

Estudi experimental de la influència de l'orientació de l'anisotropia en l'evolució estructural de sistemes multicapa

A. Obiols, J. Carreras¹ i E. Druguet¹

¹ Tutors del treball: *Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Espanya.*

Resum

En aquest treball es presenten dos experiments analògics de models multicapa de plastilina amb influència de l'anisotropia o foliació. Els models han estat deformats per cisalla pura a la BCN-Stage (UAB). Com a resultat s'han obtingut estructures de lliscament i flux paral·lel a les capes, zones de cisalla obliqua i *pinch-and-swell*. Aquests experiments ens han permès conèixer millor el paper de l'anisotropia o foliació en la partició de la deformació i en la formació de zones de cisalla.

Paraules clau: Deformació experimental, lliscament i flux paral·lel a les capes, deformació, anisotropia, zona de cisalla.

Resumen

En este trabajo se presentan dos experimentos analógicos de modelos multicapa plastilina con influencia de la anisotropía o foliación. Los modelos han estado deformados por cizalla pura en la BCN-Stage (UAB). Como resultado se han obtenido estructuras de deslizamiento y flujo paralelo a las capas, zonas de cizalla oblicua y *pinch-and-swell*. Estos experimentos nos han permitido conocer mejor el papel de la anisotropía o foliación en la partición de la deformación y en la formación de zonas de cizalla.

Palabras clave: Deformación experimental, deslizamiento y flujo paralelo a las capas, deformación, anisotropía, zona de cizalla.

Abstract

Two analogue experiments of plasticine multilayer with influence of anisotropy or foliation are presented in this work. Models have been deformed by pure shear in the BCN-Stage (UAB). The resulting structures are layer-parallel slip and flow, oblique shear zones and pinch-and-swell. These experiments have allowed us to know better the role of anisotropy or foliation in deformation partitioning and in the formation of shear zones.

Key words: *Experimental deformation, Layer-parallel slip and flow, deformation, anisotropy, shear zone.*

1.- Introducció i objectius del treball.

Un dels objectius de la geologia estructural ha estat i és estudiar les estructures resultants de processos deformatius, interessant-se per les causes i condicions de formació d'aquestes estructures i intentar deduir com s'han format. Basant-nos en aquest interès el present treball pretén conèixer millor quines estructures de deformació es generen en materials prèviament anisòtrops, com roques bandades i/o foliades, com es desenvolupen i sota quines condicions. En particular es vol analitzar la influència de l'orientació de l'anisotropia prèvia en les estructures generades.

Aquest estudi el durem a terme mitjançant 2 models multicapa de plastilina i posteriorment deformats, variant l'angle d'inclinació de les capes d'un experiment a l'altre, que estaran més detalladament explicats en l'apartat de *Materials i metodologia* que forma part d'aquest treball i que veurem més endavant.

Aquest treball no és un estudi pioner ja que ja s'han realitzat altres estudis i experiments per tal d'estudiar la deformació en roques anisòtrops, però tampoc és un àmbit conegut en la seva totalitat, i per tant cal aprofundir en aquest tipus d'estudi.

En la realització d'aquests experiments pretenem observar i estudiar com es nucleen zones de cisalla (Figura 1) en materials anisòtrops o foliats. L'anisotropia influeix en la organització espacial de la deformació i la evolució mecànica del medi, amb propietats diferents segons la direcció de l'espai que es considera (Gomez-Rivas, 2008). Existeixen tres tipus:

1. Estratificació (alternança de diferents materials amb propietats mecàniques diferents).
2. Anisotropia contínua (variacions unidireccionals produïdes per la orientació preferent de fàbriques penetratives cristal·lines degudes a processos deformatius).
3. Plans discrets de debilitat (plans de menor cohesió).

La presència d'anisotropia mecànica (Price i Crossgrove, 1990) pot produir partició de la deformació (*strain partitioning*), que pot repartir la deformació de forma heterogènia, o pot afavorir la localització al produir-se una heterogeneïtzació dels esforços locals.

