per adjuntar els dos prismes només en l'àrea on no pertany l'esquerda per formar 1 sol prisma rectangular amb esquerda. Per exemple el nus

B.1.3 Elements connectors

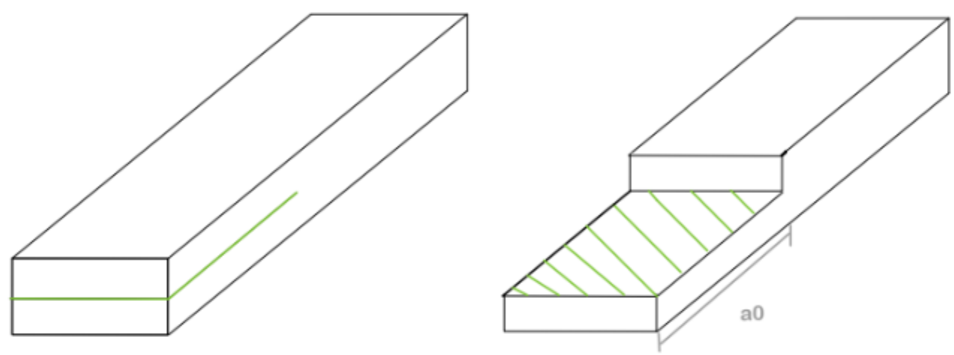
```
**Elements connectors
 el_con=(3*n0)+1                    # Primer element connector
 el_con_last=(3*n0)+1+(B*elemmy*nincy)   # últim element conector on s'apliquen condicions
**
```

Es defineix el primer element i l'últim on s'apliquen les condicions de connexió.

B.1.4 Nodes contacte

```
**Nodes contacte
 n_cont1=n0+1                # Node superior del primer contacte
 n_cont2=2*n0+1              # Node inferior del primer contacte
 n_cont3=(a0*elemmx)+1       # Nombre contactes en la direcció x
 n_cont4=(B*elemmy)+1        # Nombre contactes en la direcció y
**
```

Es defineix els primers nodes que composen l'àrea de contacte entre les cares dels dos prismes (o braços) que estan en contacte mentre la simulació està en execució. A diferencia de l'àrea anterior, els nodes entres cares no estan fusionats, sinó que només no es poden travessar i per tant poden lliscar els nodes d'un prisma amb els del altre prisma. També es defineix la quantitat de nodes que estaran en contacte en l'eix x i en l'eix y.



B.1.5 Nodes d'aplicació de velocitat i restriccions

```
**Nodes aplications velocity and restrictions
 nvelinff=nvelinf+(B*elemmy*nincy)      # Últim node velocitat inferior
 nfixsupf=nfixsup+(B*elemmy*nincy)      # Últim node superior fixat en totes direccions
 nfixinff=nfixinf+(B*elemmy*nincy)      # Últim node inferior fixat en totes direccions
**
```

En aquest bloc es defineixen els últims nodes que delimiten el tram d'aplicació de les restriccions. Tant de l'encast com la velocitat.

B.1.6 Definició de model.

```
**
**MESH
**
**Nodes
*node, input=DCB_nodes.inp, nset=n_superior
**
*NCOPY, OLD SET=n_superior, NEW SET=n_inferior, REFLECT=MIRROR, CHANGE NUMBER=<n0>
0,0,0,<L>,0,0
0,<B>,0
**
**Elements
*element, type=C3D8R, input=DCB_elem.inp, elset=el_superior
**
*ELCOPY, ELEMENT SHIFT=<n0>, OLD SET=el_superior, SHIFT NODES=<n0>, NEW SET=el_inferior, REFLECT
**
**Connectors
*element, type=conn3d2, elset=connect_master
<el_con>, <n_con1>, <n_con2>
*elgen, elset=connect
<el_con>, <n_con3>, 1, 1, <n_con4>, <nincy>, <nincy>
*connector section, elset=connect
join
**
** USEFUL SETS
**
*nset, nset=n_all
n_superior,n_inferior
**
*elset, elset=el_all
el_superior,el_inferior
**
*nset, nset=n_fixed_sup, gen
nodes_set_sup
**
*nset, nset=n_fixed_inf, gen
nodes_set_inf
**
*nset, nset=n_vel_inf, gen
<nvelinf>, <nvelinff>, <nincy>
**
*elset, elset=connectors, gen
<el_con>, <el_con_last>, <nincy>
**
*elset, elset=ele_cont_sup, gen
nodes_cont_sup
**
*surface, name=cont_sup, type=ELEMENT
ele_cont_sup,
**
*elset, elset=ele_cont_inf, gen
nodes_cont_inf
**
*surface, name=cont_inf, type=ELEMENT
ele_cont_inf,
**
```

En aquest bloc es defineixen paràmetres varis com la direcció de les variables L i b, el tipu d'element utilitzat, declaració de les variables de nodes i elements...

B.1.7 Creació de l'orientació del sistema

```
**
*orientation, name=local, definition=coordinates, system=rectangular
 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0
 3, 0
**
```

En aquest codi es defineix l'orientació.

B.1.8 Definició de les seccions i els materials

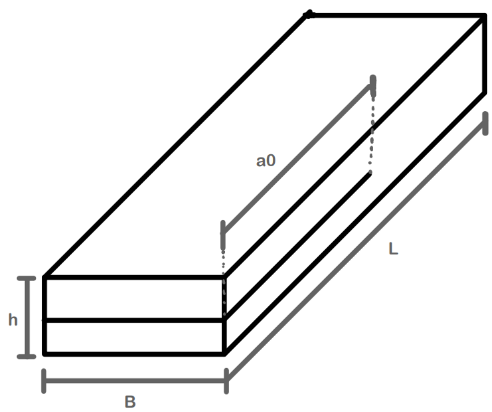
```
**
*solid section, elset=el_all, material=Composite, orientation=local
**
*Amplitude, name=Ampl
velocity_profile
**
** MATERIALS
**Composite Isotropic
**
*Material, name=Composite
*Density
 <rho>,
*Elastic
<E>, <nu>
**
** INTERACTION PROPERTIES
**
*Surface Interaction, name=Inter_contact
1.,
*Friction
0.,
*Surface Behavior, pressure-overclosure=HARD
**
```

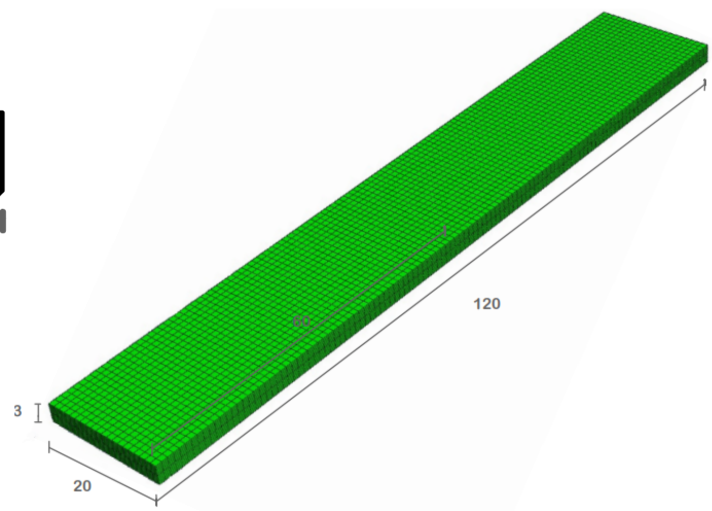
Com s'observa en aquest bloc es defineix que el material és un compòsit, el valor de la seva densitat, mòdul de Young i relació de Poisson. També es defineix les propietats d'interacció, en aquest cas la superfície de contacte, la fricció es deixa a zero (posteriorment s'aplicarà un valor a la fricció per veure com aquesta afecta als resultats de la simulació i si influeix gaire o en podem negligir.

B.1.9 Definició de les condicions de contorn i carrega

```
**
** STEP
**
*Step, nlgeom=YES
analisi DCB ttau
*Dynamic, Explicit
, <time>
*Bulk Viscosity
0.06, 1.2
**
** INTERACTIONS
**
** Interaction: Cont
*Contact Pair, interaction=Inter_contact
cont_sup, cont_inf
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
*Boundary
n_fixed_sup, ENCASTRE
n_fixed_inf, ENCASTRE
**
*Boundary
n_vel_inf, 2
n_vel_inf, 4
n_vel_inf, 6
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
*Boundary, amplitude=Ampl, type=VELOCITY
n_vel_inf, 3, 3, 1.0
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Output, field, time interval=1e-05
*Node Output
A, RF, U, V
**
*Output, field, time interval=1e-05
*Node Output, nset=n_vel_inf
RF, U, V
**
** HISTORY OUTPUT
**
*Output, history, time interval=1e-05
*Energy Output
ALLDMD, ALLIE, ALLKE, ALLSE
**
*End step
**
** End of the model
```

En aquest bloc es defineixen les interaccions físiques del materal.





Il·lustració 38: Representació de la proveta en Abaqus. Il·lustració 39: Representació esquemàtica de la proveta

B.2 Arxiu PSF

La capacitat d'estudi paramètric d'Abaqus, requereix que l'usuari escrigui i executi un scrpit Python (.psf). L'arxiu PSF, és l'arxiu on es descriu el mètode d'execució per generar la geometria de la proveta, els elements i nusos que la composen, les velocitats i restriccions que afecten a la proveta. En resum gràcies a aquest arxiu es comencen a fer les simulacions per cada PI-paràmetre i la seva variable que va canviant.

B.2.1. Inici de la definició de paràmetres.

```
# Initial and default values for the parameters

E_def = 128000       # default Young's modulus
vel_def = 2000       # default final velocity
a_def = 60           # default initial crack length
n_capes_def = 6      # default number of layers
B_def = 20           # default specimen width
L_def = 120          # default specimen length
beta_def = 1000000   # default parameter for velocity expression

h_a = 0.250          # constant layer thickness
h_b = 0.050          # constant layer thickness only for pi4 (h)
nu = 0.35            # constant Poisson's ration
rho = 1.59e-9        # constant density
delta = 2            # constant opening displacement
time = 0.002         # constant finishing time
d_time = time/20     # constant increment of time for velocity profile
d_inc = 0.1          # constant increment of the variable d (pi2)

#  Material parameter when varying pi1 (E) #
E_i = 1              # first point for Modulus
E_f = 49             # final point for Modulus
E_inc = 1            # increment point for Modulus

#  Velocity parameter when varying pi2 (D) #
vel_i = 100          # initial applied velocity
vel_f = 4000         # final applied velocity
vel_inc = 100        # increment in velocity

# Crack length values when varying pi3 (a) #
a_i = 60             # initial crack length
a_f = 62             # final crack length
a_inc = 2            # increment in crack length

# Thickness values when varying pi4 (h) #
capa_i = 18          # initial number of layers
capa_f = 20          # final number of layer
capa_inc = 2         # increment of layers

# Width values when varying pi5 (B) #
B_i = 10             # initial specimen width
B_f = 40             # final specimen width
B_inc = 1            # increment specimen width

# Longitudinal length values when varying pi6 (L) #
L_i = 80             # initial specimen length
L_f = 200            # final specimen length
L_inc = 5            # increment specimen length
```

Al igual que en l'apartat B.1.1 Paràmetres independents, es defineix els paràmetres independents. A més s'afegeix les variables que s'aniran canviant per obtenir l valor de les diferents simulacions. Es pot trobar: El valor inicial, el valor fina i l'increment de la variable entre simulacions.

A més una variable que anteriorment no s'havia definit és "h_b". Aquesta variable es el gruix de cada capa però només per les simulacions de PI_3, ja que en aquest PI, el que varia és el número de capes, per tant se li assigna un valor molt més petit per tenir un gran ventall de valors de simulació per sota i per sobre del gruix real de la proveta.

Realment les variables definides que si intervenen en el programa son les definides aquí en l'arxiu .psf, les que es van comentar en l'arxiu .inp són només de referència.

B.2.2. Valor de les variables unides.

```
# Joined variables values #
var_def = [E_def, vel_def, a_def, n_capes_def, B_def, L_def, beta_def]
var_i = [E_i, vel_i, a_i, capa_i, B_i, L_i]
var_f = [E_f, vel_f, a_f, capa_f, B_f, L_f]
var_inc = [E_inc, vel_inc, a_inc, capa_inc, B_inc, L_inc]
```

En aquest bloc es defineix quines variables son les de defecte, quines son les variables inicials, quines les final i finalment les variables de increment. A més també ordena segon el paràmetre PI que li corresponen menciona a l'apartat **A.7 Teorema de PI-Buckingham**, per exemple:

E_def, és la primera variable que en el programa correspon a p=0, i fa referencia al Pi_1 (vel_def -> (p=1 i PI_2)...).

B.2.3 Mida d'elements, nusos i declaració de paràmetres.

```
# Size of the finite elements
elemmx = 1          # elements per mm in length
elemmy = 1          # elements per mm in width

# Numbering of nodes and increments
ne0 = 100000001     # first node-element
nc0 = 300000001     # first connector
nincz = 10000       # node-element vertical increment (z axis)
nincy = 1000000     # node-element horizontal increment (y axis)

# Variables to be considered
pars = ('elemmx', 'elemmy', 'nincz', 'nincy', 'nvelinf', 'nfixsup', 'nfixinf', 'ncontsup',
'E', 'vel', 'a0', 'n_capes', 'B', 'L', 'beta', 'h_l', 'nu', 'rho', 'delta', 'time')
```

Primer es defineix la mida dels elements finits que formen la proveta. El elements finits són prismes rectangulars els quals estan orientats en funció del sistema d'orientació que es va definir en l'apartat B.1.7 Creació de l'orientació del sistema En l'eix x hi ha 1 element per mm de longitud (L) i en l'eix y hi ha 1 element per mm d'amplada (B).

En el següent bloc, es defineix el primer node, que forma part del primer element que es generarà (ne0). També es defineix el primer node connector (nc0) i el increment de l'assignació de node tant en l'eix z (nincz) com en l'eix y (nincy).

B.2.4 Condicions de les variables.

```
for p in range(1):
    counter = 1
    # Definition of the layer thickness for pi4
    if p == 3:
        h_l = h_b
    else:
        h_l = h_a

    for n in range (var_i[p],var_f[p]+var_inc[p],var_inc[p]):

        # Generation of the variable-value for each pi
        if p == 0:
            var_def[p] = 87.20156*(n**2)+1220.82188*n+4272.87656

        elif p == 1:
            var_def[p] = n
            var_def[-1] = (vel_i*counter)/(time**(counter*d_inc-1))

        else:
            var_def[p] = n
```

En aquest apartat es comença a assignar cada variable que anirà canviant amb una p.

“For p in range (1)”: vol dir per una p en rang de 1, que significa que anirà realitzant p de 1 en 1.

“counter = 1”, vol dir que per cada p va sumant de 1 en 1.

Per el canvi de la alçada h, el paràmetre PI és el 4, però com va de 0 a 5, se li assigna la p=3 i que el gruix de cada capa sigui h_b com s’ha mencionat en l’apartat B.2.1. Inici de la definició de paràmetres., si no és p=3 el gruix serà el de defecte.

“ for n in range (var_i[p], var_f[p] + var_inc[p], var_inc[p])” vol dir que les simulacions per cada PI paràmetre, inicien en la variable inicial (var_i [p]), el valor final serà(var_f[p] + var[inc]), ja que el comptador per cada variable inicialment és 1, per tant al final se li ha de sumar 1 més, i es a dir sumar var_inc[p] més, ja que és l’increment de valor de variable entre simulacions.

Quan p=0, que és PI_1 on la variable és el mòdul de Young, la formula de la corba de mòdul de Young en funció de quin valor té el comptador de increment.

B.2.5 Generació dels arxius inp amb nodes i elements.

```
# Generation of inp files with nodes and elements
n_n = ne0
z_n = 0.
fname0 = filename+'_'+id_l+str(p+1)+'_'+str(counter)+'_nodes.inp'
f0 = open(fname0,'w')
for i in range(var_def[3]+1):
    y_n = 0.
    for j in range(var_def[4]*elemmy+1):
        x_n = 0.
        n_n = ne0+j*nincy+i*nincz
        for z in range(var_def[5]*elemmx+1):
            node = str(n_n)+', '+str(x_n)+', '+str(y_n)+', '+str(z_n)+'\n'
            f0.write(node)
            n_n = n_n+1
            x_n = x_n+1./elemmx
        y_n = y_n+1/elemmy
    z_n = z_n+h_l
f0.close()

fname1 = filename+'_'+id_l+str(p+1)+'_'+str(counter)+'_elem.inp'
f1 = open(fname1,'w')
for i in range(var_def[4]*elemmy):
    for j in range(var_def[3]):
        for k in range(var_def[5]*elemmx):
            n_el = ne0+i*nincy+j*nincz+k
            el_1 = ne0+i*nincy+j*nincz+k
            el_2 = el_1+1
            el_3 = el_2+nincy
            el_4 = el_1+nincy
            el_5 = el_1+nincz
            el_6 = el_2+nincz
            el_7 = el_3+nincz
            el_8 = el_4+nincz
            el_a = str(n_el)+', '+str(el_1)+', '+str(el_2)+', '+str(el_3)+', '+str(el_4)
            el_b = ', '+str(el_5)+', '+str(el_6)+', '+str(el_7)+', '+str(el_8)+'\n'
            el_ab = el_a+el_b
            f1.write(el_ab)

f1.close()
```

El primer bloc, des de “n_n = ne0” fins al primer “f0.close()” genera el arxiu (.inp) pel procés de generació de tots els nodes que composen la proveta. Per realitzar aquesta generació de tots el nodes, es determina en quins rangs es vol limitar la generació dels nodes necessaris per la proveta, com es pot observar:

“ for i in a range (var_def[3] + 1]”: On i és un comptador que comença a 0 fins var_def[3], que equival al número de capes (6 capes) + 1, aquest + 1 es a causa de que el comptador del rang ja comença a 1, per tant per tenir en compte el últim valor de la variable el comptador ha de fer 1 més.

B.2.6 Definició dels nusos de restricció

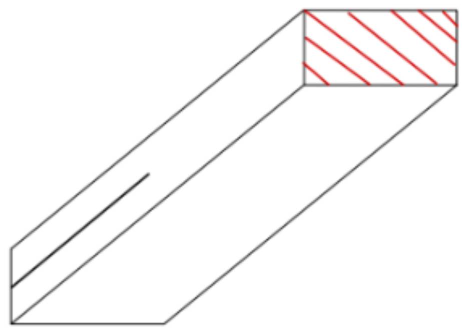
```
nvelinf = 2*(ne0-1)+1+int(var_def[3]/2*nincz)    # inferior velocity application node
nfixsup = ne0+elemmx*var_def[5]                  # first superior fixed node
nfixinf = 2*(ne0-1)+1+elemmx*var_def[5]          # first inferior fixed node
ncontsup = ne0                                   # first superior contact node

nset_fix_sup = ''
nset_fix_inf = ''
```

En aquest bloc es defineix a quin és el primer nus on se li aplica la velocitat. També en quin nus se li aplica el encastament de aquesta proveta en voladís (nfixsup per el primer node encastat del prisma rectangular superior, i nfixinf per el primer node encastat del prisma rectangular inferior); i quin és el primer nus el qual formarà part de l'àrea de contacte entre les cares que genera l'esquerda.

B.2.7 Assignació de tots els nusos que estaran encastats.

```
for i in range(var_def[3]+1):
    nfsi = nfixsup+(nincz*i)
    nfsf = (nfixsup+(var_def[4]*elemmy*nincy))+(nincz*i)
    nodes_s = str(nfsi)+', '+str(nfsf)+', '+str(nincy)+'\n'
    nset_fix_sup = nset_fix_sup+nodes_s

    nfii = ne0-1+nfixsup+(nincz*i)
    nfif = (ne0-1+nfixsup+(var_def[4]*elemmy*nincy))+(nincz*i)
    nodes_i = str(nfii)+', '+str(nfif)+', '+str(nincy)+'\n'
    nset_fix_inf = nset_fix_inf+nodes_i
    if i == var_def[3]:
        nset_fix_sup = nset_fix_sup+'**'
        nset_fix_inf = nset_fix_inf+'**'

nset_cont_sup = ''
nset_cont_inf = ''
```

En aquest apartat, s'assignaran quins nodes son els que es trobaran encastats dintre el rang de la alçada. El primer paràgraf es pels nusos del prisma superior (per exemple nfsi vol dir nus fixat superior [prisma superior] inicial), i el segon paràgraf es pels nusos del prisma inferior (nfii vol dir nus fixat inferior [prisma inferior] inicial).

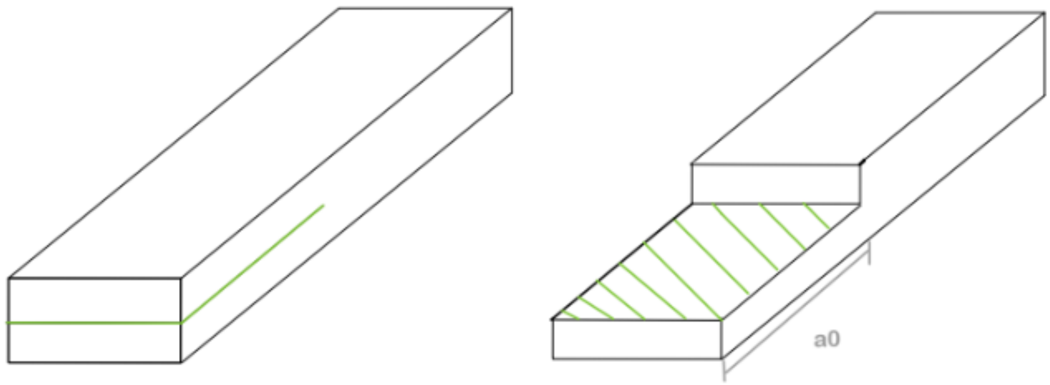


Il·lustració 40: Cara encastament

B.2.8 Assignació de tots els nusos que estaran en contacte.

```
for i in range(var_def[4]*elemmy):
    ncsi = ncontsup+nincy*i                                 # initial node contact surface
    ncsf = (ncontsup+(var_def[2]*elemmx)-1)+(nincy*i)       # final node contact surface
    nodes_cs = str(ncsi)+',  '+str(ncsf)+',  '+str(elemmx)+'\n'
    nset_cont_sup = nset_cont_sup+nodes_cs

    ncii = ne0-1+ncontsup+(nincy*i)
    ncif = (ne0-1+ncontsup+(var_def[2]*elemmx)-1)+(nincy*i)
    nodes_ci = str(ncii)+',  '+str(ncif)+',  '+str(elemmx)+'\n'
    nset_cont_inf = nset_cont_inf+nodes_ci
    if i == var_def[4]-1:
        nset_cont_sup = nset_cont_sup+'**'
        nset_cont_inf = nset_cont_inf+'**'

vel_profile = '         0., 0.'+'\n'
```

Al igual que en l'apartat anterior, s'assignaran aquells nusos que formaran part de l'àrea de contacte, i en aquest cas "ncsi" vol dir nus contacte superior [prisma superior] inicial.