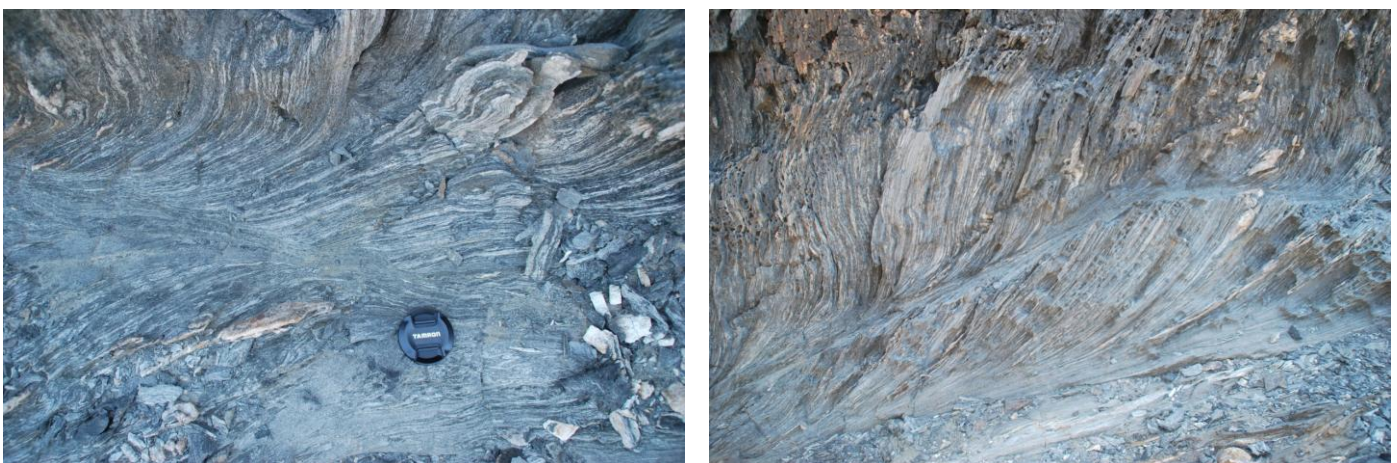


Figura 1 . Detall de zones de cisalla al Cap de Creus (Alt Empordà, Catalunya).



Figura 2 . Lliscament entre capes de marbre (capes negres i blanques) i metasemites, Cap de Creus.

Al treballar a partir d'un model multicapa amb capes amb diferents comportaments mecànics, es podria produir refracció de la deformació (*strain*) entre les capes (Treagus, 1988). La teoria de la deformació de materials mecànicament anisòtrops (Biot, 1965) diu que els tipus d'estructures que es desenvolupen quan la compressió principal és normal a la fàbrica o estratificació depenen de la magnitud de l'anisotropia.

L'objectiu d'aquest treball és estudiar l'efecte de l'anisotropia en la nucleació de zones de cisalla a partir de deformar models multicapa. També esperem que es nucleïn altres estructures com *kink bands* o *pinch-and-swell* (Kidan i Cosgrove, 1996), que van concloure que les estructures que es formaven poden ser controlades mitjançant propietats de diverses capes individuals dins la multicapa o per l'anisotropia mecànica de la multicapa en el seu conjunt.

Per últim fer referència a alguns casos reals de camp, com podria ser la zona de Cap de Creus on trobem molt bons exemples de zones de cisalla desenvolupades en roques anisòtrops o foliades.

Podem diferenciar dues unitats litològiques: una seqüència de roques sedimentàries pre-varisques que inclouen intercalacions d'origen igni de la mateixa edat, i uns granitoides (granodiorites) que formen dos petits cossos intrusius (Rodes i Roses) emplaçats sintectònicament durant l'orogènia varisca en els materials de la part alta de la sèrie sedimentària (Carreras, J. I Druget, E., 2013).

La península de Cap de Creus (Figura 3) representa l'acabament oriental de la Zona Axial del Pirineu, on existeixen dues faixes de cisalla (*shear belt*) de direcció ONO-ESE, d'edat tardi-varisques, que formen part de les faixes milonítiques afectant el basament Paleozoic dels Pirineus. Les milonites estan associades a zones de cisalla dúctils. La principal característica d'aquestes zones de cisalla és la seva relació geomètrica-cinemàtica complexa i el control que exerceix la foliació preexistent en la localització i evolució d'aquestes zones. Segons Depenen de la orientació de la foliació es desenvolupen un o dos conjunts de cisalles (Carreras, 2001).

Durant la nucleació de zones de cisalla la foliació o anisotropia preexistent no roman passiva, sinó que desenvolupa inestabilitats. Aquestes inestabilitats són similars a les produïdes en experiments de

deformació anisòtropa com els de Cosgrove, 1976 o William i Price, 1990 (Carreras, 2001) i els experiments realitzats en aquest treball.

Malgrat tots aquests experiments, la influència de l'anisotropia en la localització de la deformació encara no s'ha arribat a comprendre satisfactòriament.

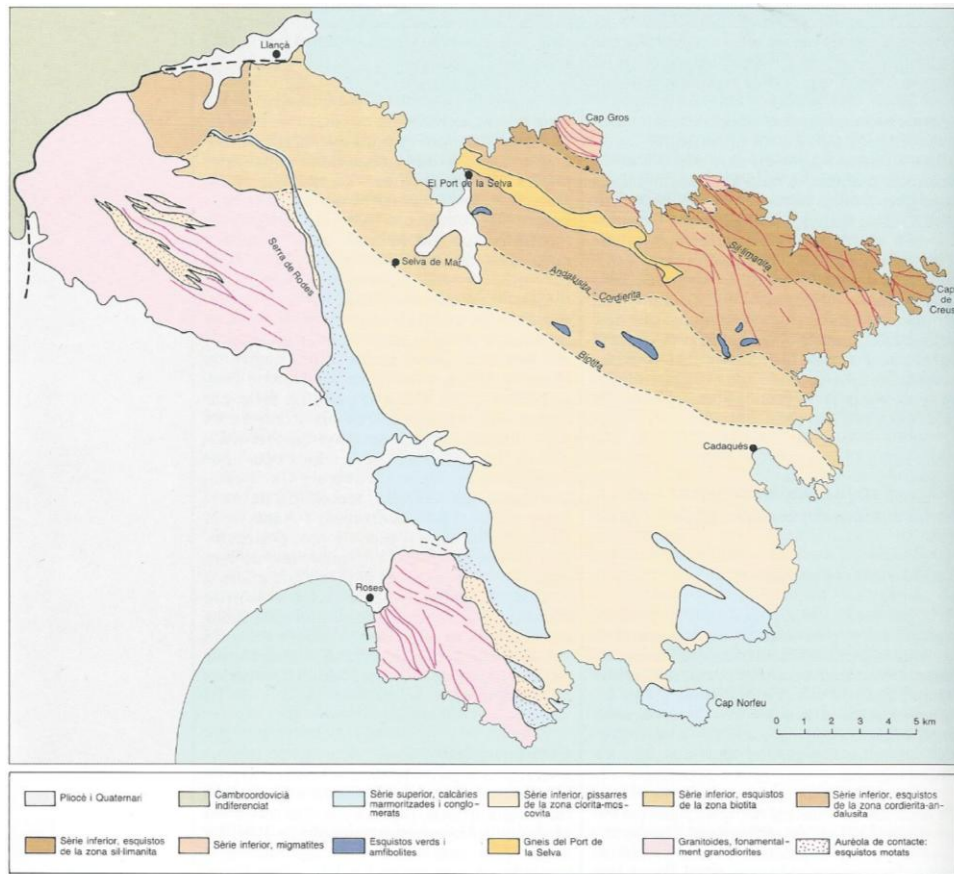


Figura 3 . Mapa geològic de Cap de Creus. Font: Enciclopèdia de la història natural del país catalans, 1986.

2.- Materials i Metodologia.

En aquest apartat es descriurà la metodologia dels anàlisis experimentals duts a terme en aquest treball, que es van realitzar en el Laboratori de Modelització analògica del Departament de Geologia de la UAB. A continuació s'expliquen les principals característiques de la màquina de deformació BCN-Stage, els materials, condicions així com el procediment de la modelització.

2.1.- Materials.

Els materials utilitzats en la modelització analògica són els següents:

- La plastilina és un material no tòxic i de fàcil manipulació utilitzat com material anàleg a roques de l'escorça inferior/mitjana (Figura 4). Té un comportament reològicament com un fluid viscoelàstic no newtonià. Existeixen diferents colors de plastilina per tal de poder observar un contrast visual als models (capes grogues i blaves en el nostre cas) i el desenvolupament de les estructures. La plastilina emprada en aquest treball la va subministrar l'empresa Oclu-plast S.L. (Rubí-Barcelona). Existeix un petit contrast de viscositat entre les plastilines de colors clars i les de colors foscos, que contribueix a l'anisotropia dels models multicapa.



Figura 4 . Cilindres de plastilina de l'empresa Oclu-plast S.L.

- La vaselina filant és un material lubricant, que barrejat amb la plastilina, en diferents proporcions, augmenta la ductilitat i en els models multicapa s'aconsegueix una major anisotropia i contrast mecànic entre capes. La marca de vaselina emprada és Brugarolas S.A..
- La glicerina és un alcohol amb tres grups hidroxil (-OH), no tòxica, en forma líquida a 25°C, inodora i higroscòpica, amb un alt coeficient de viscositat. En els nostres models em aplicat glicerina a la cara superior del model per evitar que es quedés enganxat al vidre de la BCN-Stage.
- També s'han utilitzat eines per retallar, donar forma, mesurar i conservar les capes de plastilina que hem fabricat com eines de tall (serra de carn), tòrcul, regles, rodets o el paper de cuina (Figura 5).