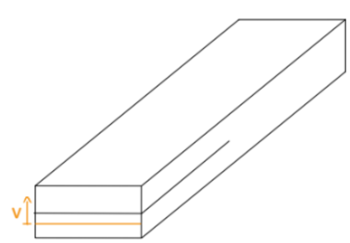


Il·lustració 41: Zona d'esquerda

B.2.9 Assignació de tots els nusos on s'aplica la velocitat.

```
if p == 1:
    for i in range(1,21,1):
        vel_n = var_def[-1]*(d_time*i)**(counter*d_inc-1)
        vel_line = '    '+str(d_time*i)+',  '+str(vel_n)+'\n'
        vel_profile = vel_profile+vel_line
    vel_profile = vel_profile[0:-1]

else:
    for i in range(1,21,1):
        vel_n = var_def[-1]*(d_time*i)
        vel_line = '    '+str(d_time*i)+',  '+str(vel_n)+'\n'
        vel_profile = vel_profile+vel_line
    vel_profile = vel_profile[0:-1]
```

En aquest blog s'assignen a quins nusos s'els aplica la restricció de velocitat. Si p=1, vol dir que esta en les simulacions del PI_2 on varia la velocitat Delta_V ($\dot{\delta}$), per això el primer bloc depen del counter.



Il·lustració 42: Aplicació velocitat.

B.2.10. Configuració de Abaqus.

```
# Section to write the inp
id_comb = id_l+str(p+1)+'_'+str(counter)
# Create study
dcb = ParStudy(par=pars, name=filename)
# Define name of input file
inputFiles = (filename)
# Define parameters
dcb.define(DISCRETE, par=pars)
```

En aquest bloc es defineixen el nom del arxiu d’entrada.

B.2.11 Generació de valors

```
# Sample by value
dcb.sample(VALUES, par='elemmx', values=elemmx)
dcb.sample(VALUES, par='elemmy', values=elemmy)
dcb.sample(VALUES, par='nincz', values=nincz)
dcb.sample(VALUES, par='nincy', values=nincy)
dcb.sample(VALUES, par='nvelinf', values=nvelinf)
dcb.sample(VALUES, par='nfixsup', values=nfixsup)
dcb.sample(VALUES, par='nfixinf', values=nfixinf)
dcb.sample(VALUES, par='ncontsup', values=ncontsup)
dcb.sample(VALUES, par='E', values=var_def[0])
dcb.sample(VALUES, par='vel', values=var_def[1])
dcb.sample(VALUES, par='a0', values=var_def[2])
dcb.sample(VALUES, par='n_capes', values=var_def[3])
dcb.sample(VALUES, par='B', values=var_def[4])
dcb.sample(VALUES, par='L', values=var_def[5])
dcb.sample(VALUES, par='beta', values=var_def[-1])
dcb.sample(VALUES, par='h_l', values=h_l)
dcb.sample(VALUES, par='nu', values=nu)
dcb.sample(VALUES, par='rho', values=rho)
dcb.sample(VALUES, par='delta', values=delta)
dcb.sample(VALUES, par='time', values=time)
```

En aquest apartat es genera els valors i resultats per cada simulació.

B.2.12 Generació arxius inp.

```
# Combine samples
dcb.combine(MESH,name=id_comb)

# Generate analysis job data
dcb.generate(template=filename)

# Change the names for the nodes and elements input files
inp_name = filename+'_'+id_comb+'_cl.inp'

file = open(inp_name,'r')
data_file = file.read()
file.close()

data_file = data_file.replace('DCB_nodes.inp',fname0)
data_file = data_file.replace('DCB_elem.inp',fname1)
data_file = data_file.replace('nodes_set_sup',nset_fix_sup)
data_file = data_file.replace('nodes_set_inf',nset_fix_inf)
data_file = data_file.replace('nodes_cont_sup',nset_cont_sup)
data_file = data_file.replace('nodes_cont_inf',nset_cont_inf)
data_file = data_file.replace('velocity_profile',vel_profile)

file=open(inp_name,'w')
file.writelines(data_file)
file.close()
```

En aquest bloc es generen els arxius de nodes, elements, nodes de restriccio pel braç superior com el inferior i el perfil de velocitat.

B.2.13 Execució i creació de les simulacions en abaqus.

```
#Execute jobs
dcb.execute(ALL, execOptions='cpus=4')

# Results extraction on .odb file #
# Gather results at end of step 1
dcb.output(file=ODB,step=1,inc=LAST)
fname=filename+'_'+id_comb+'_res.dat'
```

En aquest bloc es dona l'acció d'executar les simulacions i el resultat d'aquestes en arxius .odb. Si posteriorment s'obra un d'aquests arxius, mostrarà la deformació de la proveta i els seus valors.

B.2.14 Execució i creació de les simulacions en Abaqus.

```
# Gather results for output energies
#dcb.gather(request=HISTORY,results='kinetic',variable='ALLKE')
#dcb.gather(request=HISTORY,results='strain',variable='ALLSE')
#energies_ratio = 'kinetic'/'strain'
#dcb.report(XYPLOT, par='a0', file=fname, results=('kinetic','strain','energies_ratio'))

var_def = [E_def, vel_def, a_def, n_capes_def, B_def, L_def, beta_def]
counter = counter+1
```

En aquest apartat només es torna a definir les variables per defecte i el comptador que es va sumant per cada simulació.

B.3 Arxiu post PSF.

B.3.1 Inici de la definició de paràmetres.

```
# Initial and default values for the parameters

E_def = 161000       # default Young's modulus
vel_def = 2000       # default final velocity
a_def = 60           # default initial crack length
n_capes_def = 6      # default number of layers
B_def = 20           # default specimen width
L_def = 120          # default specimen length
beta_def = 1000000   # default parameter for velocity expression

h_a = 0.250          # constant layer thickness
h_b = 0.008          # constant Poisson's ration
rho = 1.59e-9        # constant density
delta = 2            # constant opening displacement
time = 0.002         # constant finishing time
d_time = time/20     # constant increment of time for velocity profile
d_inc = 0.1          # constant increment of the variable d (pi2)

#  Material parameter when varying pi1 (E) #
E_i = 1              # first point for Modulus
E_f = 49             # final point for Modulus
E_inc = 1            # increment point for Modulus

#  Velocity parameter when varying pi2 (D) #
vel_i = 100          # initial applied velocity
vel_f = 4000         # final applied velocity
vel_inc = 100        # increment in velocity

# Crack length values when varying pi3 (a) #
a_i = 60             # initial crack length
a_f = 62             # final crack length
a_inc = 2            # increment in crack length

# Thickness values when varying pi4 (h) #
capa_i = 16          # initial number of layers
capa_f = 68          # final number of layer
capa_inc = 2         # increment of layers

# Width values when varying pi5 (B) #
B_i = 10             # initial specimen width
B_f = 40             # final specimen width
B_inc = 1            # increment specimen width

# Longitudinal length values when varying pi6 (L) #
L_i = 80             # initial specimen length
L_f = 200            # final specimen length
L_inc = 5            # increment specimen length

# Joined variables values #
var_def = [E_def, vel_def, a_def, n_capes_def, B_def, L_def, beta_def]
var_i = [E_i, vel_i, a_i, capa_i, B_i, L_i]
var_f = [E_f, vel_f, a_f, capa_f, B_f, L_f]
var_inc = [E_inc, vel_inc, a_inc, capa_inc, B_inc, L_inc]
```

Aquest codi és igual que els apartats B.2.1. Inici de la definició de paràmetres. i B.2.2. Valor de les variables unides.

B.3.2 Mida de elements i nusos.

```
# Size of the finite elements
elemmx = 1          # elements per mm in length
elemmy = 1          # elements per mm in width

# Numbering of nodes and increments
ne0 = 100000001     # first node-element
nc0 = 300000001     # first connector
nincz = 10000       # node-element vertical increment (z axis)
nincy = 1000000     # node-element horizontal increment (y axis)
```

Aquest bloc és igual que l'apartat B.2.3 Mida d'elements, nusos i declaració de paràmetres.

B.3.3 Condicions de les variables.

```
for p in range(1):

    fname0 = filename+'_'+id_l+str(p+1)+'.txt'
    f0 = open(fname0,'w')
    counter = 3
    # Definition of the layer thickness for pi4
    if p == 3:
        h_l = h_b
    else:
        h_l = h_a

    for n in range (var_i[p],var_f[p]+var_inc[p],var_inc[p]):

        # Generation of the variable-value for each pi
        if p == 0:
            var_def[p] = 87.88725*(n**2)+1230.4215*n+4306.47525

        elif p == 1:
            var_def[p] = n
            var_def[-1] = (vel_i*counter)/(time**(counter*d_inc-1))

        else:
            var_def[p] = n
```

Aquest bloc és igual que l'Annex B.2.4 Condicions de les variables.

B.3.4 Escriptura de inp.

```
# Section to write the inp
id_comb = id_1+str(p+1)+'_'+str(counter)

odbname = filename+'_'+id_comb+'_c1.odb'
```

B.3.5 Càlculs i resultats.

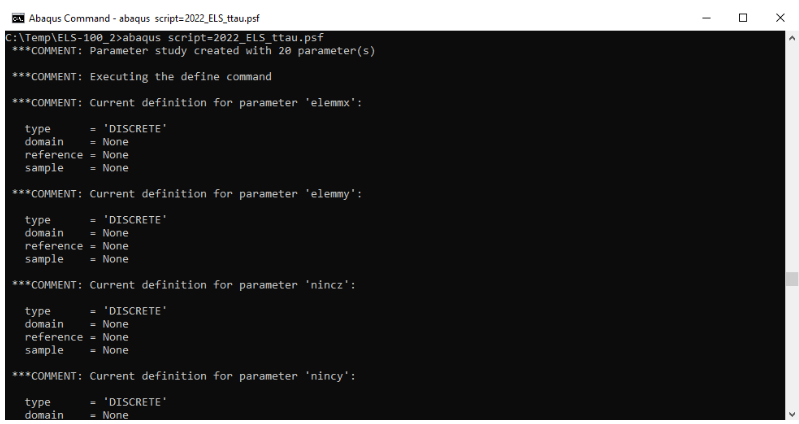
```
    # Gather results for output energies
    odb = openOdb(path=odbname)
    step = odb.steps['Step-1']
    region = step.historyRegions['Assembly Assembly-1']
    kinetic = region.historyOutputs['ALLKE'].data[-1][1]
    strain = region.historyOutputs['ALLSE'].data[-1][1]
    energies_ratio = kinetic/strain
    line = str(var_def[p])+','+str(energies_ratio)+'\n'
    f0.write(line)
    odb.close()


    var_def = [E_def, vel_def, a_def, n_capes_def, B_def, L_def, beta_def]
    counter = counter+1
f0.close()
```

En aquest bloc realitza la divisió de l'energia cinètica entre la elàstica, per cada resultat de simulació per cada variable. Finalment en la carpeta on s'han executat les simulacions apareixerà un arxiu de text on mostrarà els resultats.

B.4 Execució de arxius.

Per començar a executar les simulacions, només cal entrar al terminal del ordinador, o cercar en el buscador de windows Abaqus Command. Un cop clicada l'aplicació, s'obrirà la terminal de l'ordinador, s'ha de situar la carpeta on es troba els arxius .inp, .psf i post.psf junts, i seguidament escriure la comanda:

Per activar les simulacions: "Abaqus script=nom-arxiu.psf"



Il·lustració 43: Comand del Abaqus.

Un cop finalitzades les simulacions, per executar els resultats: "Abaqus script=nom-arxiu_post.psf".

Aquest arxiu crearà en la mateixa carpeta un bloc de notes de l'aplicació Notepad per cada PI-paràmetre, en el qual es podran observar dos dades per fila (el primer és el valor de la variable que s'ha anat canviant per cada simulació, i el segon és el valor del ràtio d'energia que li correspon).

C. GENERACIÓ DE GRÀFIQUES (EXCEL)

En aquest apartat es representaran els gràfics de ràtio d'energia, tant la gràfica teòrica amb el ràtio d'energia trobat analíticament [**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**] com la gràfica experimental trobada amb els valors de les simulacions de ràtio d'energia. A continuació s'introdueix els valors mínims, màxims i increments per cada variable de forma aleatòria:

Pi	Variable	Min value	Max value	Increment
1	Co	2.00E+06	1,40E+07	2.50E+05
2	D	100	4000	100
3	h	0.6	3	0.1
4	b	10	40	1
5	l	80	200	5

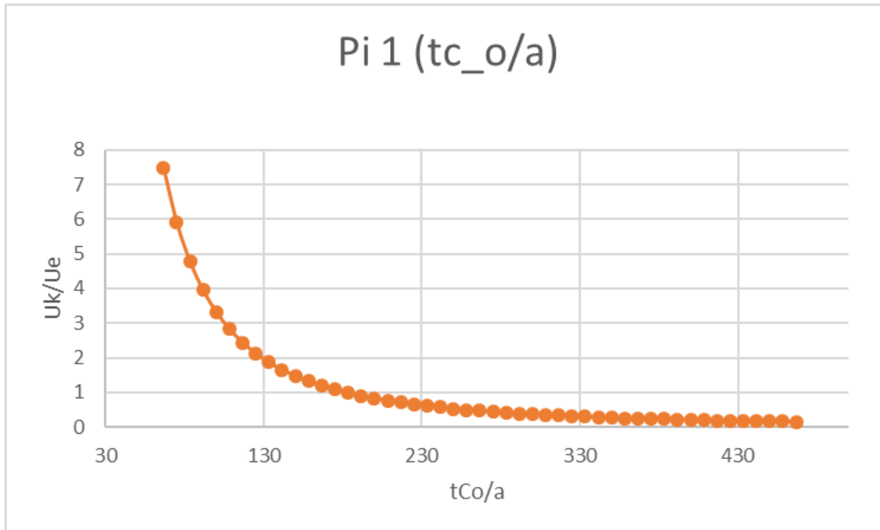
Taula 15: Rangs de les variables.

C.1 Gràfiques teòriques.

π_1 (Variant Co): Aplicant la formula, podem trobar el ratio d'energia per cada valor de C0.

E11	Pi 1 (tc_o/a)	Uk/Ue (teo)
5580.90	66.66666667	7.467428571
7063.33	75	5.900190476
8720.16	83.33333333	4.779154286
10551.39	91.66666667	3.949714286
12557.03	100	3.318857143
14737.06	108.3333333	2.827901944
17091.51	116.6666667	2.438344023
19620.35	125	2.124068571
22323.60	133.3333333	1.866857143
25201.25	141.6666667	1.653686604
28253.31	150	1.475047619
31479.76	158.3333333	1.323865453
34880.63	166.6666667	1.194788571
38455.89	175	1.083708455
42205.56	183.3333333	0.987428571
46129.63	191.6666667	0.903431812
50228.10	200	0.829714286
54500.98	208.3333333	0.764664686
58948.26	216.6666667	0.706975486
63569.94	225	0.65557672
68366.03	233.3333333	0.609586006
73336.51	241.6666667	0.568270426
78481.41	250	0.531017143
83800.70	258.3333333	0.49731054
89294.40	266.6666667	0.466714286
94962.50	275	0.438857143
100805.01	283.3333333	0.413421651
106821.91	291.6666667	0.390135044
113013.23	300	0.368761905
119378.94	308.3333333	0.349098195
125919.06	316.6666667	0.330966363
132633.58	325	0.314211327
139522.50	333.3333333	0.298697143
146585.83	341.6666667	0.284304241
153823.56	350	0.270927114
161235.69	358.3333333	0.258472379
168822.23	366.6666667	0.246857143
176583.16	375	0.236007619
184518.51	383.3333333	0.225857953
192628.25	391.6666667	0.216349221
200912.40	400	0.207428571
209370.95	408.3333333	0.199048492
218003.91	416.6666667	0.191166171
226811.26	425	0.183742956
235793.03	433.3333333	0.176743872
244949.19	441.6666667	0.170137212
254279.76	450	0.16389418
263784.73	458.3333333	0.157988571
273464.10	466.6666667	0.152396501

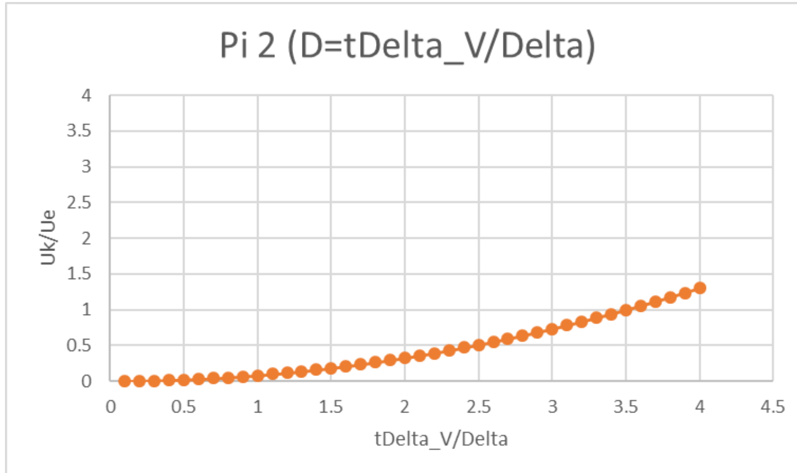
Taula 16: Ràtio d'energia variant Co teòric.



Il·lustració 44: Gràfic ràtio d'energia variant Co teòric.

π_2 (Variant velocitat Delta_V)

Delta_V	Pi 2 (tDelta_V/Delta)	Uk/Ue (teo)
100	0.1	0.000813964
200	0.2	0.003255857
300	0.3	0.007325679
400	0.4	0.013023429
500	0.5	0.020349107
600	0.6	0.029302715
700	0.7	0.039884251
800	0.8	0.052093715
900	0.9	0.065931108
1000	1	0.08139643
1100	1.1	0.09848968
1200	1.2	0.117210859
1300	1.3	0.137559967
1400	1.4	0.159537003
1500	1.5	0.183141967
1600	1.6	0.208374861
1700	1.7	0.235235682
1800	1.8	0.263724433
1900	1.9	0.293841112
2000	2	0.32558572
2100	2.1	0.358958256
2200	2.2	0.393958721
2300	2.3	0.430587114
2400	2.4	0.468843436
2500	2.5	0.508727687
2600	2.6	0.550239866
2700	2.7	0.593379974
2800	2.8	0.638148011
2900	2.9	0.684543976
3000	3	0.732567869
3100	3.1	0.782219691
3200	3.2	0.833499442
3300	3.3	0.886407122
3400	3.4	0.94094273
3500	3.5	0.997106266
3600	3.6	1.054897732
3700	3.7	1.114317125
3800	3.8	1.175364448
3900	3.9	1.238039699
4000	4	1.302342879



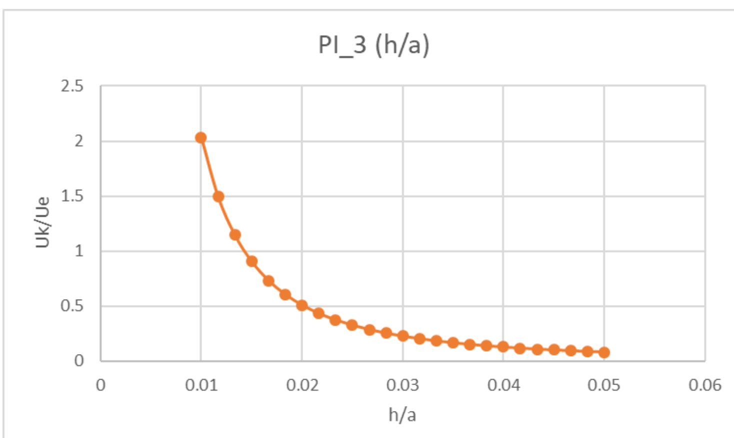
Il·lustració 45: Gràfic ràtio d'energia variant Delta_V teòric.

Taula 17: Ràtio d'energia variant Delta_V ($\dot{\delta}$) teòric.

π_3 -> Variant h

Capes	h	Pi 3 (h/a)	Uk/Ue (teo)
12	0.6	0.01	2.03491075
14	0.7	0.011667	1.49503647
16	0.8	0.013333	1.1446373
18	0.9	0.015	0.90440478
20	1	0.016667	0.73256787
22	1.1	0.018333	0.60542799
24	1.2	0.02	0.50872769
26	1.3	0.021667	0.43347211
28	1.4	0.023333	0.37375912
30	1.5	0.025	0.32558572
32	1.6	0.026667	0.28615932
34	1.7	0.028333	0.25348369
36	1.8	0.03	0.22610119
38	1.9	0.031667	0.20292739
40	2	0.033333	0.18314197
42	2.1	0.035	0.16611516
44	2.2	0.036667	0.151357
46	2.3	0.038333	0.13848164
48	2.4	0.04	0.12718192
50	2.5	0.041667	0.11721086
52	2.6	0.043333	0.10836803
54	2.7	0.045	0.10048942
56	2.8	0.046667	0.09343978
58	2.9	0.048333	0.08710676
60	3	0.05	0.08139643

Taula 18: Ràtio d'energia variant h teòric.

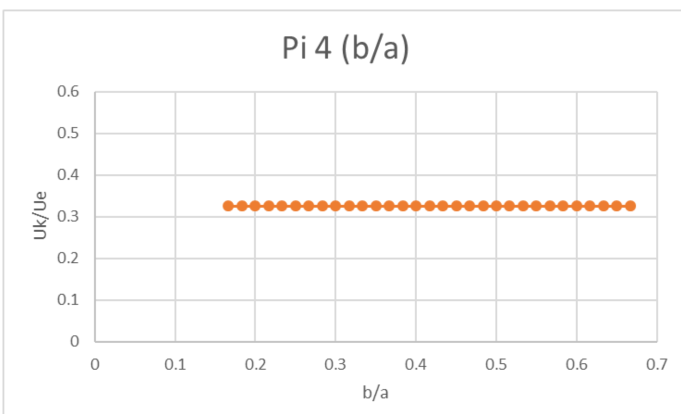


Il·lustració 46: Gràfic ràtio d'energia variant h teòric.

π_4 -> Variant b

b	Pi 4 (b/a)	Uk/Ue (teo)
10	0.166667	0.32558572
11	0.183333	0.32558572
12	0.2	0.32558572
13	0.216667	0.32558572
14	0.233333	0.32558572
15	0.25	0.32558572
16	0.266667	0.32558572
17	0.283333	0.32558572
18	0.3	0.32558572
19	0.316667	0.32558572
20	0.333333	0.32558572
21	0.35	0.32558572
22	0.366667	0.32558572
23	0.383333	0.32558572
24	0.4	0.32558572
25	0.416667	0.32558572
26	0.433333	0.32558572
27	0.45	0.32558572
28	0.466667	0.32558572
29	0.483333	0.32558572
30	0.5	0.32558572
31	0.516667	0.32558572
32	0.533333	0.32558572
33	0.55	0.32558572
34	0.566667	0.32558572
35	0.583333	0.32558572
36	0.6	0.32558572
37	0.616667	0.32558572
38	0.633333	0.32558572
39	0.65	0.32558572
40	0.666667	0.32558572

Taula 19: Ràtio d'energia variant b teòric.