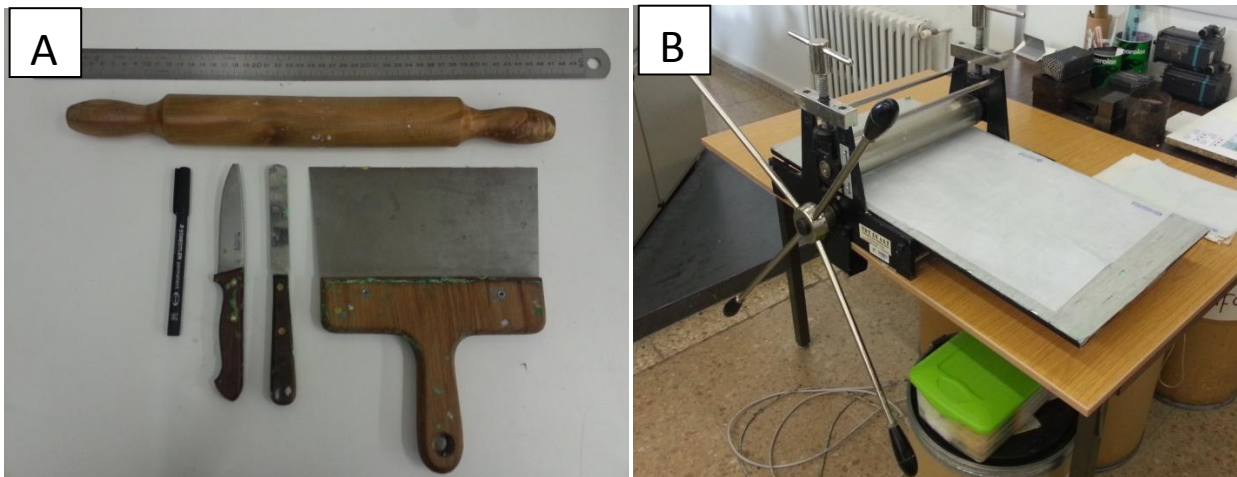


Figura 5. A) Estris de tall, modelat i mesura (Rodet de cuina, espàtula, ganivets, regla metàl·lica i retolador). B) Rodet per aconseguir l'espessor desitjat de les capes de plastilina.

2.2.- Màquina de deformació.

La màquina emprada és un prototip de premsa cinemàtica per a la deformació experimental amb materials analògics, anomenada BCN-Stage (Figura 6.A). Consisteix en una cel·la disposada en forma de paral·lelogram, amb cada parell de costats paral·lels a un dels eixos cartesianes X i Z. Cada parell de costats es desplaça longitudinalment al llarg d'un eix amb doble pistó, connectat a un motor elèctric controlat per un ordinador mitjançant el software "Makina control software" programat per l'empresa AdCon sistemes S.L. (Castaño, 2010).

El dispositiu permet controlar la velocitat de la deformació i la seva vorticitat cinemàtica, des de condicions de cisalla pura a cisalla simple, aquest últim per mitjà de la rotació dextral del eix Y impulsat per un tercer motor Z. També porta incorporat un ventilador d'aire calent per aclimatar l'entorn de la màquina a la temperatura desitjada, en aquest cas 28°C.

A la part superior, la cel·la compta amb una tapa de vidre trempat transparent per a experiments semiconfinats i per a l'observació continua de la cara superior del model durant l'experimentació.

Cal destacar altres accessoris externs la màquina com la càmera digital Mamiya automatitzada, mitjançant un disparador, ubicada verticalment a la superfície del vidre i els focus de llum freda per a una millor il·luminació, així com evitar canvis en la temperatura del experiment.

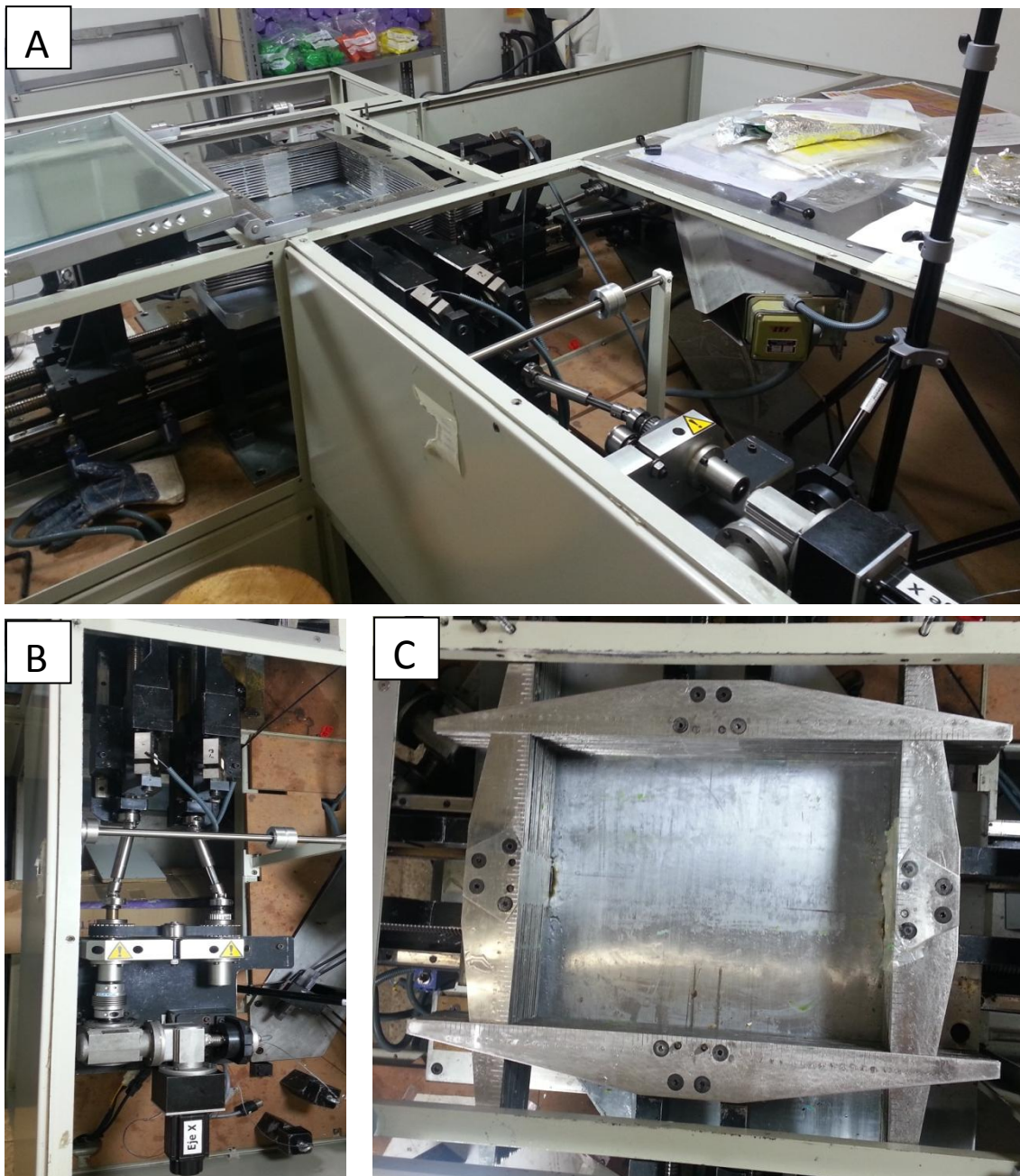


Figura 6. A) Aparell de deformació amb el que s'han realitzat els experiments. B) Eix X de la màquina de deformació que és el que produeix l'estirament. C) Cel·la on encaixem el model per a procedir a la seva

2.3.- Condicions experimentals.

Tots els experiments van ser realitzats sota condicions de cisalla pura, a 28°C de temperatura i amb una taxa de deformació constant de $2.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ i amb un escurçament màxim del 50%. La compressió es va fer paral·lela a la dimensió més llarga del model i sobre l'eix Z, i la extensió al llarg de l'eix X. La variable dels experiments és l'orientació de les capes respecte els eixos cinemàtics X i Z, de manera que en un dels models l'angle entre les capes i l'eix X és de $\approx 30^{\circ}$ i en l'altre de $\approx 60^{\circ}$.

Els experiments han tingut una duració d'entre 4 i 8 hores, en els quals hi ha hagut un seguiment fotogràfic a intervals regulars de 10 minuts.

2.4.- Procediment.

Per dur a terme la modelització analògica és necessari preparar una sèrie de models per tal de poder deformar-los i estudiar-los. En aquest treball s'han realitzat dos models multicapa de plastilina groga i blava. A aquesta última li hem afegit vaselina per tal d'augmentar l'anisotropia i el contrast de competències entre capes.