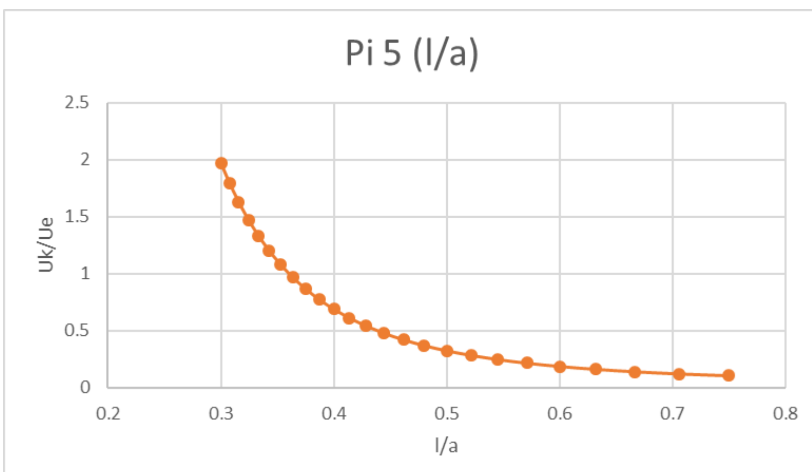


Il·lustració 47: Gràfic ràtio d'energia variant b teòric

π_5 -> Variant L

l	Pi 5 (L/a)	Uk/Ue (teo)
80	0.75	0.105970661
85	0.705882353	0.122506452
90	0.666666667	0.141518793
95	0.631578947	0.16330744
100	0.6	0.188189277
105	0.571428571	0.216498317
110	0.545454545	0.248585702
115	0.52173913	0.284819703
120	0.5	0.32558572
125	0.48	0.371286281
130	0.461538462	0.422341044
135	0.444444444	0.479186795
140	0.428571429	0.54227745
145	0.413793103	0.612084053
150	0.4	0.689094776
155	0.387096774	0.773814922
160	0.375	0.866766921
165	0.363636364	0.968490334
170	0.352941176	1.079541848
175	0.342857143	1.200495282
180	0.333333333	1.33194158
185	0.324324324	1.47448882
190	0.315789474	1.628762204
195	0.307692308	1.795404065
200	0.3	1.975073866

Taula 20: Ràtio d'energia variant L teòric.



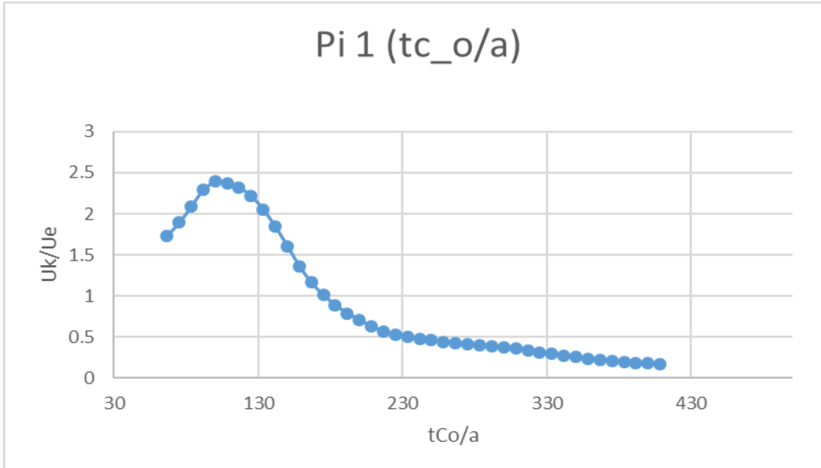
Il·lustració 48: Gràfic ràtio d'energia variant L teòric.

C2. Gràfiques experimentals.

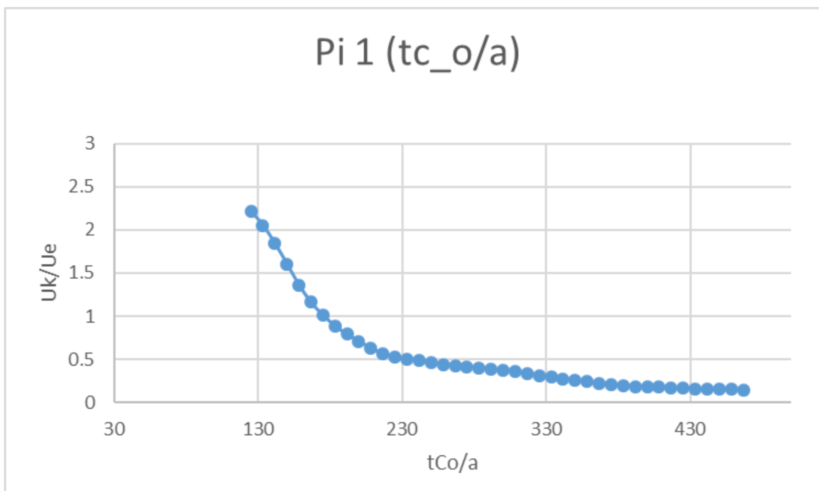
π_1 (Variant Co): Aplicant la formula, podem trobar el ratio d'energia per cada valor de C0.

E11	Pi 1 (tc_o/a)	Uk/Ue (exp)
5580.90	66.66666667	1.736889538
7063.33	75	1.893551162
8720.16	83.33333333	2.090608662
10551.39	91.66666667	2.293132316
12557.03	100	2.392343702
14737.06	108.3333333	2.373183348
17091.51	116.6666667	2.322198213
19620.35	125	2.216258573
22323.60	133.3333333	2.053779972
25201.25	141.6666667	1.844345059
28253.31	150	1.60699023
31479.76	158.3333333	1.363110787
34880.63	166.6666667	1.161398552
38455.89	175	1.011629574
42205.56	183.3333333	0.887454366
46129.63	191.6666667	0.789387133
50228.10	200	0.708571191
54500.98	208.3333333	0.631166652
58948.26	216.6666667	0.569120564
63569.94	225	0.528247084
68366.03	233.3333333	0.501290779
73336.51	241.6666667	0.481381071
78481.41	250	0.461209295
83800.70	258.3333333	0.44233637
89294.40	266.6666667	0.423038012
94962.50	275	0.409482424
100805.01	283.3333333	0.398027982
106821.91	291.6666667	0.388375796
113013.23	300	0.371242414
119378.94	308.3333333	0.355313232
125919.06	316.6666667	0.333713609
132633.58	325	0.311524879
139522.50	333.3333333	0.292384762
146585.83	341.6666667	0.274341522
153823.56	350	0.255614472
161235.69	358.3333333	0.239709329
168822.23	366.6666667	0.222403737
176583.16	375	0.207424039
184518.51	383.3333333	0.197326216
192628.25	391.6666667	0.18649309
200912.40	400	0.180183683
209370.95	408.3333333	0.174538638
218003.91	416.6666667	0.166965466
226811.26	425	0.162044951
235793.03	433.3333333	0.159357375
244949.19	441.6666667	0.15665214
254279.76	450	0.15188633
263784.73	458.3333333	0.149510046
273464.10	466.6666667	0.145913245

Taula 21: Ràtio d'energia variant simulació.



Il·lustració 49: Gràfic ràtio d'energia variant Co simulació original.

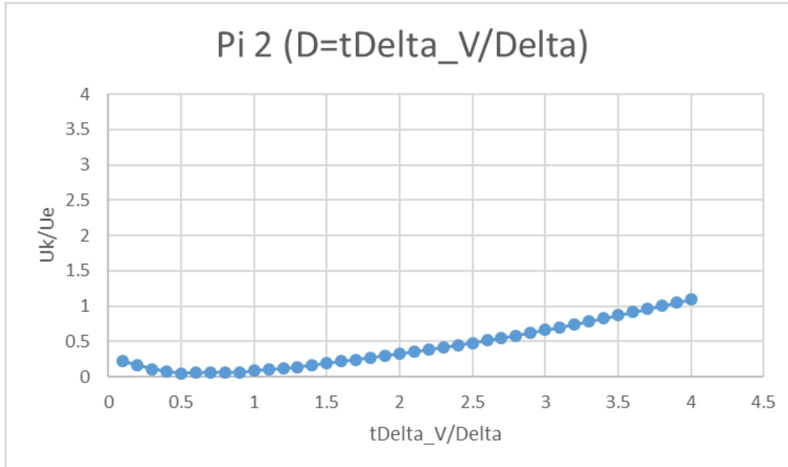


Il·lustració 50: Gràfic ràtio d'energia variant Co simulació reduïda.

Per trobar posteriorment la formula de la corba, només s'escollirà els valors de la simulació a partir de PI1 = 125, d'aquesta forma no hi haurà dificultats a causa de la pujada de dades anterior.

π_2 -> (Variant velocitat Delta_V)

Delta_V	Pi 2 (tDelta_V/Delta)	Uk/Ue (exp)
100	0.1	0.220703806
200	0.2	0.163154806
300	0.3	0.112314184
400	0.4	0.074698889
500	0.5	0.053367936
600	0.6	0.055421948
700	0.7	0.060681944
800	0.8	0.05666575
900	0.9	0.060381222
1000	1	0.083531916
1100	1.1	0.101582547
1200	1.2	0.11424447
1300	1.3	0.137339575
1400	1.4	0.163950893
1500	1.5	0.190643003
1600	1.6	0.217245396
1700	1.7	0.244029665
1800	1.8	0.270979996
1900	1.9	0.298477605
2000	2	0.326722841
2100	2.1	0.355497104
2200	2.2	0.38514186
2300	2.3	0.415994336
2400	2.4	0.447366252
2500	2.5	0.480246367
2600	2.6	0.514283645
2700	2.7	0.549056972
2800	2.8	0.585095034
2900	2.9	0.622935731
3000	3	0.661328868
3100	3.1	0.701137135
3200	3.2	0.742283096
3300	3.3	0.784311573
3400	3.4	0.827147111
3500	3.5	0.870227704
3600	3.6	0.914428194
3700	3.7	0.959559306
3800	3.8	1.004693298
3900	3.9	1.050846544
4000	4	1.096254751



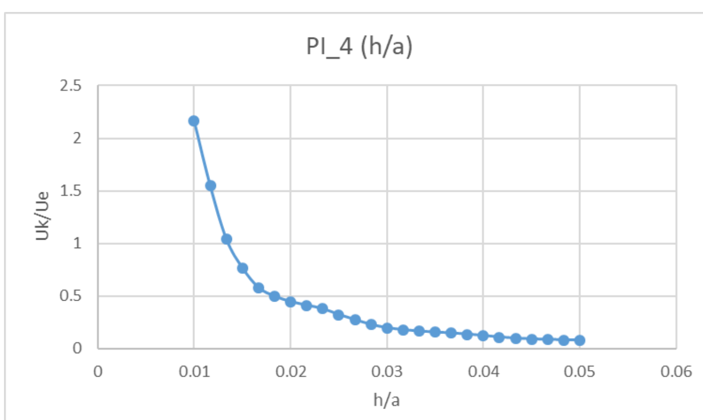
Il·lustració 51: Gràfic ràtio d'energia variant Delta_V simulació.

Taula 22: Ràtio d'energia variant Delta_V simulació.

π_3 -> Variant h

Capes	h	Pi 3 (h/a)	Uk/Ue (exp)
12	0.6	0.01	2.1652952
14	0.7	0.011667	1.54612606
16	0.8	0.013333	1.0399561
18	0.9	0.015	0.76611594
20	1	0.016667	0.57870473
22	1.1	0.018333	0.49711152
24	1.2	0.02	0.44598217
26	1.3	0.021667	0.41164356
28	1.4	0.023333	0.37742087
30	1.5	0.025	0.32197922
32	1.6	0.026667	0.2730127
34	1.7	0.028333	0.22739518
36	1.8	0.03	0.19637263
38	1.9	0.031667	0.1773828
40	2	0.033333	0.16326845
42	2.1	0.035	0.15532492
44	2.2	0.036667	0.14631158
46	2.3	0.038333	0.135236
48	2.4	0.04	0.12191434
50	2.5	0.041667	0.1076167
52	2.6	0.043333	0.09698037
54	2.7	0.045	0.08905599
56	2.8	0.046667	0.0844481
58	2.9	0.048333	0.08134144
60	3	0.05	0.07812095

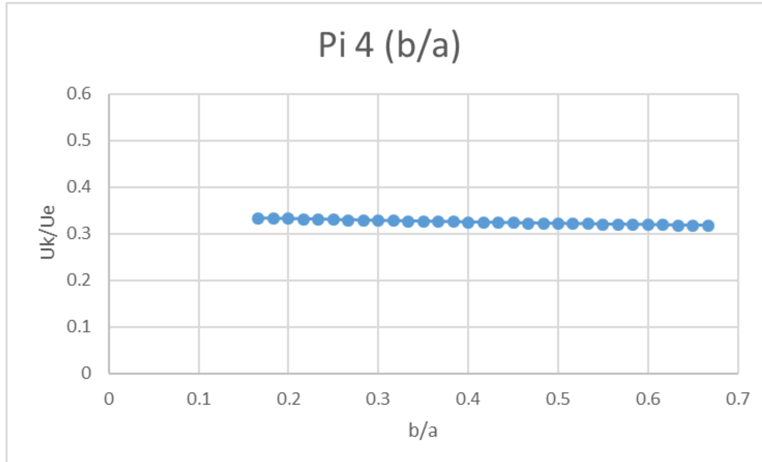
Taula 23: Ràtio d'energia variant h simulació.



Il·lustració 52: Gràfic ràtio d'energia variant h simulació.

π_4 -> Variant b

b	Pi 4 (b/a)	Uk/Ue (exp)
10	0.166667	0.332587692
11	0.183333	0.331946904
12	0.2	0.331525459
13	0.216667	0.330921031
14	0.233333	0.330353359
15	0.25	0.329602807
16	0.266667	0.328883845
17	0.283333	0.328612883
18	0.3	0.327664895
19	0.316667	0.327252202
20	0.333333	0.326722841
21	0.35	0.32603961
22	0.366667	0.325380292
23	0.383333	0.324847729
24	0.4	0.324395913
25	0.416667	0.323875356
26	0.433333	0.323294389
27	0.45	0.322800791
28	0.466667	0.322406114
29	0.483333	0.321871859
30	0.5	0.321311725
31	0.516667	0.320789554
32	0.533333	0.320429329
33	0.55	0.319998734
34	0.566667	0.319676217
35	0.583333	0.319047261
36	0.6	0.318672827
37	0.616667	0.318350867
38	0.633333	0.3178758
39	0.65	0.31745687
40	0.666667	0.317069377

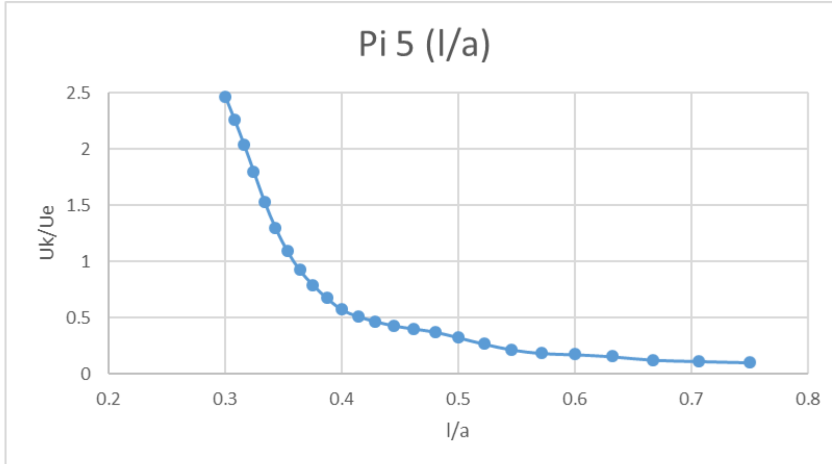


Il·lustració 53: Gràfic ràtio d'energia variant b simulació.

Taula 24: Ràtio d'energia variant b simulació.

π_5 -> Variant L

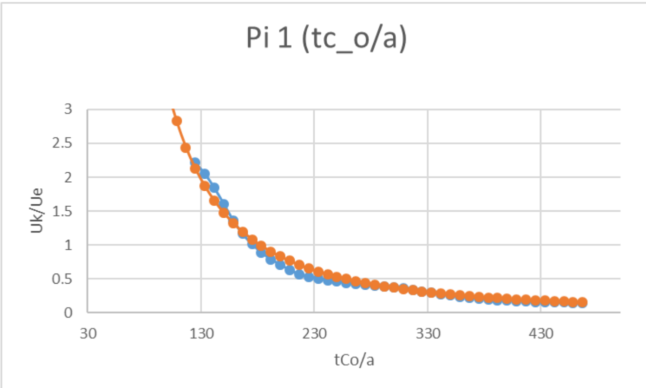
l	Pi 5 (L/a)	Uk/Ue (exp)
80	0.75	0.10505693
85	0.705882353	0.11635025
90	0.666666667	0.12773537
95	0.631578947	0.15840218
100	0.6	0.17647111
105	0.571428571	0.18707636
110	0.545454545	0.21937687
115	0.52173913	0.27048592
120	0.5	0.32672284
125	0.48	0.37701029
130	0.461538462	0.40534567
135	0.444444444	0.43295334
140	0.428571429	0.47120943
145	0.413793103	0.51501411
150	0.4	0.57475825
155	0.387096774	0.67550294
160	0.375	0.79411837
165	0.363636364	0.92594896
170	0.352941176	1.09517256
175	0.342857143	1.30106731
180	0.333333333	1.53526649
185	0.324324324	1.7963505
190	0.315789474	2.04354161
195	0.307692308	2.26291902
200	0.3	2.46329802



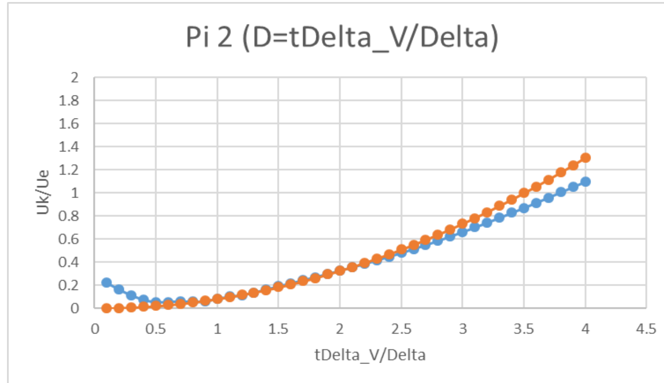
Il·lustració 54: Gràfic ràtio d'energia variant L simulació.

Taula 25: Ràtio d'energia variant L simulació.

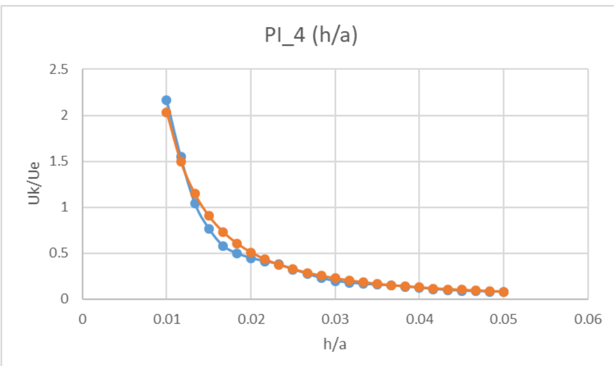
C.3 Comparació Teòric-Experimental



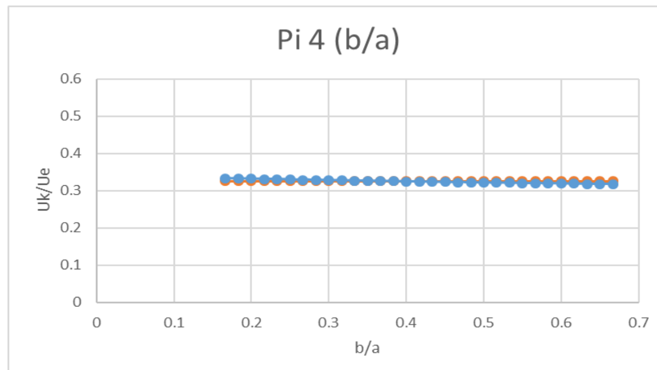
Il·lustració 55: Ràtio d'energia teòric vs simulació Co.



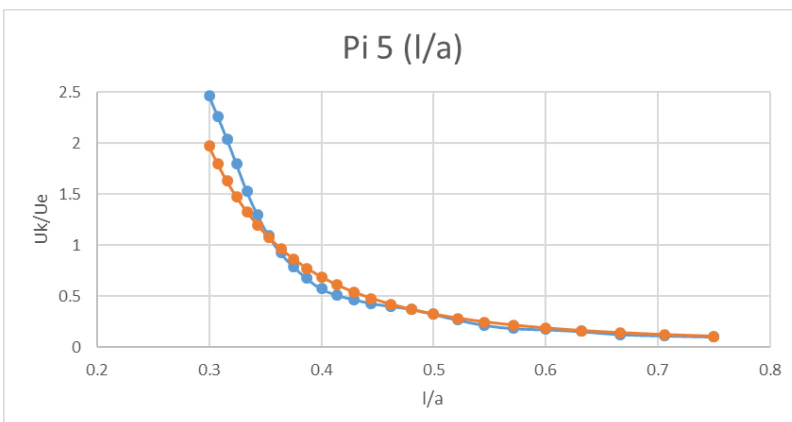
Il·lustració 56: Ràtio d'energia teòric vs simulació Delta_V.



Il·lustració 57: Ràtio d'energia teòric vs simulació h.



Il·lustració 58: Ràtio d'energia teòric vs simulació b.

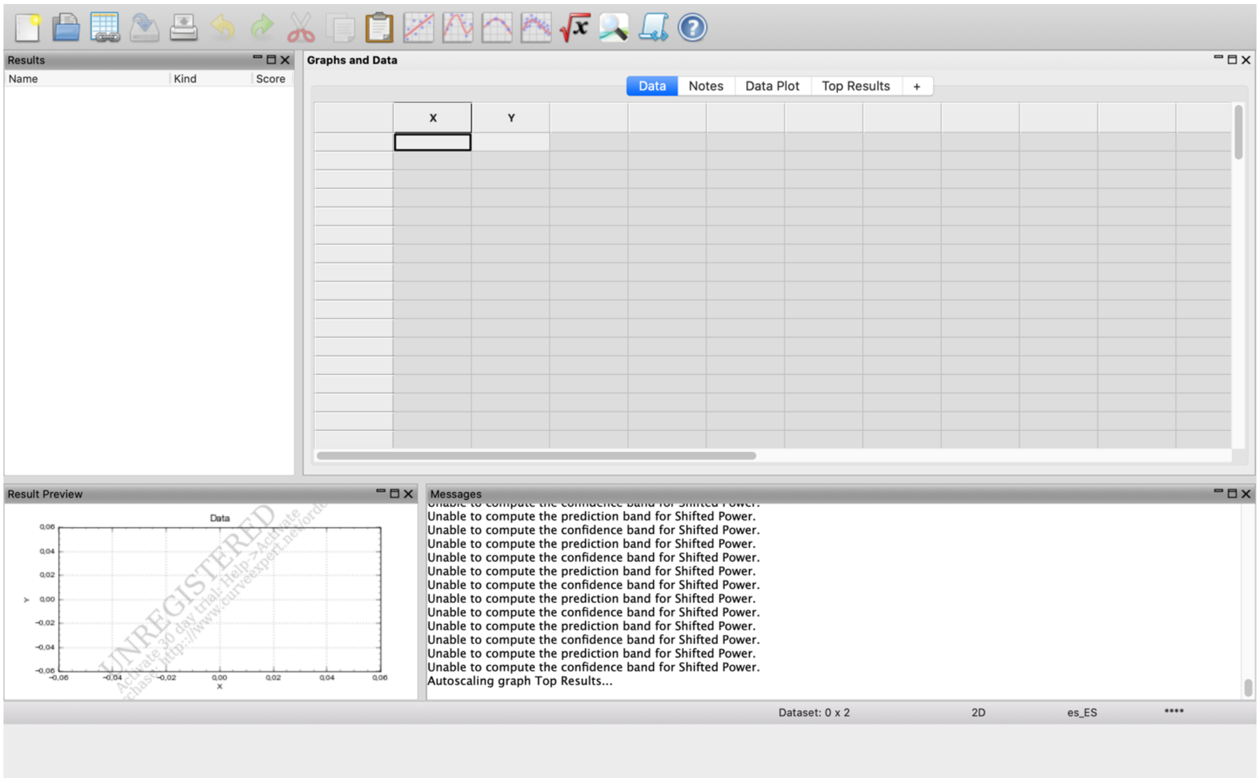


Il·lustració 59: Ràtio d'energia teòric vs simulació L.

Com es pot observar, les corbes acaben essent molt semblants tant teòricament com per simulació. Per tant, es confirma que les simulacions han sigut correctes i es pot procedir als següents passos.

D. GUIA CURVEEXPERTPRO.

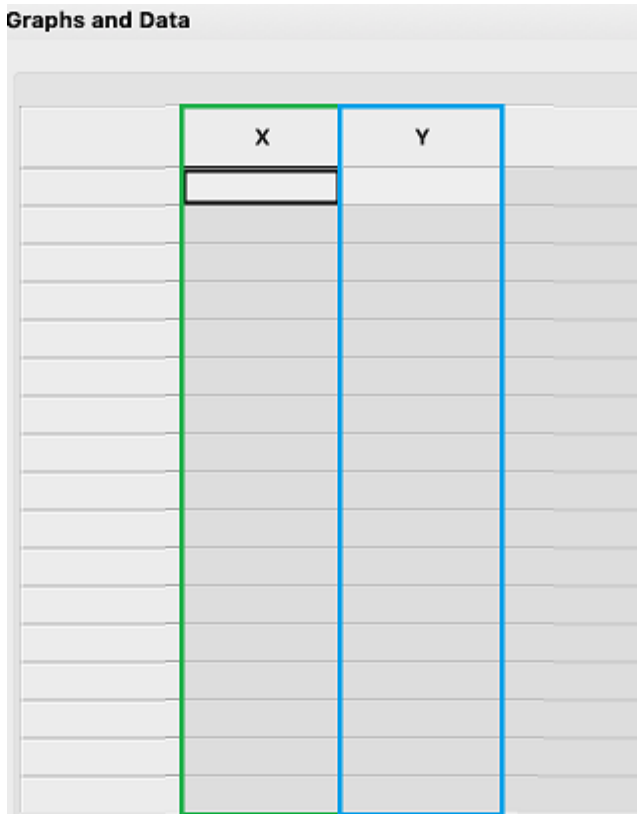
D.1. Programa



Il·lustració 60: CurveExpert Pro inici.

Quan s'obre l'aplicació, es veu la imatge anterior.

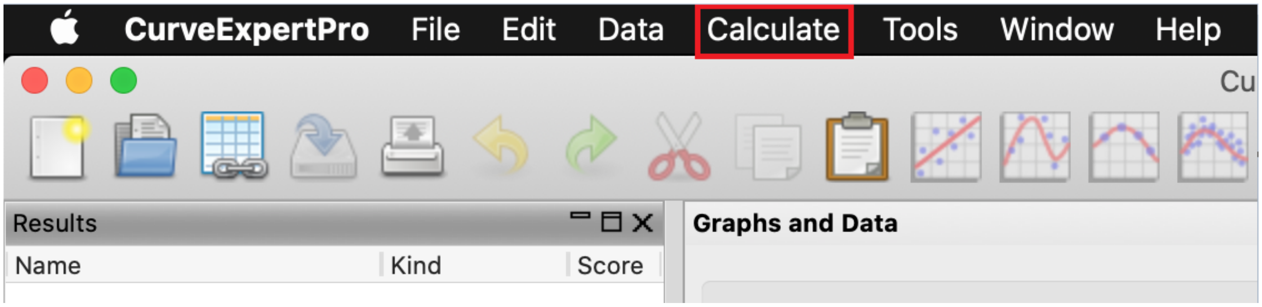
D.2. Introducció de dades:



Il·lustració 61: Introducció de dades.

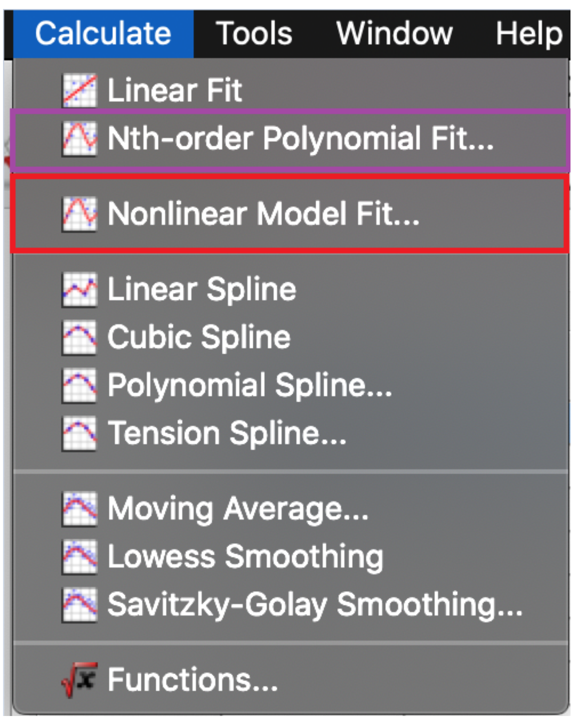
En l'apartat de "Graphics and Data", s'introdueixen les dades per crear els gràfics. En l'eix de les X s'introdueixen els valors dels PI-paràmetres, i en l'eix de les Y el resultats experimentals del ràtio d'energia que ens ha proporcionat les simulacions.

D.3 Generació de gràfics



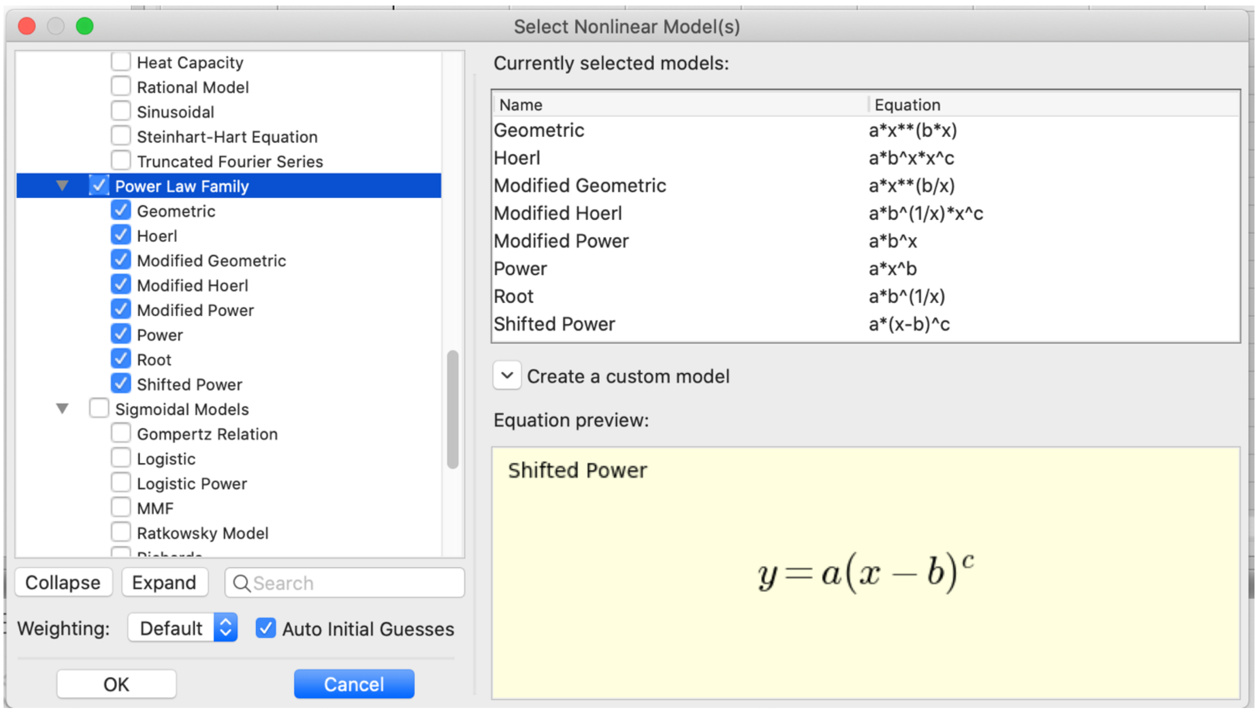
Il·lustració 62: Menu principal.

Per generar els gràfics, s'ha de seleccionar en el menú superior el desplegable on posa "Calculate".



Seguidament dintre del desplegable "Calculate" es selecciona els tipus de gràfiques que es vol que generi. Principalment s'escollirà "Nonlinear Model Fit...", però a més es pot escollir Nth-order

Polynominal Fit i escollir el nombre d'ordre que vulguem, fent que a un nombre d'ordre més gran sigui més precís (Inicialment només s'ha utilitzat pel PI_2).



Dintre del menú de "Nonlinear Model Fit...", es selecciona el model de Power Law Family, que automàticament seleccionarà tots els sub-models que té assignat. I posteriorment clicar en "OK".

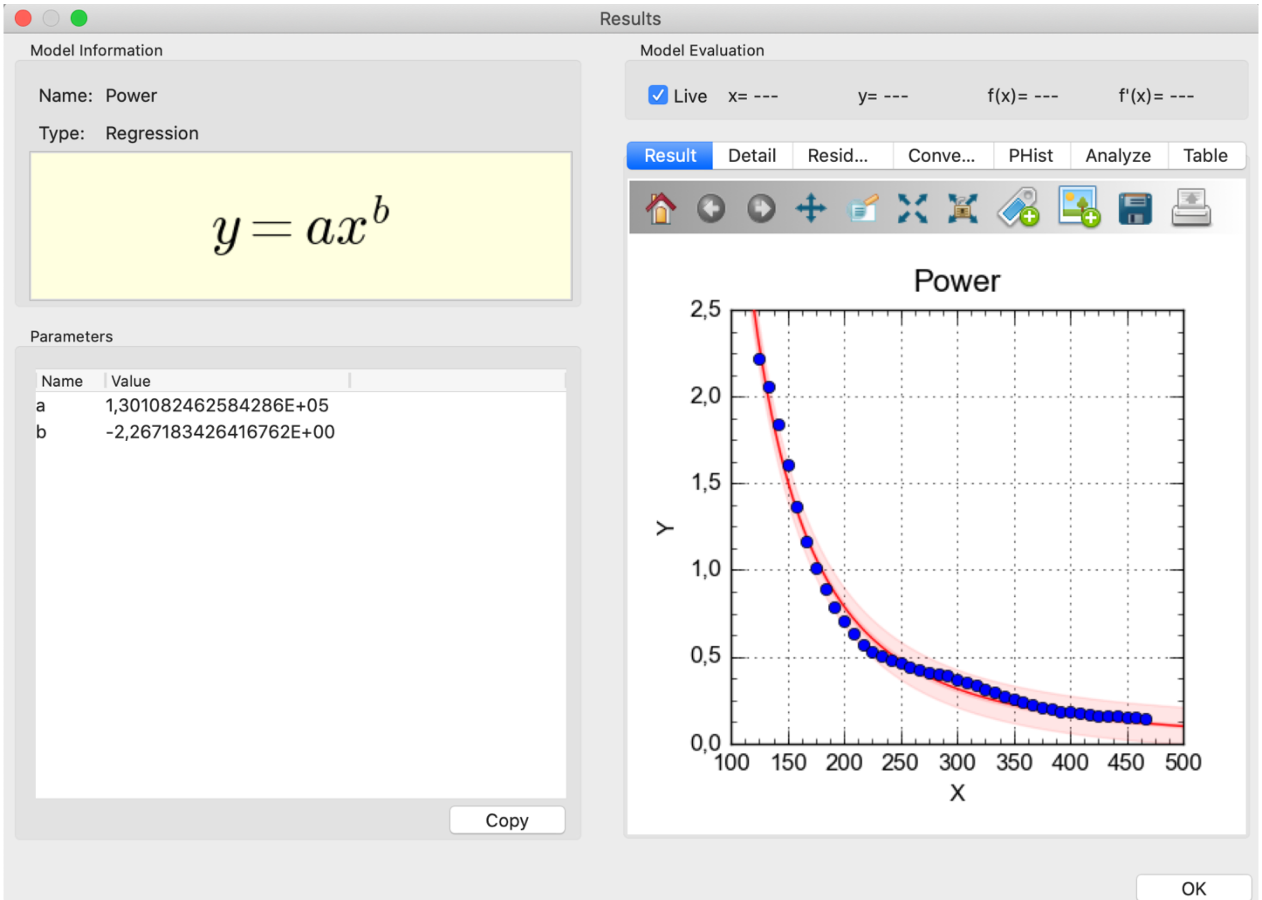
Results

Name	Kind	Score
Hoerl	Regression	982
Modified Hoerl	Regression	982
Power	Regression	979
Root	Regression	975
Modified Power	Regression	941
Shifted Power	Regression	924
Geometric	Regression	896
Modified Geometric	Regression	599

Finalment en l'apartat de resultats, generarà tota una sèrie de gràfics amb les seves formules corresponents, les quals es seleccionarà aquella corba i equació que segueixi una bona tendència de la corba, no tingui massa tolerància i l'equació no pugui complicar els desenvolupaments posteriors.

A continuació es procedirà a la selecció de gràfics per cada PI-Paràmetre:

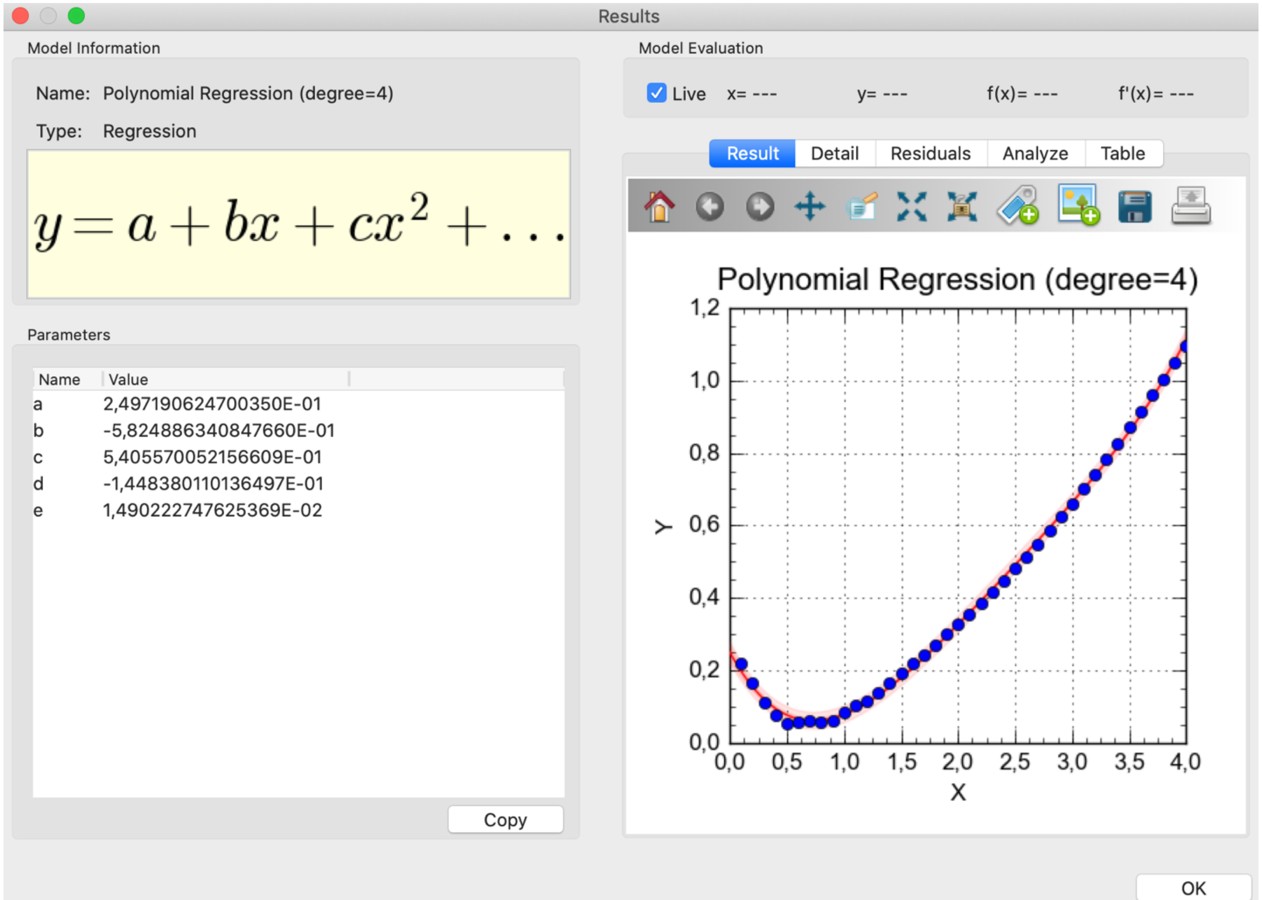
PI_1



Il·lustració 63: Corba PI_1

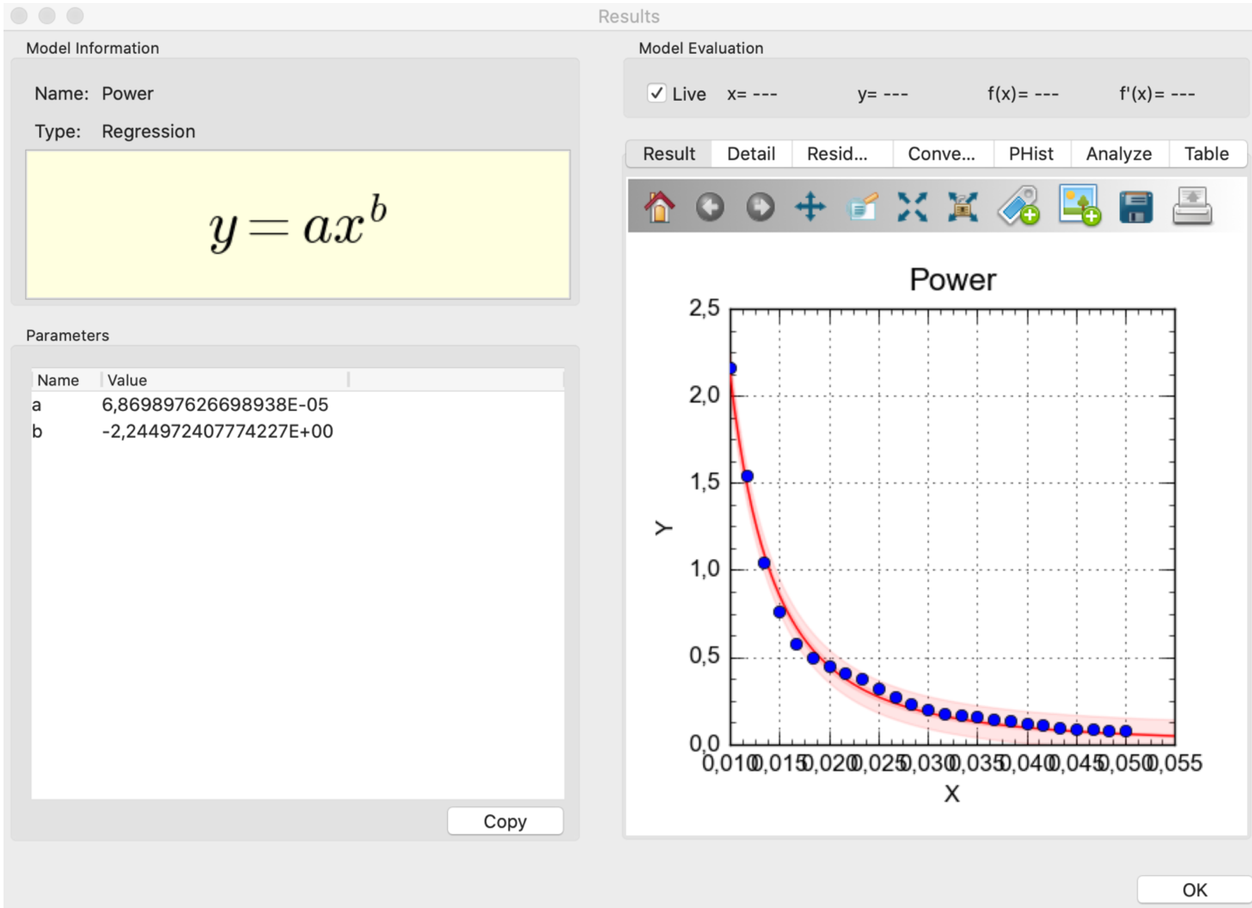
$$PI_1 = 1{,}3011E^5 * \left(\frac{tCo}{a}\right)^{-2.2672}$$ (Eq.129)