Per preparar els models ha estat necessari manipular la plastilina per crear capes de 8 mm d'espessor, en el cas de la plastilina groga, i capes de 4 mm en el cas de la blava. Per tal de facilitar la manipulació s'escalfava la plastilina al microones i es procedia al seu modelat, creant capes de 12x20 cm, en el model a $\approx 30^\circ$ d'inclinació, i capes de 12x35 cm, en el model de $\approx 60^\circ$. Posteriorment amb l'ajuda del rodet i el tòrcul s'aixafaven per aconseguir el gruix adequat i eren retallades en forma de rectangle. En el cas de la plastilina blava, abans de donar-li forma la barrejàvem amb un 9% de vaselina.

Un cop elaborades totes les capes necessàries (entre 40-50 capes) es procedia al muntatge del model, apilant de forma intercalada capes grogues i blaves. Un cop apilades les capes es mesura l'angle amb que es vol donar inclinació a les capes i es talla la cunya sobrant de la base i es situa a la part superior. A continuació retallem el model amb la serra per tal que el puguem introduir a la màquina.

Abans de iniciar l'experiment s'ha de dibuixar quadrícula (*grid*) i alguns cercles amb el retolador per tal de poder estudiar millor la deformació. Un cop dibuixada la quadrícula ja tenim el model a punt i li afegim glicerina a la cara superior per que no s'adhereixi al vidre i vaselina als costats per tal que no s'adhereixi a les parets de la cel·la.

Per finalitzar tanquem la tapa i introduïm les mesures finals del model al software "Makina control software" i iniciem l'experiment, que durarà de 7 a 8 hores, equivalent a un 52-50% d'escurçament que corresponen als experiments 19.01 i 19.02 respectivament.

Hem volgut realitzar una segona deformació per a cada un dels dos experiments amb l'objectiu d'intentar que es formessin o intensifiquessin algunes estructures de deformació com zones de cisalla. Aquestes segones fases de deformació experimental han tingut una durada d'unes 4 hores cada una, equivalent a un 21-40% d'escurçament. Com a resultat s'assoleix un escurçament final de 62% per l'experiment 19.01 i 70% per l'experiment 19.02.

Cal fer important menció en que aquesta feina, d'elaborar capes de plastilina, pot semblar a priori senzilla, però no ho és pas. Les capes s'han d'aplanar i retallar, i les blaves a més s'han de barrejar amb vaselina, i això requereix una gran inversió de temps degut al gran nombre de làmines necessàries per a muntar el model. A més, s'ha de tenir en compte que ambdós models han estat redeforats, cosa que ha implicat afegir mes capes de plastilina a les vores i tornar a tallar, a part del seguiment de la deformació del model dins la màquina.

3.- Resultats obtinguts i interpretació.

En aquest apartat exposarem el resultats obtinguts de la experimentació amb els models anteriorment explicats. Tots i cada un dels següents resultats són propis, obtinguts a partir de les dades mesurades per el software “Makina control software” durant les fases de la deformació en forma de taules de dades a l’Excel. Aquest software ens facilita dades sobre l’estat inicial, temps, l’escurçament, l’estirament i la velocitat de cada eix.

CONCEPTE	DEFINICIÓ
Rxz	Relació axial de la deformació en el pla XZ. No té unitats.
Rotació de capes global	Rotació de les capes cap a una posició paral·lela a l’estirament.
Slip	Lliscament paral·lel a la vora de les capes. En mil·límetres.
Flow	També anomenat <i>Slip</i> intern, és el aquell lliscament que es produeix a l’interior de les capes.
R interna	Deformació interna representada en forma d’el·lipses als experiments. No té unitats.

Taula 1. Explicació de paraules importants emprades en aquest treball.

A banda de les taules de dades s’han mesurat diversos paràmetres en les seqüències fotogràfiques dels experiments. El software de la BCN-stage elabora automàticament dades sobre la deformació global de la cel·la que han servit per generar els gràfics Rxz/temps (Gràfic 4, 7, 11 i 15). En aquests gràfics s’observa que la deformació global assolida és $Rxz \approx 6$ per l’experiment 19.01 i $Rxz \approx 11$ per l’experiment 19.02. Totes les altres mesures, referides a la deformació de la multicapa, s’han obtingut aprofitant el quadrícula dibuixada a la part superior dels models i amb l’ utilització dels programes Canvas X i Inkscape, amb els que hem pres mesures del lliscament, de vora i intern (Figura 8.A), l’angle de les capes i la R interna (Figura 8.B).