PI2



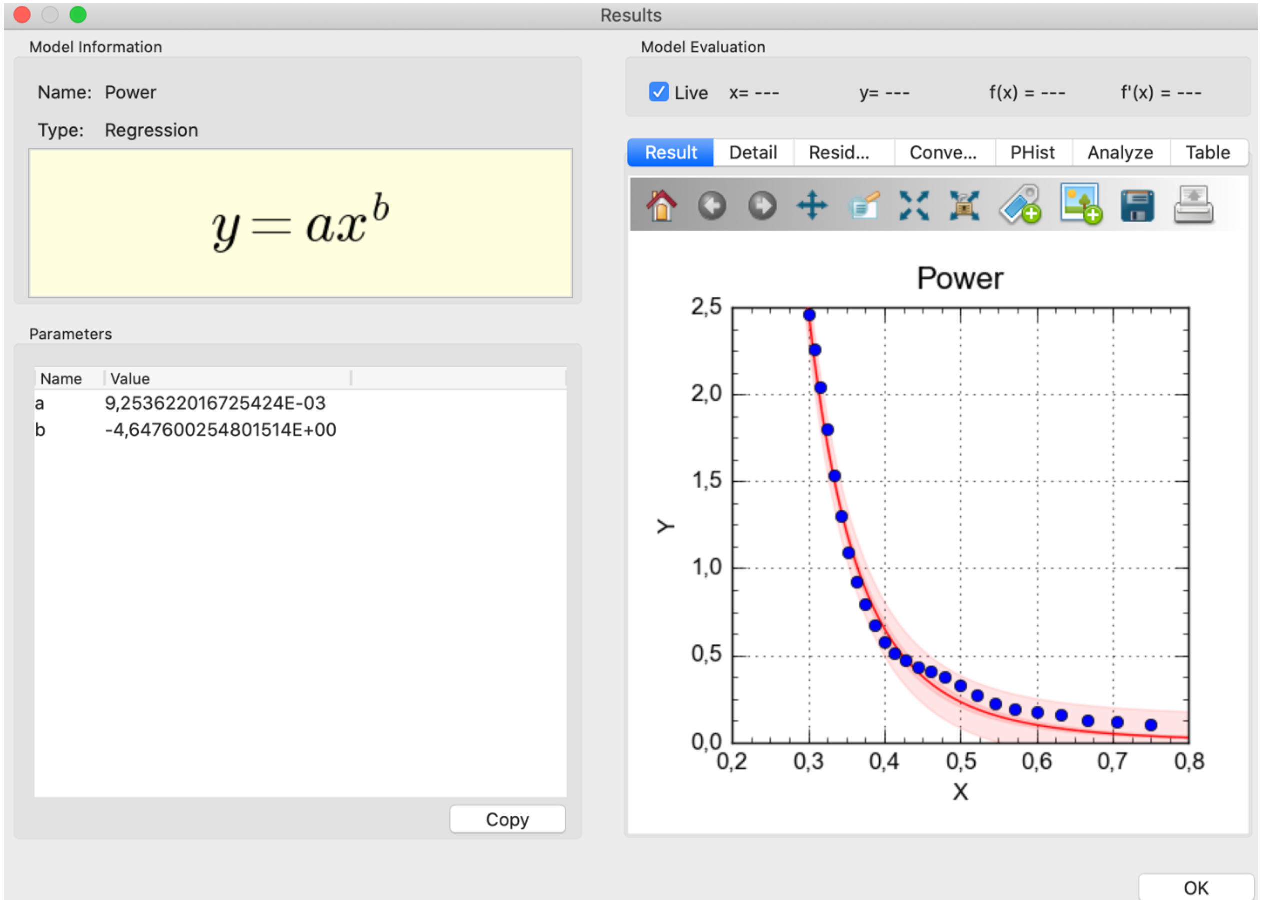
$$PI_2 = 2.4972E^{-1} - 5{,}825E^{-1} * \left(\frac{\dot{\delta} t}{\delta}\right) + 5{,}4056E^{-1} * \left(\frac{\dot{\delta} t}{\delta}\right)^2 - 1{,}4484E^{-2} * \left(\frac{\dot{\delta} t}{\delta}\right)^3 + 1{,}4902E^{-3} * \left(\frac{\dot{\delta} t}{\delta}\right)^4 \quad \text{(Eq.130)}$$

PI3



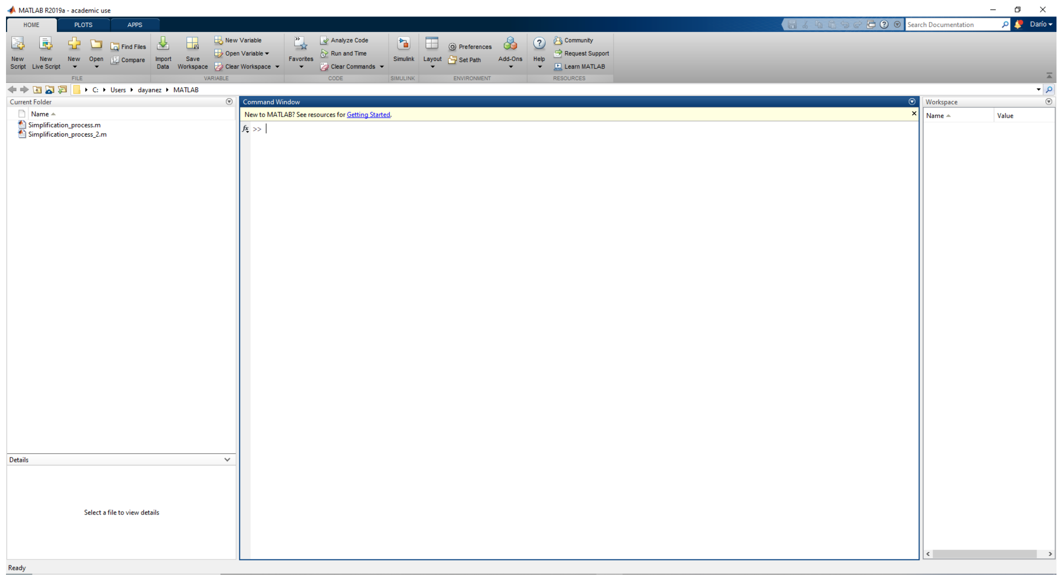
$$PI_3 = 6{,}8699E^{-5} * \left(\frac{h}{a}\right)^{-2{,}24497} \qquad \text{(Eq.130)}$$

PI5



$$PI_5 = 9{,}2536E^{-3} * \left(\frac{a}{L}\right)^{-4{,}6476} \qquad \text{(Eq.131)}$$

E. GUIA MATLAB PEL TEMPS DE TRANSICIÓ.



Per poder trobar la formula final del temps de transició, s'ha de agrupar totes les formules obtingudes gràcies al programa CurveExpert Pro. Per portar a terme aquest procés, s'utilitza el programa MatLab que multiplicarà les formules per obtenir una resultant, la simplificarà i, a mes a mes, mostrarà l'equació aïllant el temps de transició.

E.1 Declaració de variables.

```
%% Simplier equation
clear all
close all
clc

format short
syms a d_p d h t c_o b D L positive
```

E.2 Formules.

```
% Pi-termes per l'anàlisi de el temps de transició (t) power AS4
pi1 = 1.3011e5*(t*c_o/a)^(-2.2672);
pi2 = 2.49719e-1-5.824886e-1*(D)+5.40557e-1*(D)^2-1.44838e-1*(D)^3+1.490223e-2*(D)^4;
pi3 = 6.869898e-5*(h/a)^(-2.24497);
pi5 = 9.25362e-3*(a/L)^(-4.6476);
```

S'escriu les formules corresponents de cada PI-Terme en funció dels resultats de CurveExpert Pro.

E.3 Procediment d'execució.

```
expr_v1 = pi1*pi2*pi3*pi5;
expr_v1 = vpa(expr_v1);
E1 = simplify(expr_v1,'Steps',500);
F1 = vpa(E1,8)

T1 = solve(E1==1,t,'Real',true,'MaxDegree',5);
T1s = vpa(T1,6)
```

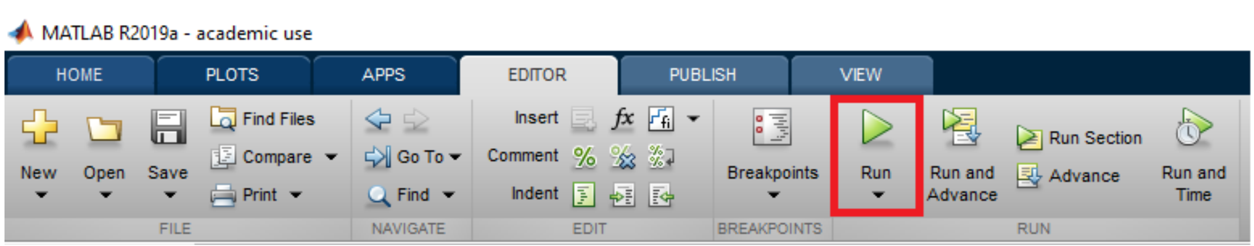
En la primera línia de codi, s'observa la multiplicació de totes les equacions la qual donarà una equació resultant (expr_v1) molt gran.

En la segona línia es simplifica els valors de l'equació a un nombre de dígits significants (32 dígits per defecte).

En la tercera línia de codi, es simplifica l'equació anterior per reduir la seva magnitud en un total de 500 passos per definir-la lo millor possible.

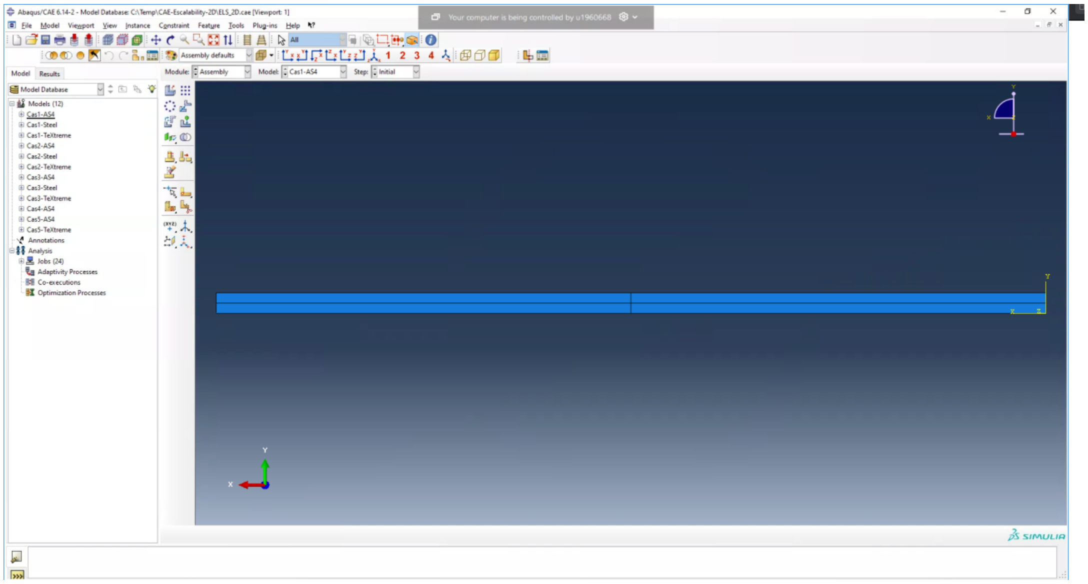
En la quarta línia mostra l'equació amb els valors reduïts a 8 dígits significants.

Les dues últimes línies de codi, crea la equació del temps de transició a partir de l'equació E1, aïllant t i especificant un grau màxim de polinomi de 5. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**]



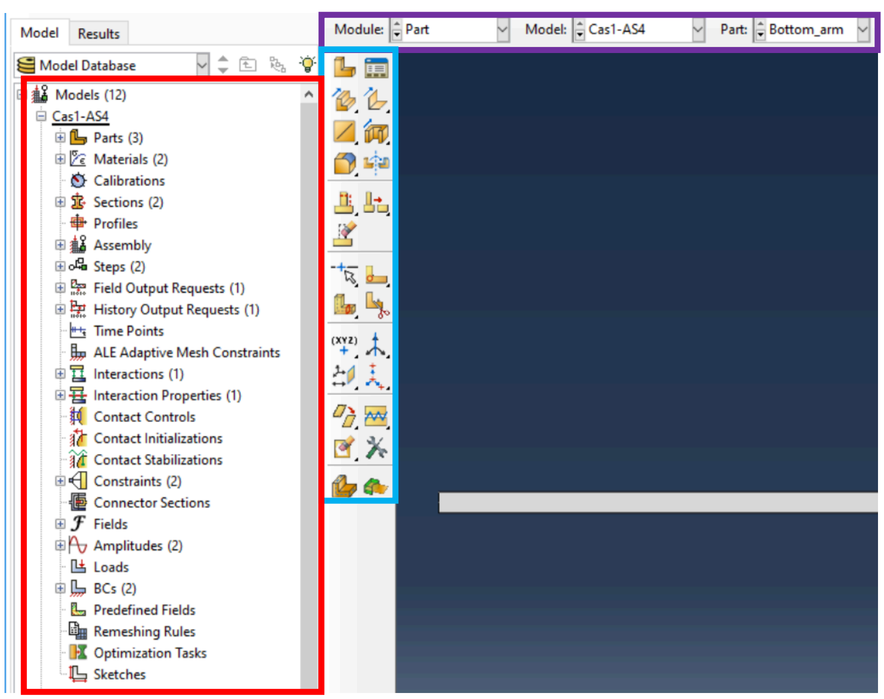
Finalment es clica el botó Run, i generarà les formules que se li ha demanat.

F. GUIA PER REALITZAR LES SIMULACIONS EN ABAQUS.



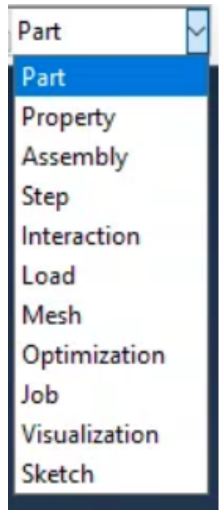
En aquest Annex s'explicarà com realitzar els canvis necessaris per variar la geometria, materials i condicions per executar les simulacions gràfiques i ens proporcionin els resultats.

Primer de tot s'organitzarà el programa en tres menús importants:



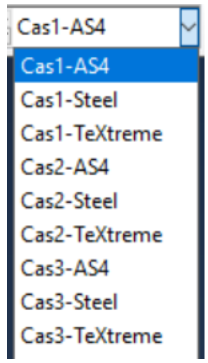
Menú 1: Conté 3 submenús on en “Module” s’escull que es vol modificar de la proveta (geometría, propietats mecàniques, restriccions...), en “Model” s’escull quina proveta s’està modificant i en “Part” si s’està modificant el braç superior o inferior.

- Module:

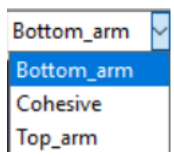


  - Part: Es crea i modifica la geometria de la proveta.
  - Property: Es modifica les propietats mecàniques com el tipus de material.
  - Assembly: Es modifica la orientació, posició o adjuntar els dos braços de la proveta.
  - Step: Es pot modificar el temps i quins tipus de resultats volem que ens proporcioni la simulació.
  - Interaction: Es defineix la interacció que tenen els dos braços, com el contacte en la part de l’esquerda.
  - Load: Es defineix la càrrega i restriccions de la proveta.
  - Mesh: Es defineix quin mallat es vol aplicar per la simulació en elements finits.
  - Optimitation: Es pot definir una precisió dels resultats que es volen obtenir (No ha sigut utilitzat).
  - Job: Es crea els arxius .inp i es on es s’inicia la simulació.
  - Visualization: Es pot observar els resultats de la simulació del Job.
  - Sketch: Serveix per realitzar dibuixos per crear la proveta.

- Model: Dintre es pot seleccionar quin cas de la proveta estem modificant, s'ha de prestar atenció en que estigui seleccionat el model que es vol modificar.



- Part: Es pot seleccionar quin element s'està modificant (braç superior, braç inferior o els elements cohesius).

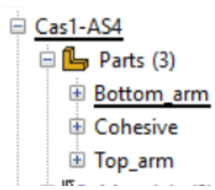


Menú 2: Mostra els continguts que es poden modificar segons el "Module" que s'hagi escollit.

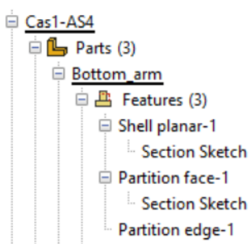
Menú 3: Mostra el contingut i les modificacions que se l'han realitzat al model on també es pot modificar les seves característiques.

F.1 Canvi de geometria

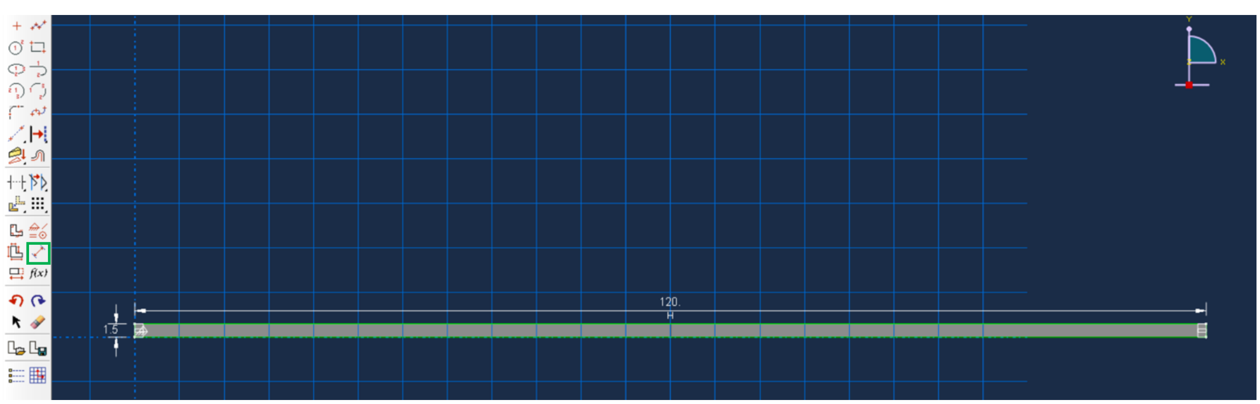
Per poder realitzar el canvi de geometria, en el menú 3, dintre el model que es vulgui modificar, s'obre la pestanya de Parts.



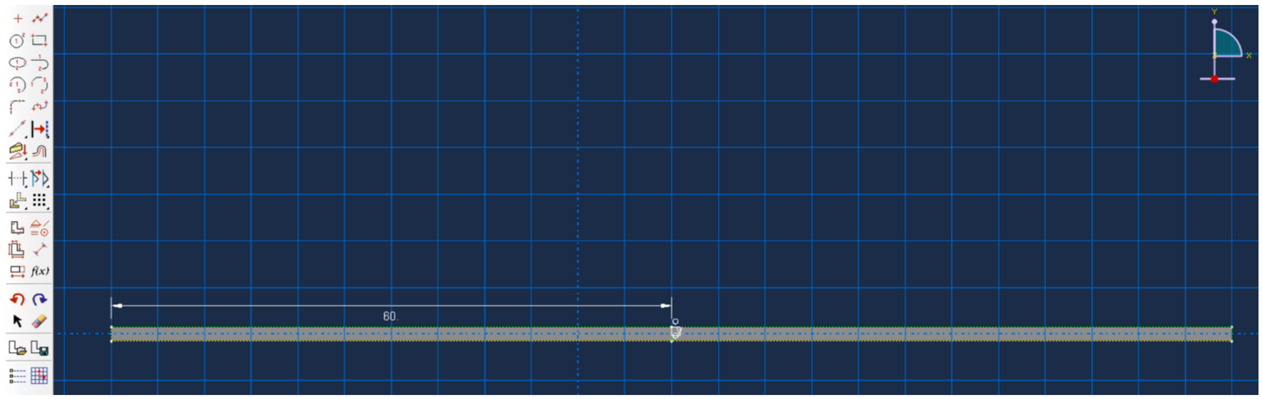
Dintre es pot observar les diferents parts de la proveta. A continuació s'obre la pestanya de la part que es vulgui modificar (braç superior, braç inferior o elements cohesius) i dintre de la pestanya de "Features", es pot localitzar els paràmetres que defineixen la geometria de la part seleccionada.



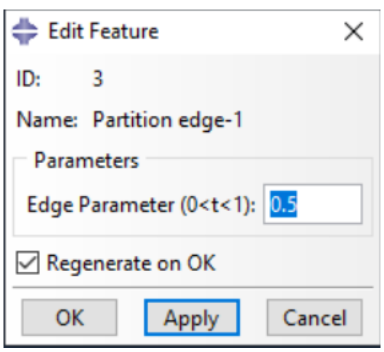
Dintre de "Shell planar" es pot trobar el croquis que defineix la llargària (L) i l'alçada (h) de la part. L'eina seleccionada en verd en la Figura 1 es la que permet modificar les cotes.



Seguidament, dintre de “Partition face”, en el croquis es modifica la distància de la secció creada que separa la llargària de la esquerda de la part del braç que va fusionada amb l’altre braç.

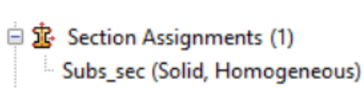


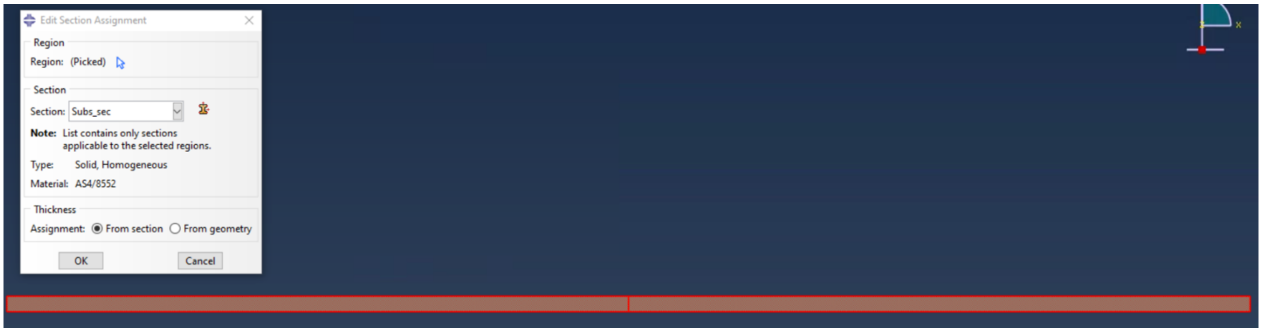
I en el “Partition edge” es defineix la línia de partició que es situa a la meitat de l’alçada del braç, gràcies a aquesta línia es pot aplicar restriccions com la força.



0,5 vol dir la meitat de l’alçada.

Per assignar-li quin tipus de secció li correspon a la peça, on es defineix el seu gruix (b) i el material que li correspon, en “Section Assignments” es selecciona depenent si és un dels braços o el element cohesiu.

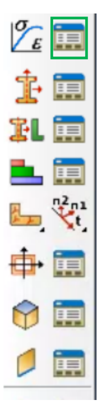


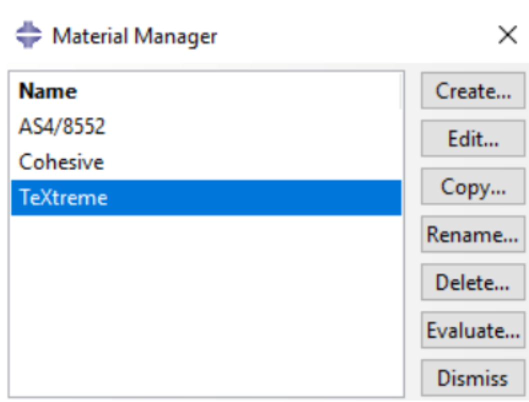


I finalment se li assigna una orientació a la peça.

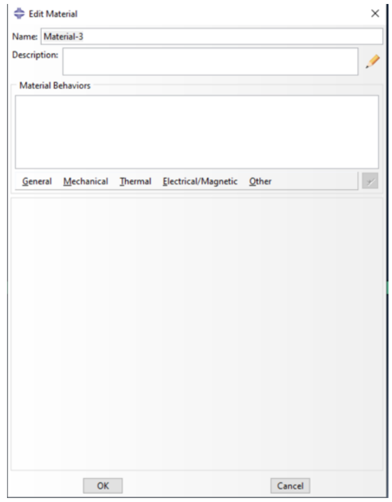
F.2. Propietats mecàniques.

El primer pas serà crear els materials. Dintre del “Module” es selecciona “Property”, i en el menú 2 es selecciona la primera eina de la segona columna.

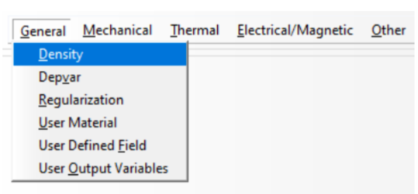


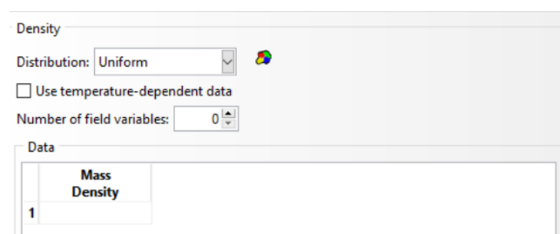


En aquest menú apareixen els materials ja creats, per crear un de nou s'ha de clicar el botó "Create...". S'obre un submenú on es pot definir les propietats del material.

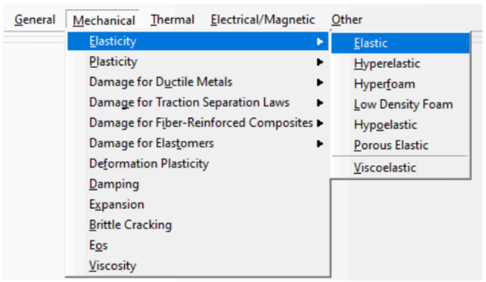


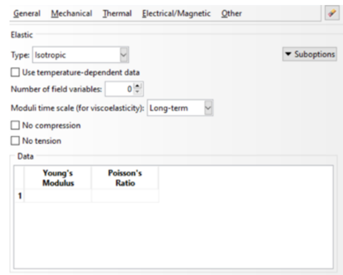
Per definir la densitat del material, s'ha de clicar en "General" i després en "Density". Finalment s'escriu en "Mass Density" la densitat del material.



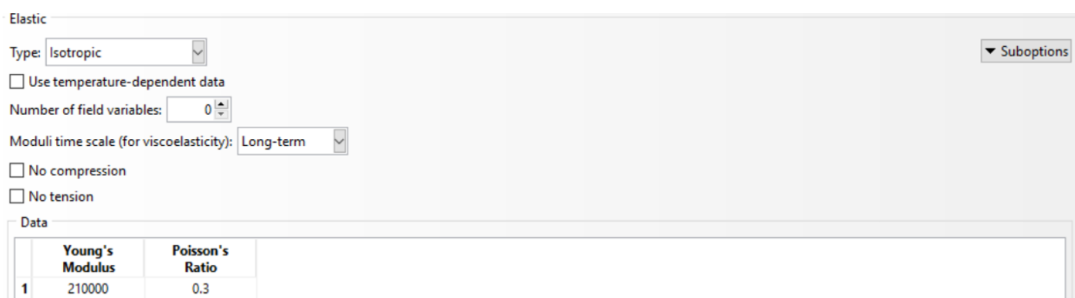


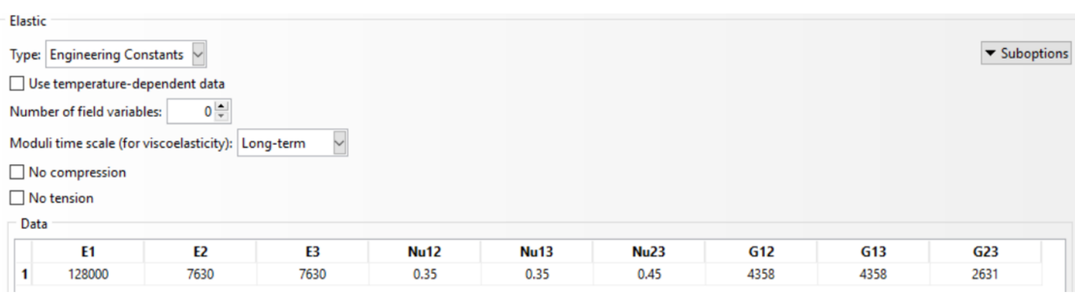
I per definir les propietats mecàniques, s’ha de clicar en “Mechanical”->”Elasticity”->“Elàstic”.

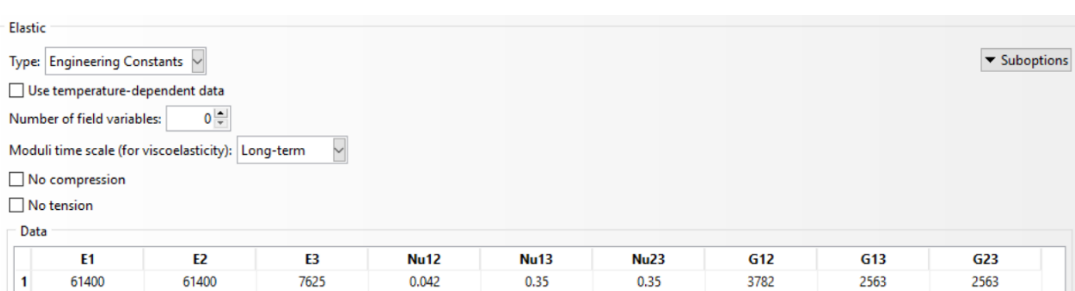




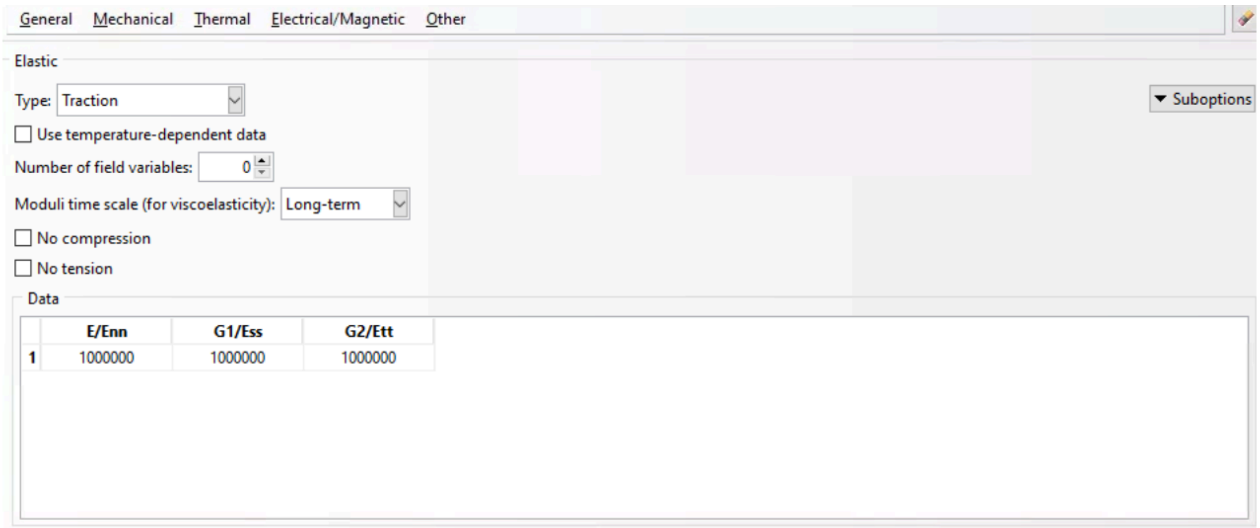
Per l’acer, s’ha de seleccionar en “Type” -> “Isotropic”, però per els materials composits s’ha de seleccionar “Engineering Constants”.



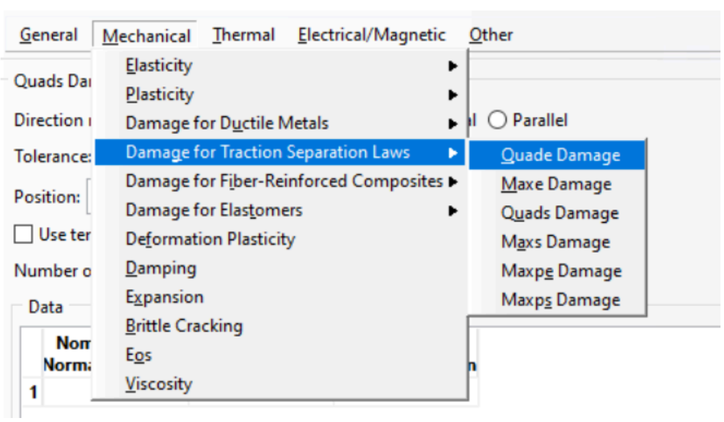




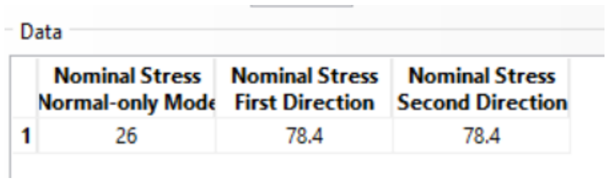
En el cas del element cohesiu, s'ha de seleccionar "Type" -> "Traction" i indicar les unitats que s'observen a continuació.



A més de la densitat, també se li ha d'afegir la propietat de dany per la separació a tracció, es a dir quan comença l'esquerda. "Mechanical" -> "Damage for Traction Separation Laws"->"Quade Damage"

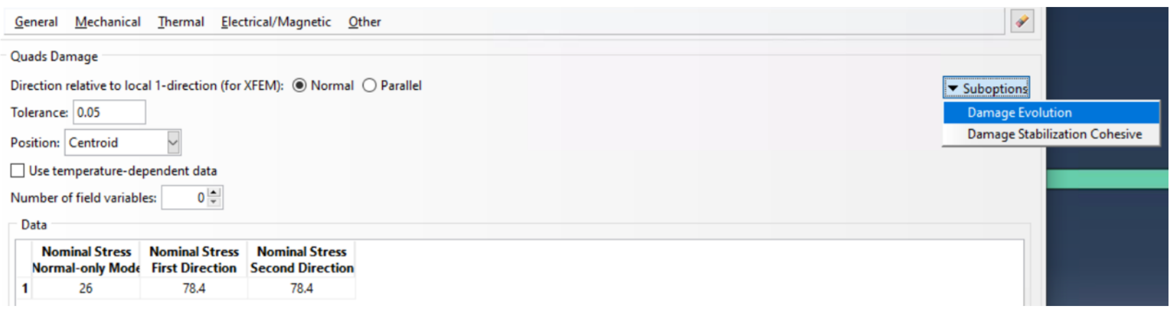


I se li assigna les unitats següents:

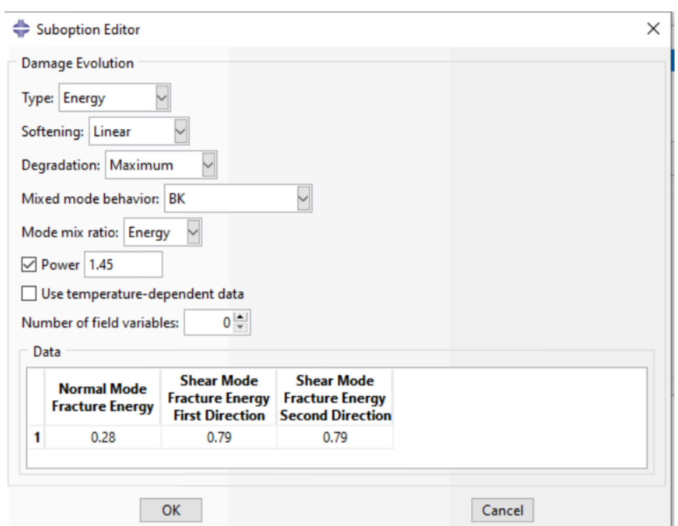

Data

	Nominal Stress Normal-only Mode	Nominal Stress First Direction	Nominal Stress Second Direction
1	26	78.4	78.4

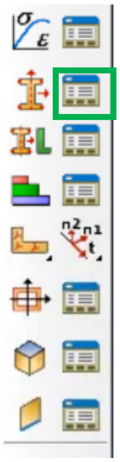
I consecutivament, dintre de "Quade Damage" hi ha un submenu on s'ha de seleccionar "Damage Evolution".

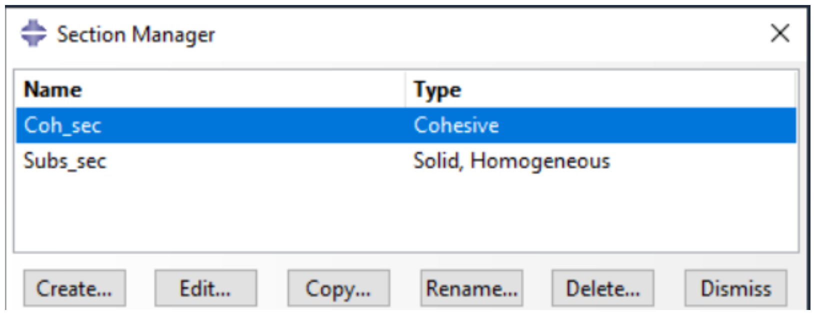


I dintre de "Damage Evolution" es posen les dades següents:



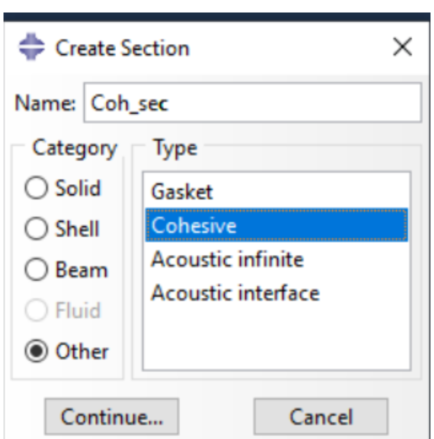
Un cop creats els materials amb les seves propietats, es creen les variables d'aquests materials per poder assignar a cada peça de la proveta el material que li correspon (assignació que es comenta al final en F.1 Canvi de geometria) a més de l'amplada de tensió.

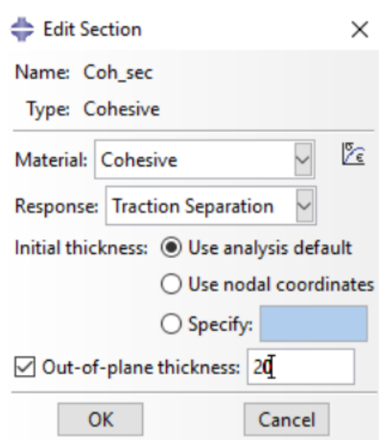




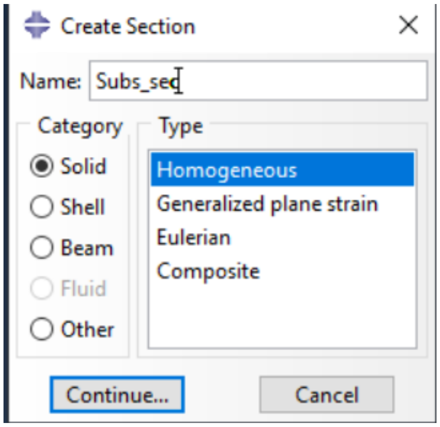
Per crear aquestes variables, s'ha de clicar en el botó "Create..." i seleccionar les característiques que es mostren a continuació.

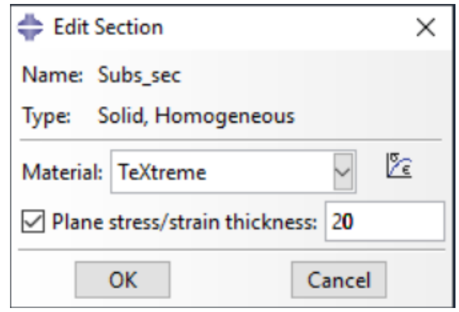
Per el element cohesiu:





Per el braç superior e inferior:





F.3 Posició i unió entre peces.

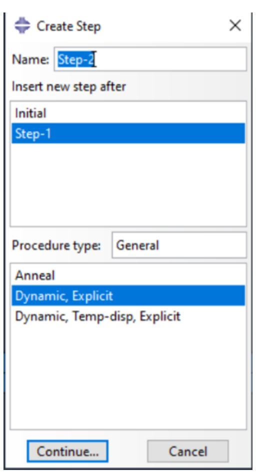
Per posicionar de forma correcta les peces, en "Assembly" hi ha un menú amb varies posicions de moviment. Es possible que cada vegada que es modifiqui la geometria, les peces es separin o es sobreposin, per tan s'ha d'utilitzar l'opció següent:

Gràcies a aquest mode es poden unir les peces amb els vèrtexs que creen les seccions.

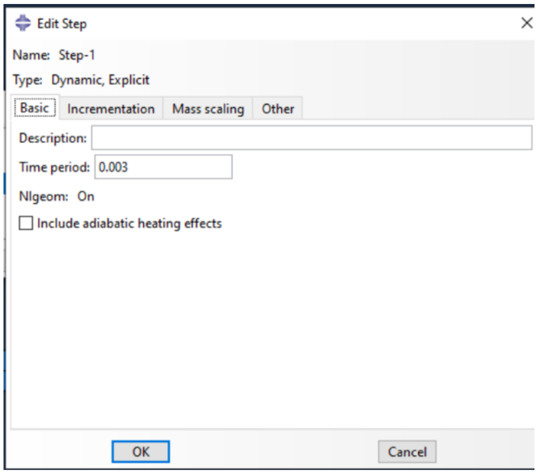
F.4 Durada de la simulació i demanda de resultats.

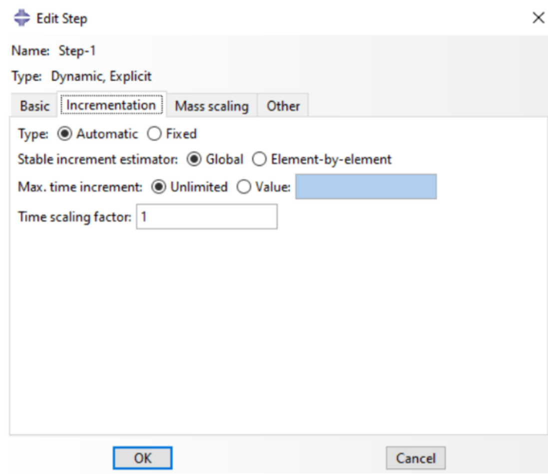
Per definir el temps que dura la simulació, en el ”Module” seleccionar “Step” i en el menú 2 seleccionar l’opció seleccionada:

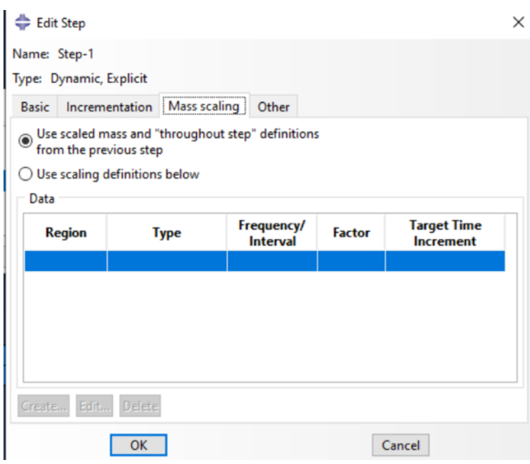
S’obrirà un submenú on es crearà la condició de temps. Cal seleccionar que és “Dynamic, Explicit” ja que és el mode de simulació que també es va aplicar per trobar el mètode basat numèric.

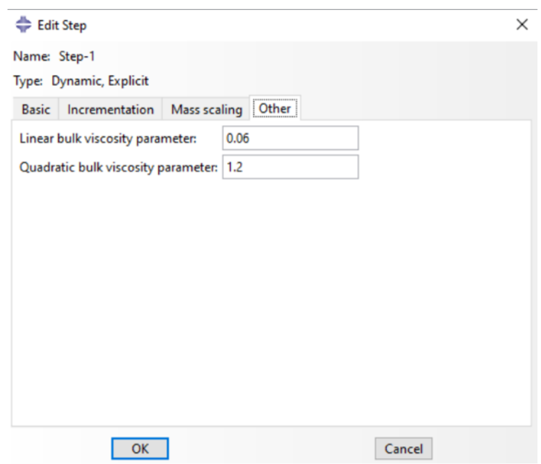


I un cop es clica continuar, s'obre un altre submenú i s'ha d'assegurar que la informació aplicada és la següent:



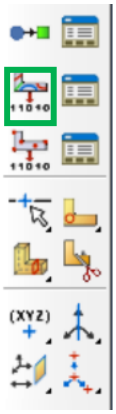




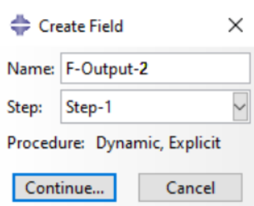


En el cas que les gràfiques resultats siguin massa curtes es pot augmentar el temps, ja que en el cas d'aquest treball, s'ha aplicat temps de fins 0.008 s (el temps no te rellevància ja que es busca crear corbes per comparar).

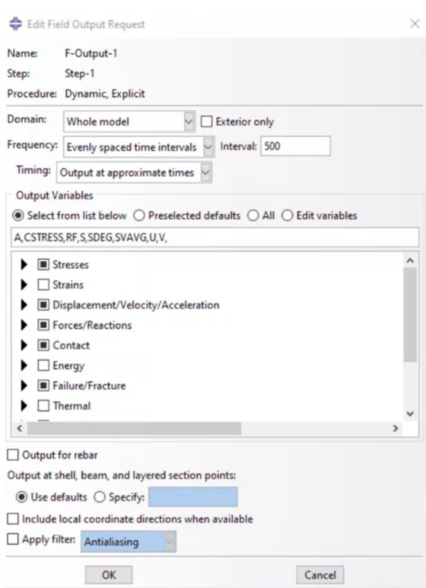
Ara, per seleccionar les variables de sortida de camp que es volen mostrar es selecciona l'opció següent:



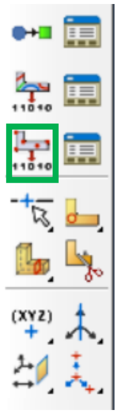
I s'obrirà el menú següent on es selecciona el "step" creat anteriorment:



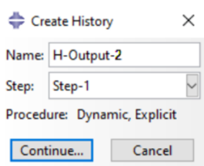
A continuació es selecciona les variables físiques que es volen de resultats:



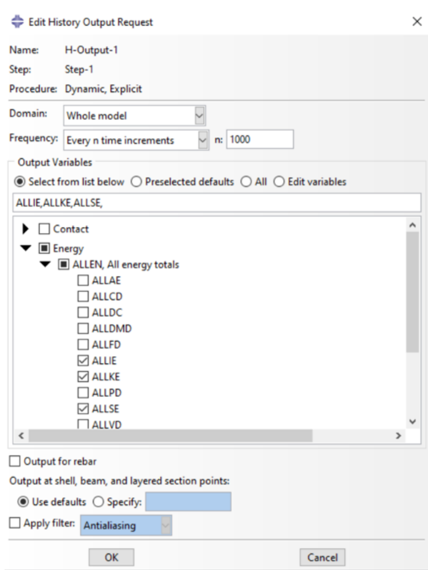
I per mostrar les energies:



S'obrira el següent submenú i també es selecciona el "step" ja creat.