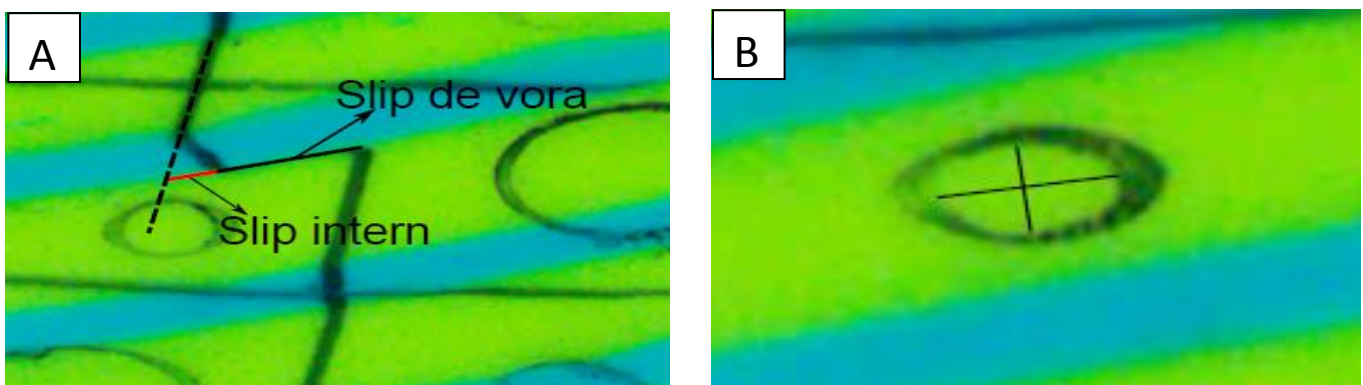


Figura 8. A) Detall d’un fotograma de l’experiment 19.01 on es pot observar com s’ha mesurat el lliscament intern i el de vora. B) Detall d’un fotograma de l’experiment 19.01 on s’ha mesurat la R interna en una el·lipse d’una capa competent.

Mitjançant aquestes mesures a l'Excel hem generat una sèrie de taules i gràfics per a una millor i més fàcil interpretació. El tipus de gràfics escollits ha estat el de dispersió.

A més disposem de les seqüències fotogràfiques dels experiments per tal de poder observar l'evolució dels models al llarg del temps i a mesura que avança l'escurçament. D'aquestes seqüències només presentarem una part, que en aquest cas correspondran a la fotografia inicial i a la final, amb possibilitat d'afegir alguna que considerem rellevant. La resta de fotografies es podran consultar a l'Annex 1.

Dividirem aquest apartat en quatre parts, una per a cada experiment:

3.1.- Experiment 19.01.

Aquest és el primer experiment, les condicions inicials del qual són 148 mm en l'eix X i 286 mm en l'eix Z, amb un escurçament del 48%, finalitzen amb 282 mm en l'eix X i 150 mm en l'eix Z. L'escurçament ha estat calculat de la següent manera:

$$S_z = S_f / S_i$$

On la S_f és la dimensió de Z final (mm) i S_i és la dimensió Z inicial (mm). Un cop obtenim S_z , li restem 1 i la multipliquem per 100, per tal d'obtenir el % d'escurçament. L'escurçament total (indicat en l'apartat de *Materials i metodologia*) s'ha calculat multiplicant tots els S_z , restant-li 1 i multiplicant-lo per 100.