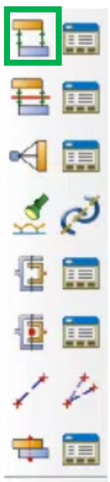


I es selecciona l'energia cinètica, energia interna i energia elàstica (encara que en els gràfics nomes s'utilitza l'energia cinètica i elàstica, es per veure si també la interna és igual a la elàstica).

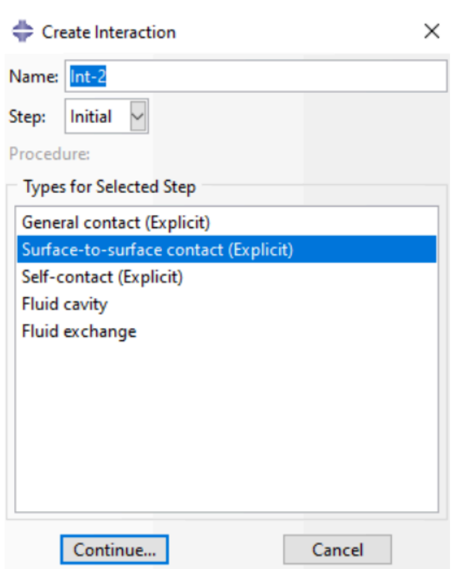


F.5 Interacció entre peces.

En “module” seleccionar “Interaction”. Un cop les peces es troben ben posicionades, s’ha de assignar la interacció entre elles. Primer es començarà amb la superfície de contacte entre les cares dels braços en la part de l’esquerda.



S’obrirà un submenú per escollir el tipus de contacte. On s’escollirà “Surface-to-Surface contact (Explicit)”

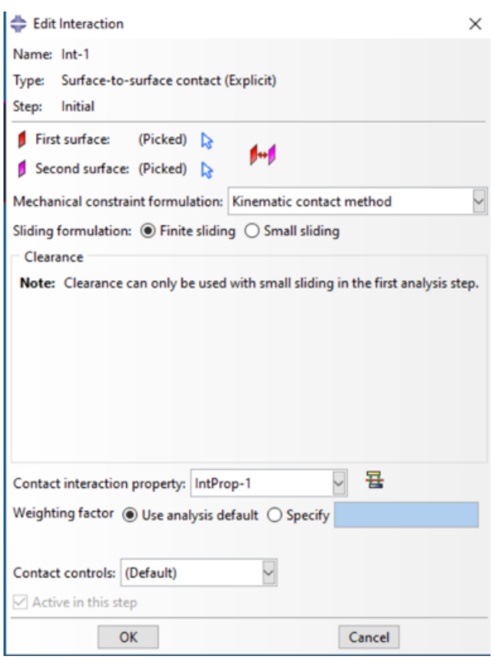


Després de clicar el botó “Continue...” es seleccionen les dos cares:

Primer una.

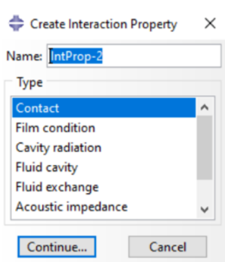
I després l’altre.

I finalment es seleccionen les característiques del contacte:

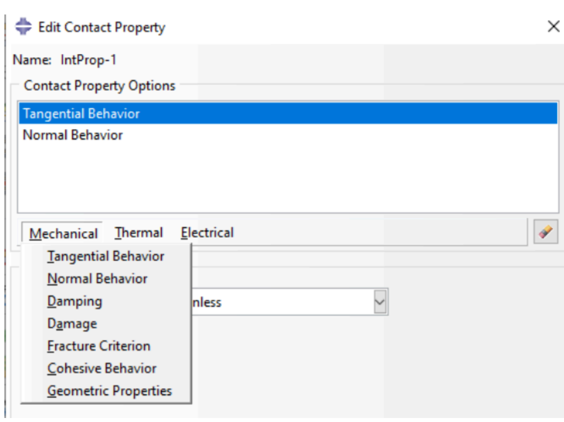


Ara per afegir propietats a la interacció es selecciona l'opció següent:

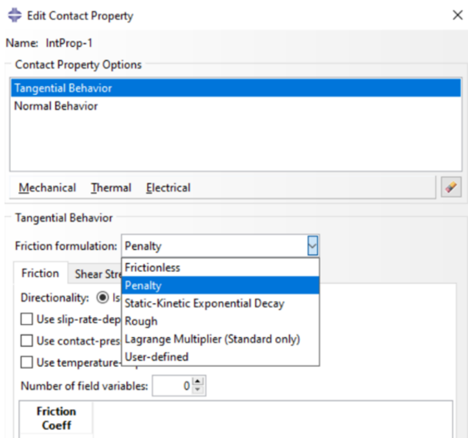
El qual obrirà el submenú següent i s'escollirà "Contatc" el tipus de interacció.



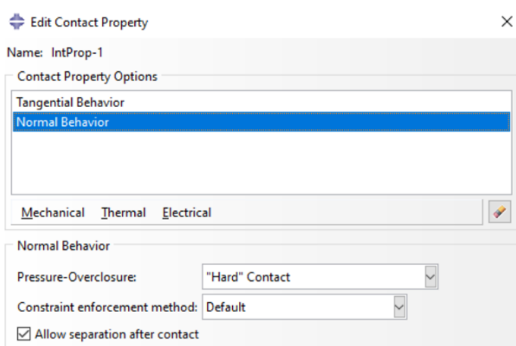
Després es clica a "Continue..." i s'afegeixen les propietats de contacte "Tangential Behavior" i "Normal Behavior" dintre de "Mechanical".



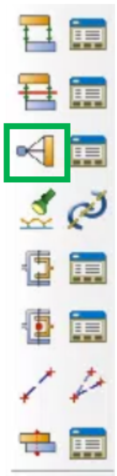
En “Tangential Behavior” es pot escollir si es vol que el contacte sigui sense fricció amb l’opció “Frictionless”, o amb fricció amb “Penalty” i escriure el coeficient de fricció per la comprovació de si la fricció afecta al ràtio d’energies.



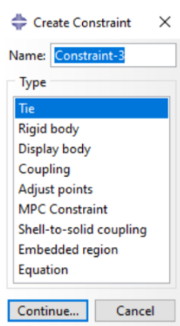
I en “Normal Behavior” es seleccionen les característiques següents.



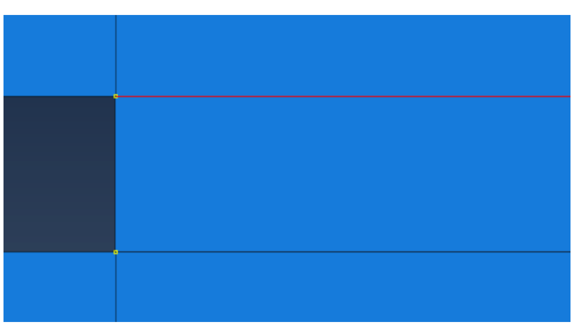
I ara, l'ultima interacció entre elements és la fusió en la part on no es troba l'esquerda per a que les peces no es separin en la simulació.



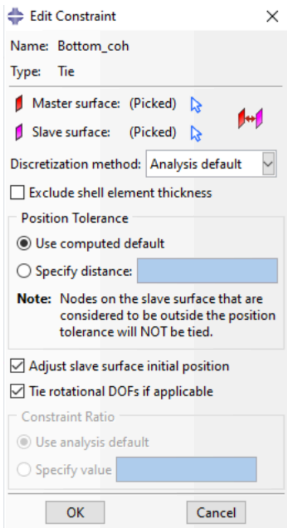
Clicant en l'opció anterior, s'obre el següent submenú on el tipus de unió ha de ser "Tie"



Un cop es clica " Continue..." es selecciona la cara de un braç, i després la del element cohesiu que ha d'anar adjunta a la anterior.



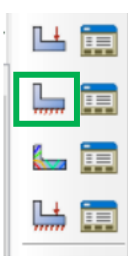
Un cop seleccionades les seccions, se li assignen les característiques següents:



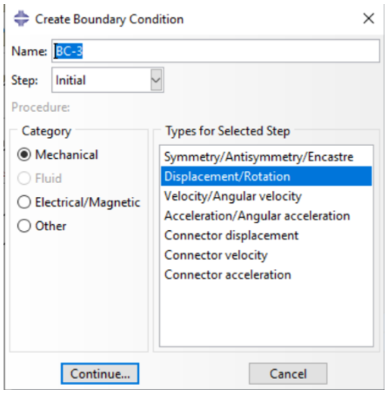
Després es repeteix els mateixos passos per l'altre braç.

F.6 Restricció i càrrega.

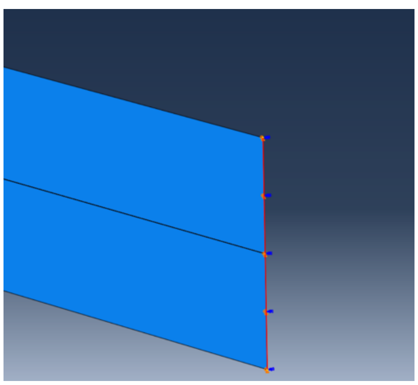
A continuació s'imposen les condicions de restricció i velocitat. En el "Module" ara s'escull l'opció "Load". I en el menú dos, s'escull l'opció següent:



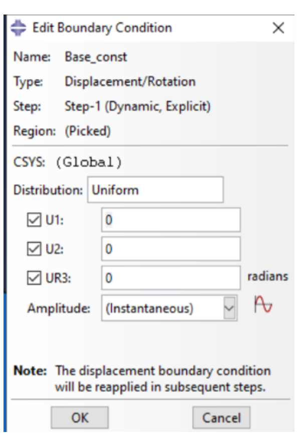
S'obrirà un submenú on s'escull el tipus de restricció que es vol aplicar.



Per l’encastament s’escull “Displacement/Rotation”, i un cop clicat “Continue...” donarà pas a seleccionar la regió que es vol restringir. En el cas de la proveta es selecciona les arestes que haurien d’anar encastades en l’extrem dret.

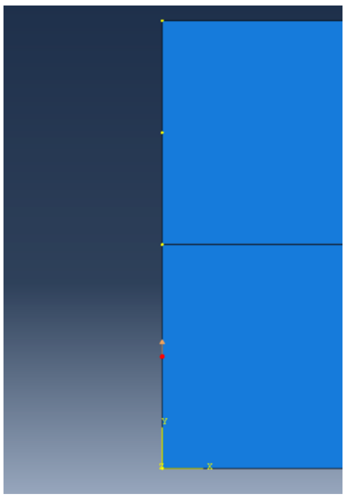


Un cop s’ha escollit la regió, s’obrirà un altre submenú on es selecciona en quina direcció es restringeix el moviment, es seleccionaran totes les direccions.

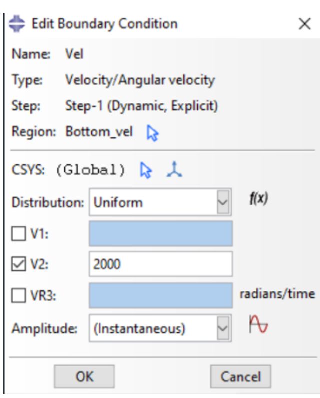


On U1 és en la direcció de les x, U2 és en la direcció de les y, i UR3 és la direcció de rotació en el pla xy.

I en el cas de la velocitat en el menú de creació de restricció s'escull "Velocity/Angular velocity". I la regió a seleccionar és el punt mig del braç inferior en l'extrem esquerre.



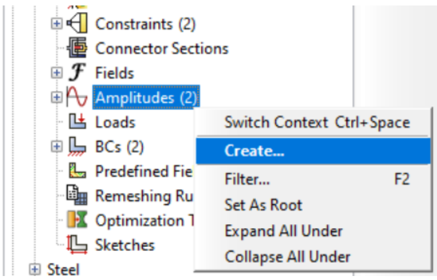
I un cop seleccionada la regió, s'obrirà un submenú on s'escull la magnitud de la velocitat i la seva direcció.



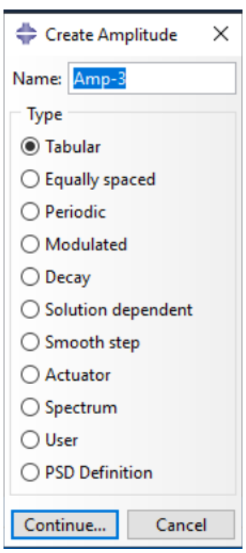
Finalment es clica "OK" i ja haurà finalitzat la aplicació de restriccions.

En l'apartat d'amplitud en on s'escull si es vol realitzar la simulació en velocitat constant (D=1) o en acceleració constant (D=2).

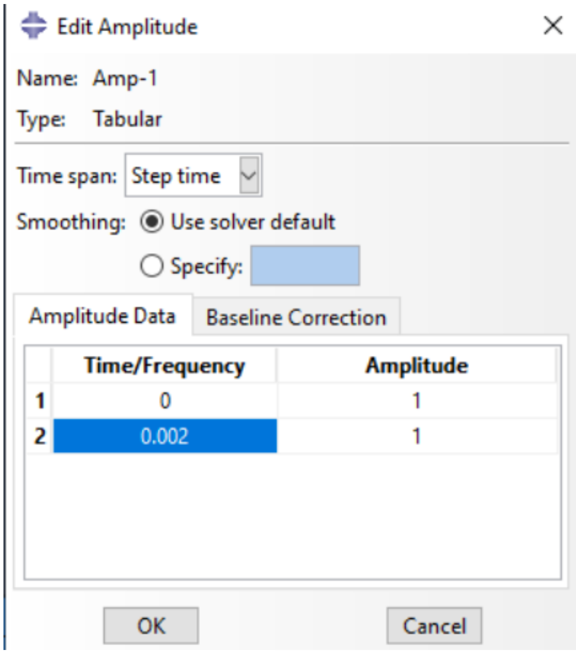
Per crear aquestes dos amplituds s'ha d'anar al menú 3 i dintre del model que s'està modificant, botó dret en "Amplitudes" -> "Create".

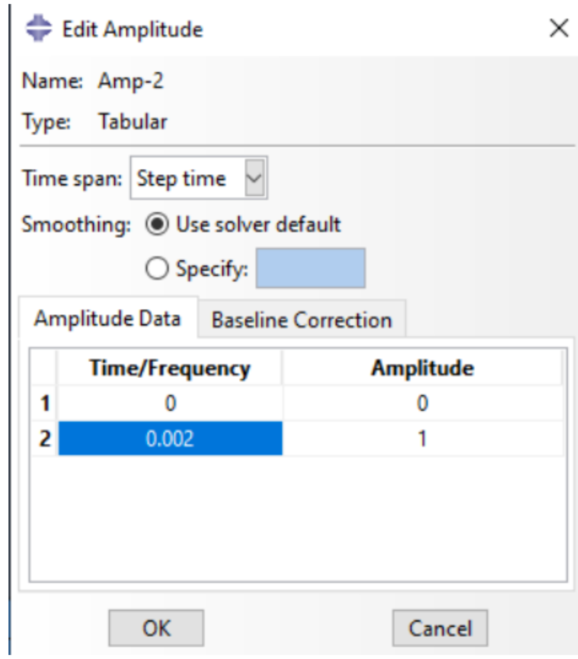


S'obrirà un submenú on s'ha d'escollir el tipus d'amplitud que serà "Tabular".



Es clica "Continue..." i s'obrirà un altre submenú on conté una taula que depenent si és velocitat constant (Amp-1) o acceleració constant (Amp-2) es posaran unes dades o altres.



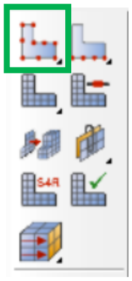


On per velocitat constant (D=1 / Amp-1) la gràfica de velocitat és una línia horitzontal en amplitud 1, però per acceleració constant la gràfica de velocitat és un pendent de 0 fins a amplitud 1. Com que el temps final no cal que sigui 0.002 s ja que l'alçada que s'eleva la proveta en el punt de càrrega varia segons el temps i la velocitat mentre es compleixi D=1 o D=2, es pot canviar el temps final ja que ha de ser igual al temps en "Step" que s'hagi aplicat.

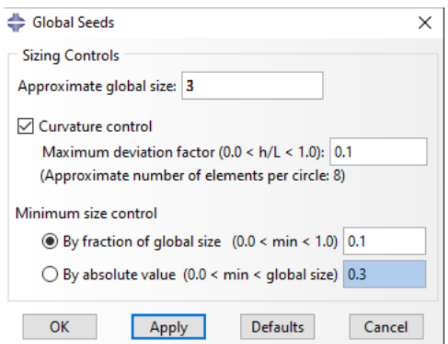
F.7 Mallat de la proveta.

En la menú 1, en "Module" es selecciona "Mesh". A més s'ha de seleccionar quina peça és la que s'està aplicant el mallat en el menú 1.

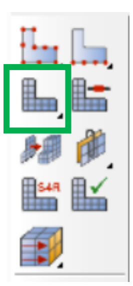
En el menú 2, es selecciona la primera opció per imposar la mida dels elements del mallat.



On s’obrirà el submenú següent:



On la mida del mallat és de 3 mm per els braços i de 2 mm per l’element cohesiu. Un cop aplicada la mida, es selecciona l’opció següent per aplicar el mallat a la peça:



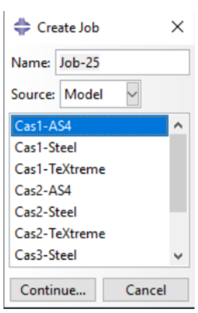
I un cop aplicat el mallat, es fa lo mateix per la resta de peces.

F.8 Execució de la simulació.

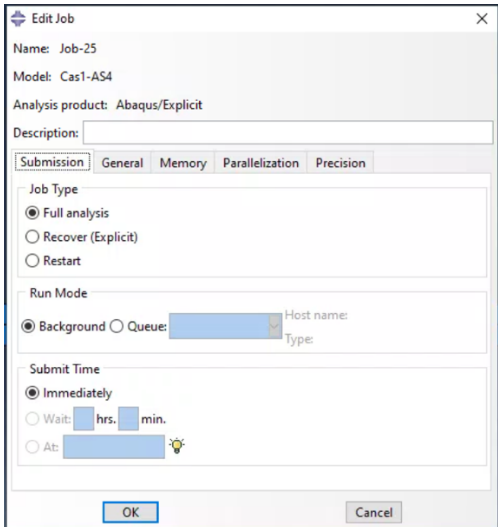
A partir del model creat amb totes les condicions imposades en els apartats anteriors, es crearà els arxius .inp i s'executarà les simulacions per generar els resultats.

En el menú 1, en "Module" s'escull "Job". En el menú 2, es selecciona la primera opció:

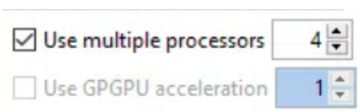
S'obrirà un submenú per començar a crear la simulació.



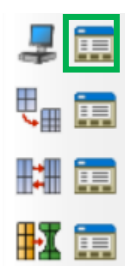
S'ha d'escollir en quin model es vol executar la simulació i escriure un nom. Seguidament es clica a "Continue..." i s'obrirà un altre submenú:



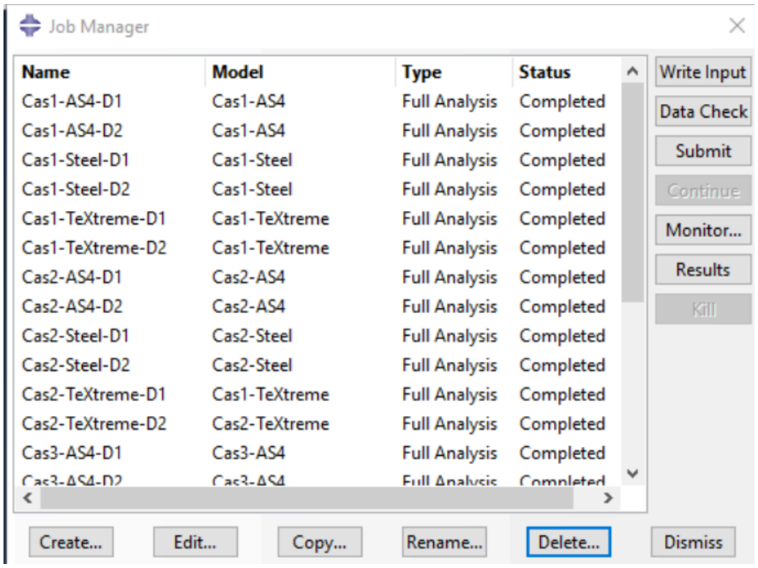
En aquest submenú, s'obre la pestanya "Parallelization", i en "Use multiple processors" es selecciona 4, per poder realitzar la simulació de forma més òptima i es clica a "OK".



Un cop ja esta creat el arxiu d'execució, sobre el menú de gestió d'execució:

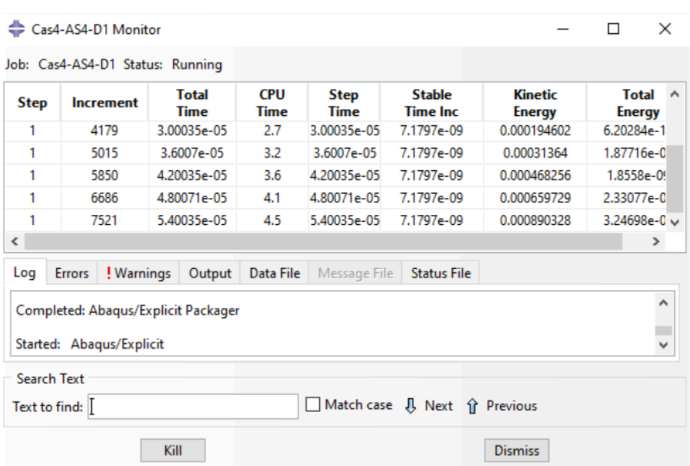


En el qual es pot observar tots els arxius que es creïn pels diferents models.



Per executar la simulació s'ha de seleccionar el arxiu que volem executar i després clicar a "Submit" i començarà la simulació. Depenent de les característiques i condicions de la proveta, pot tardar un temps. Gràcies a que la peça és en 2D ja que com ja s'ha demostrat l'amplada no afecta a la ràtio d'energies, el temps de simulació és molt més reduït al tenir molt menys elements.

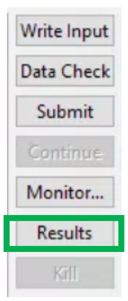
Mentre la simulació es va executant, es pot clicar en "Monitor..." per veure el seu progrés i el temps que li queda per finalitzar.



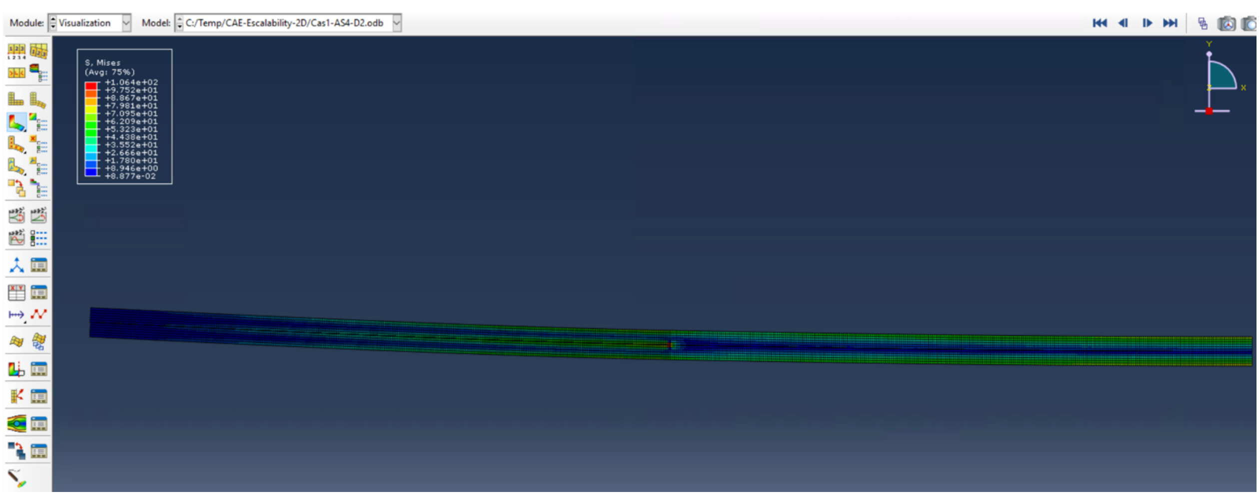
F.9 Resultats.

F.9.1 Escalabilitat i canvi de material.

Un cop finalitzada la simulació es clica el botó “Results” i s’obrirà la pestanya “Visualization” en el menú 1 en “Module”.



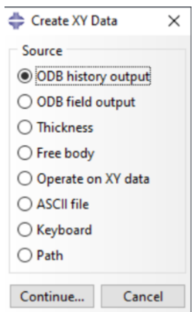
Dintre de “Visualization” es poden observar tots els resultats com la deformació, les energies, reaccions... .



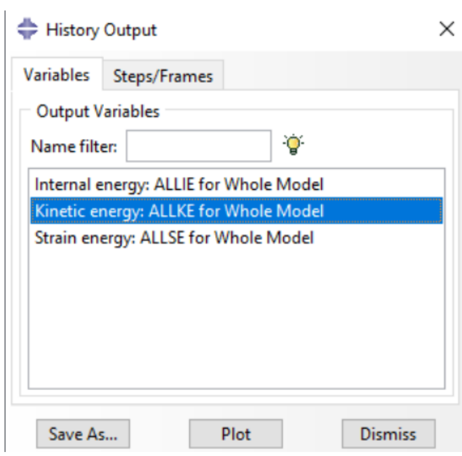
Per generar la corba de ràtio d’energia (Uk/Ue) en base al temps, s’han de seguir els passos següents:

- Primer seleccionar en el menú 2 l'opció "create XY data":

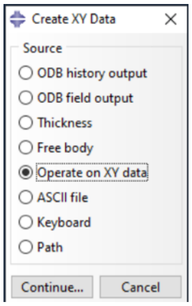
- Després es selecciona l'opció "ODB history output".



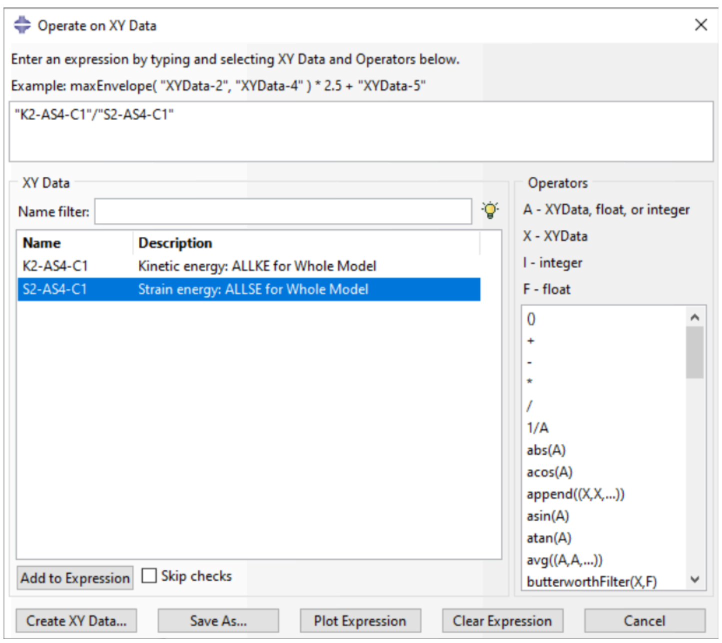
- S'obrirà un altre submenú on es pot escollir la energia que es vol representar.



- Primer es selecciona "Kinetic energy" (Energia cinètica) i després "Strain energy" (Energia de tensió o energia elàstica), i es guarden amb un nom.
- Ara hi ha Uk (Energia cinètica) i Ue (Energia elàstica) i per generar la corba de ràtio d'energia s'ha de dividir aquests dos paràmetres. Per tant es torna a clicar al submenú "create XY data" i es selecciona l'opció "Operate on XY data".

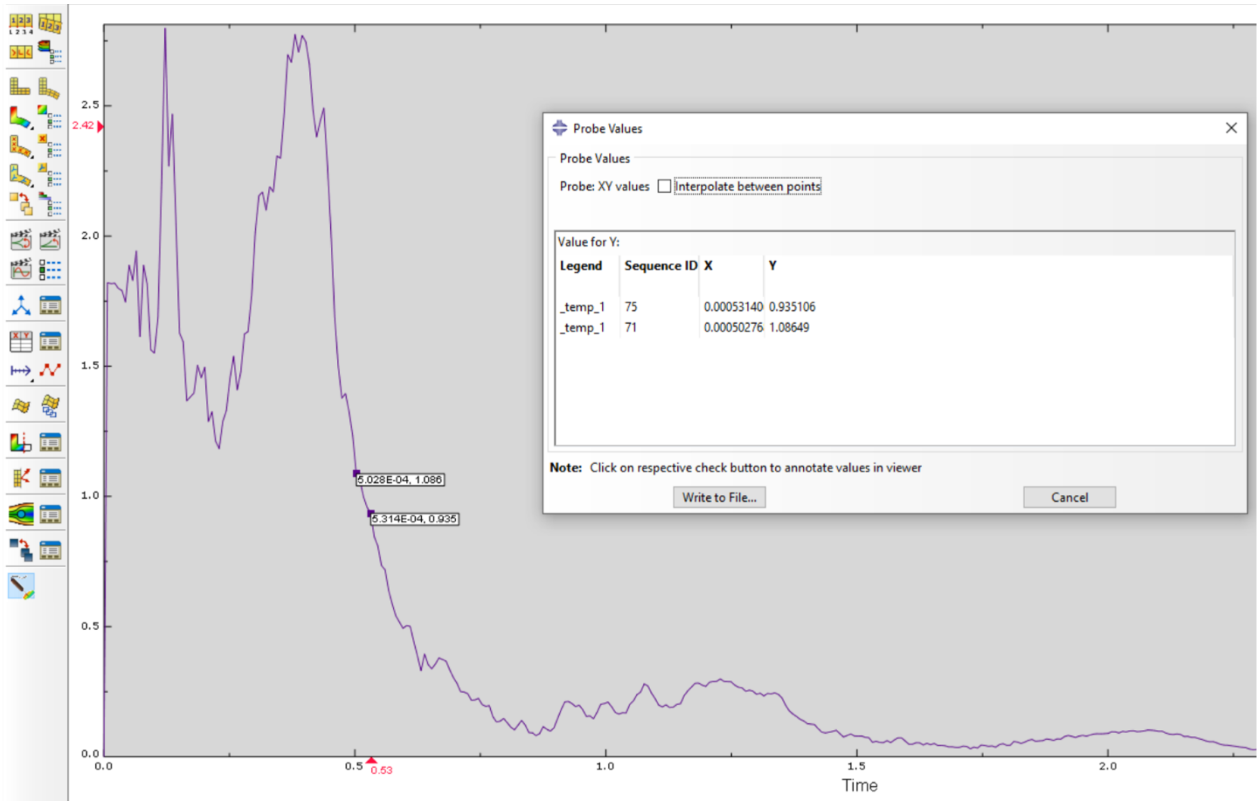


- Després es clica a “Continue” i s’obrirà el submenú següent:



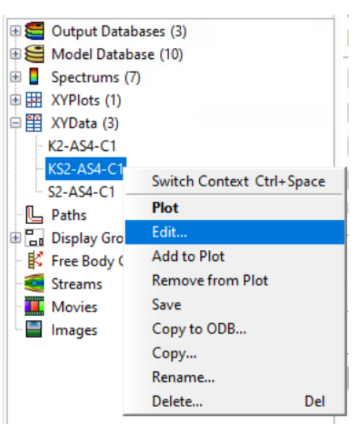
En el qual s’ha de dividir l’energia cinètica per l’energia elàstica que s’han guardat en els passos anteriors, i es guarda amb un nom. Si es vol observar la gràfica de ràtio d’energia, s’ha de clicar en “Plot Expression”.

- Per trobar el temps de transició per diferents materials, en la gràfica generada s’utilitza l’eina de recollida de valors, en el menú 2, i es selecciona un punt a sobre i un altre per sota de Uk/Ue=1.

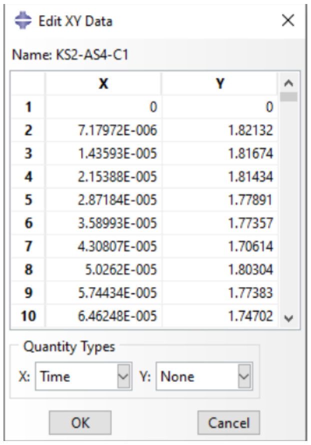


I amb els valors recollits, només quedaria interpolar i ja s'obtindria el temps de transició. Aquest pas s'utilitzarà pel canvi de material i per l'efecte de la fricció.

- Per guardar les dades resultants per generar la gràfica en MatLab per comparar l'escalabilitat amb altres gràfiques, s'ha d'anar al menú 1, seleccionar la variable creada del ràtio d'energia i clicar en "Edit...".



- S'obrirà una taula de dades on es representa tots els punts generats per crear la corba.

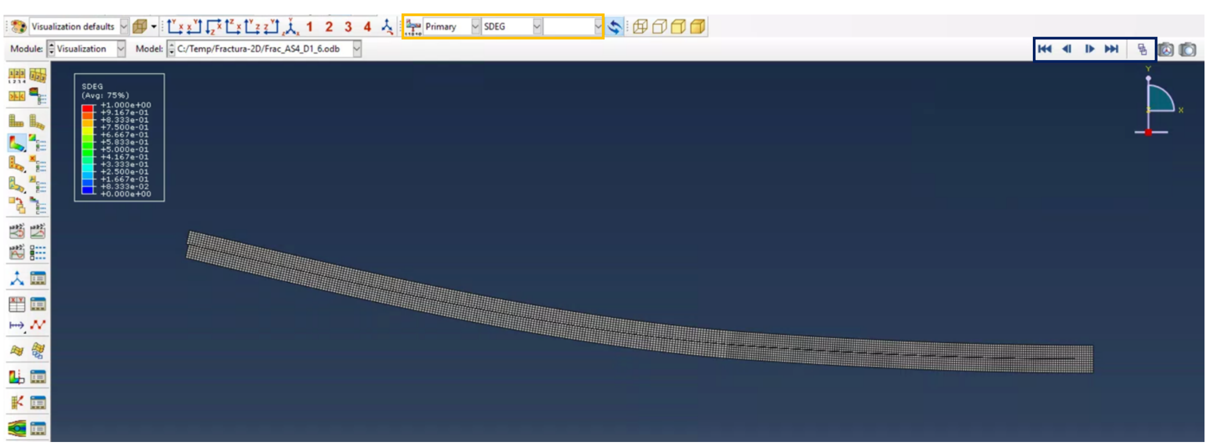


- Finalment es copien les dades de la taula, s'enganxen en un Excel i aquest Excel es guarda com un arxiu de "Text (Tab delimited)" i ja es té l'arxiu que el MatLab buscarà per generar la corba tant per escalabilitat com per el canvi de material.

Cal fer tot aquest procés per l'escalabilitat, material i comprovació de fricció tant per velocitat constant D=1 com per acceleració constant D=2.

F.9.2 Temps de fractura.

En la pestanya de "Visualization" s'utilitzaran els següents menús:



Menú 4: Per seleccionar quins resultats es volen veure.

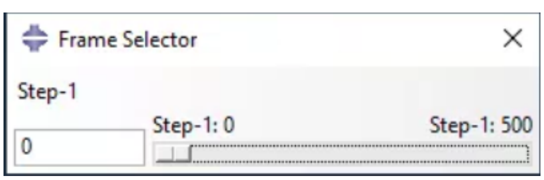
Menú 5: Per veure l'evolució del efecte en la biga del resultat que es vol mostrar.

Per saber quan comença la ruptura, després de realitzar el "Job", en "Visualization" s'ha de seleccionar "SDEG" en el menú 4.

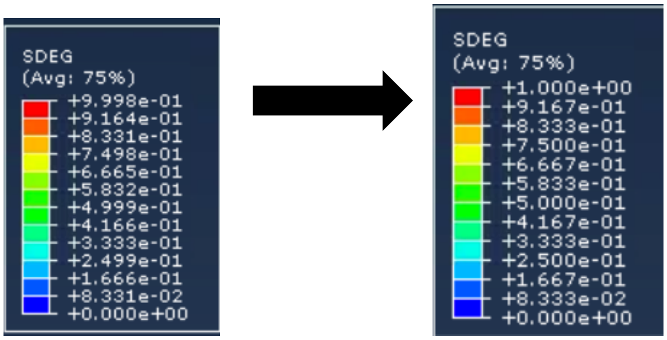
Amb aquesta selecció, es mostrarà quan comença a degradar-se els elements cohesius, en altres paraules es comença la propagació de l'esquerda.

Per saber en quin temps de la simulació comença a propagar-se l'esquerda, en el menú 5 s'ha de seleccionar la següent opció:

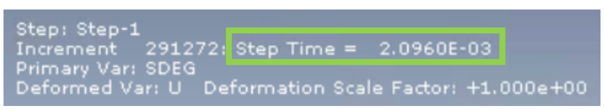
El qual obrirà una barra de rang en el qual es pot seleccionar veure els resultats en el moment de la simulació que es desitja.



I finalment per trobar el temps de fractura, s'ha de moure la barra fins que el valor en el punt crític de degradació passa a ser 1.



I el temps de fractura, en unitats de segons, es troba en la part inferior de la pantalla de simulació:



G. GUIA DE MATLAB PER L'ESCALABILITAT I CANVI DE MATERIAL.

G.1 Escalabilitat.

G.1.1 Dades inicials.

El primer codi a redactar són les propietats mecàniques del material.

```
%%AS4

AS4_rho = 1.59e-9; %Density [ton/mm^3]
AS4_E11 = 128000; %Young modulus [MPa]
AS4_nu = 0.35; %Poisson's ratio
AS4_co = sqrt(AS4_E11/(AS4_rho*(1-AS4_nu^2))); %longitudinal wave speed [mm/s]
AS4_co2 = sqrt(AS4_E11/(AS4_rho)); %longitudinal wave speed [mm/s]
```

AS4_co considera el coeficient de Poïsson del material, com les simulacions ho tenen en compte, s'aplicarà per generar les gràfiques de ràtio d'energia en base al PI1 . "Sqrt" vol dir arrel quadrada.

Seguidament s'assigna el nombre de Nakamura en velocitat constant (D=1) i acceleració constant (D=2).

```
D1 = 1; %dimensionless parameter for velocity
D2 = 2; %dimensionless parameter for velocity
```

I les últimes dades a assignar, son les dimensions que s'aniran modificant depenent el cas.

```
ac1 = 60; %Crack length [mm]
h1 = 1.5; %thickness [mm]
L1  = 120;

ac2 = 120; %Crack length [mm]
h2 = 3; %thickness [mm]
L2  = 240;

ac3 = 45; %Crack length [mm]
h3 = 1.125; %thickness [mm]
L3  = 90;
```

On les variables que acaben en 1 són pel Cas 1, en 2 pel Cas 2 i en 3 pel Cas 3.

G.1.2 Representació de les gràfiques.

En aquest apartat, s'escriu el codi per buscar el arxiu de dades que conté els punts que generen la gràfica creada pel Abaqus.

```
%%Case 1
% Simulation curves Steel D1

KS1_sim1 = dlmread('Cas1-D1-AS4-COH.txt'); %Data of the Uk/Ue from the simulation for D=1 constant velocity Steel

plot(KS1_sim1(:,1)*AS4_co/ac1,KS1_sim1(:,2),'--g');
hold on


% Simulation curves Steel D2
KS2_sim1 = dlmread('Cas1-D2-AS4-COH.txt'); %Data of the Uk/Ue from the simulation for D=1 constant velocity Steel

plot(KS2_sim1(:,1)*AS4_co/ac1,KS2_sim1(:,2),'-g');
hold on
```

"KS1_sim1" és la variable que llegeix les dades del arxiu cercat.

"dlmread" llegeix el contingut del arxiu que s'escriu en parèntesis.

"plot" genera una gràfica a partir de les dades que se li assignen -> (x, y, forma de corba)

"KS1_sim1(:,1)" són les dades de l'eix de les x, és a dir el temps, del arxiu que s'està utilitzant.

"KS1_sim1(:,1)" es multiplica per "AS4_co/ac1" ja que el PI1 és $t * C_o/a$.

"KS1_sim1(:,2)" són les dades de l'eix de les y, és a dir del ràtio d'energia, del arxiu que s'està utilitzant.

Després és realitza el mateix per els diferents casos o geometries.

G.1.3. Complements de la gràfica.

Per representar en la gràfica una línia horitzontal quan el ràtio d'energia és 1, s'escriu el següent codi:

```
%1
yline(1,'--r')
```

I finalment s'afegeix una llegenda per identificar que representa cada corba.

```
legend('Cas 1 D=1', 'Cas 1 D=2','Cas 2 D=1','Cas 2 D=2','Cas 3 D=1','Cas 3 D=2','Uk/Ue=1')
```

Després és realitza el mateix codi pels diferents materials i casos/geometries.

G.2 Canvi de material.

G.2.1 Dades inicials.

Primer s'escriu les propietats de cada material.

```
%%Steel
steel_rho = 7.85e-9; %Density [ton/mm^3]
steel_E11 = 210000; %Young modulus [MPa]
steel_nu = 0.3; %Poisson's ratio
steel_co = sqrt(steel_E11/(steel_rho*(1-steel_nu^2))); %longitudinal wave speed [mm/s]
steel_co2 = sqrt(steel_E11/(steel_rho)); %longitudinal wave speed [mm/s]

%%AS4
AS4_rho = 1.59e-9; %Density [ton/mm^3]
AS4_E11 = 128000; %Young modulus [MPa]
AS4_nu = 0.35; %Poisson's ratio
AS4_co = sqrt(AS4_E11/(AS4_rho*(1-AS4_nu^2))); %longitudinal wave speed [mm/s]
AS4_co2 = sqrt(AS4_E11/(AS4_rho)); %longitudinal wave speed [mm/s]

%%TeXtreme
TeXtreme_rho = 1.5e-9; %Density [ton/mm^3]
TeXtreme_E11 = 61400; %Young modulus [MPa]
TeXtreme_nu = 0.042; %Poisson's ratio
TeXtreme_co = sqrt(TeXtreme_E11/(TeXtreme_rho*(1-TeXtreme_nu^2))); %longitudinal wave speed [mm/s]
TeXtreme_co2 = sqrt(TeXtreme_E11/(TeXtreme_rho)); %longitudinal wave speed [mm/s]
```

I les dimensions conjuntament amb el nombre de Nakamura.

```
ac = 60; %Crack length [mm]
h = 1.5; %thickness [mm]
L  = 100; %Length [mm]
D1 = 1; %dimensionless parameter for velocity
D2 = 2; %dimensionless parameter for velocity
```

G.2.2. Equació analítica.

```
U1 = [];
for t = 0.0003:0.00002:0.005
    KS1_ana = (33/140).*((L.*(D2^2).*(3.*ac^3+L^3))./((steel_co^2).*(h^2).*(t^2)));
    U1 = [U1;t, KS1_ana];
end

plot(U1(:,1),U1(:,2),':g');
```

El codi “for”, vol dir que s’anirà repetint el procés que conte dins fins el límit final que se li imposa. Els seus límits es defineixen pel temps. “end” és el final de “for” i s’executa quan el temps és de 0.005 segons.

“ t = 0.0003: 0.00002 : 0.005” vol dir que el temps es compren des de 0,0003 segons fins 0.005 segons en salts de 0.00002 segons.

"KS1_ana" és la variable de l'equació analítica.

Aquesta equació començarà amb un temps inicial de 0.0003 segons i anirà incrementant cada 0.00002 segons fins arribar a 0.005 segons, així hi haurà dades suficients per generar el gràfic que genera l'equació analítica.

"U1" conté els valors de ràtio d'energia en base al temps, on l'eix de les x conte el temps "t" i en l'eix de les y conté el ràtio d'energia "KS1_ana".

La funció de "plot" i el seu contingut entre parèntesis ja s'ha explicat en l'apartat G.1.2 Representació de les gràfiques.

G.2.3. Equació basada numèricament.

```
% Empiric expression curve for D=1 and Steel
Ule = [];
for t = 0.0004:0.00002:0.005
    KS1_emp = 55.*(((L^4.6476).*(0.00409.*D2^4-0.03975.*D2^3+0.14835.*D2^2-0.15986.*D2+0.06853))./((ac^0.44).*(steel_co^2.2672).*(h^1.9404).*(t^2.2672)));
    Ule = [Ule;t, KS1_emp];
end
plot(Ule(:,1),Ule(:,2),'--g');
hold on
```

Conté el mateix codi que el analític, amb la diferència d' aplicar l'equació basada numèricament en comptes de la analítica.

G.2.4. Corba de simulació gràfica.

```
% Simulation curves

KS1_siml = dlmread('Steel_D2_COHESIU.txt'); %Data of the Uk/Ue from the simulation for D=1 constant velocity Steel

plot(KS1_siml(:,1),KS1_siml(:,2),'-g');
hold on
```

En l'apartat G.1 Escalabilitat. ja s'explica la funció del codi, l'únic que s'ha d'assegurar que l'arxiu d'on extreu els valors és el adequat.

Finalment s'ha de realitzar tant per D=1 com per D=2.