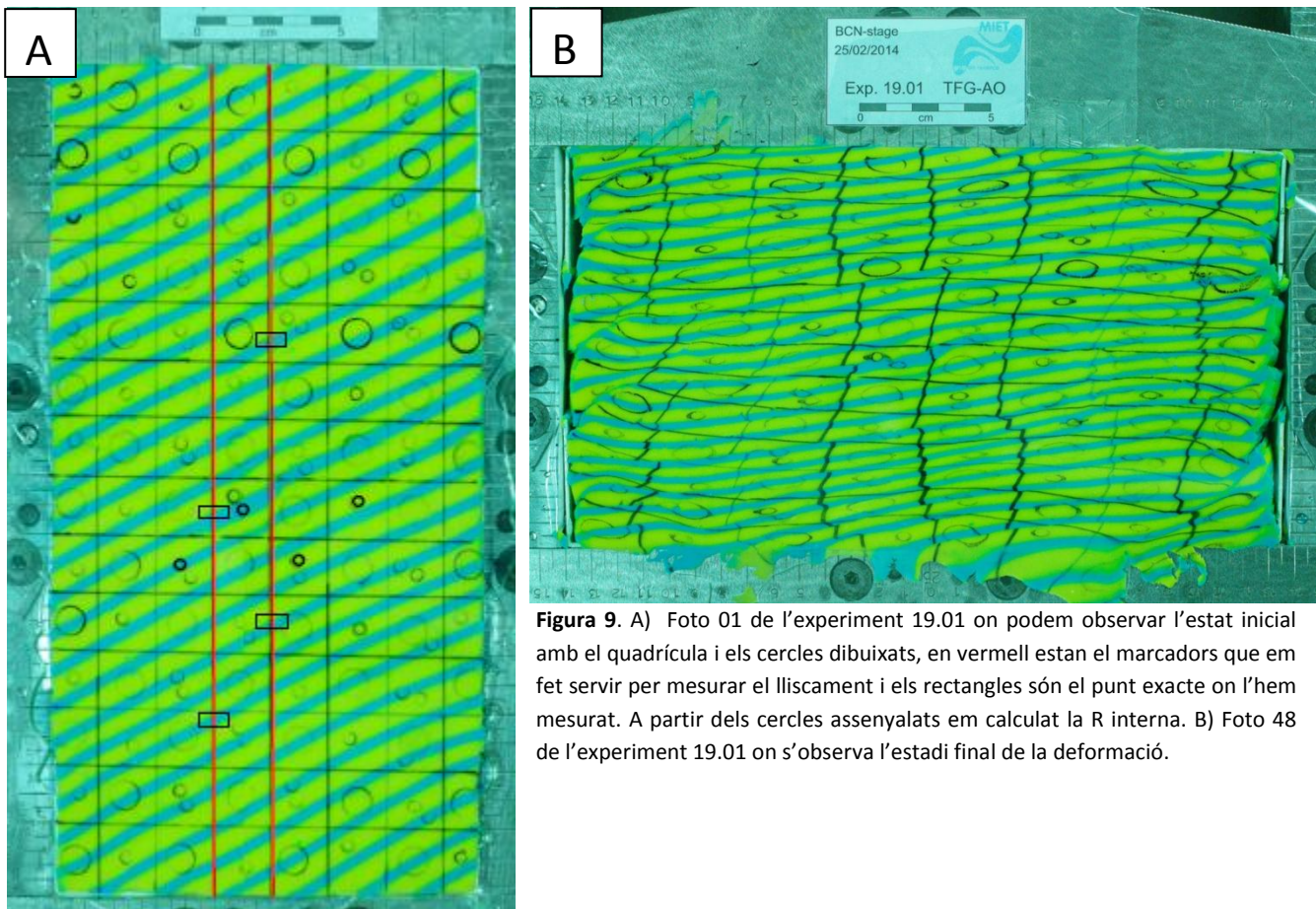
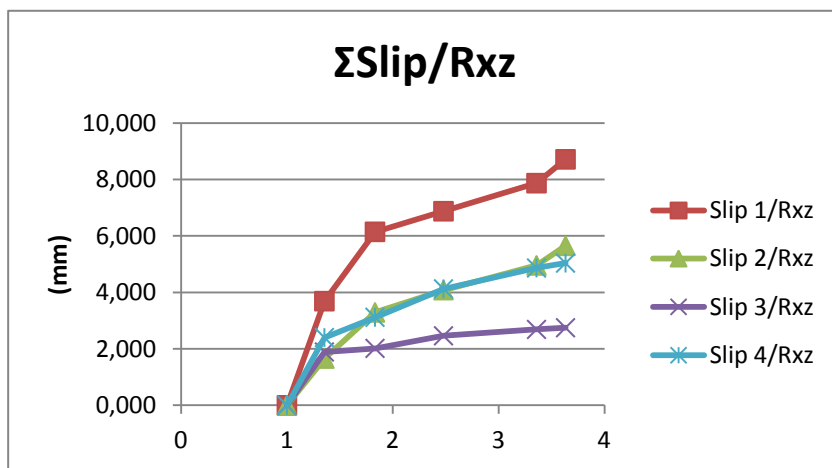


Figura 9. A) Foto 01 de l'experiment 19.01 on podem observar l'estat inicial amb el quadrícula i els cercles dibuixats, en vermell estan el marcadors que em fet servir per mesurar el lliscament i els rectangles són el punt exacte on l'hem mesurat. A partir dels cercles assenyalats em calculat la R interna. B) Foto 48 de l'experiment 19.01 on s'observa l'estadi final de la deformació.

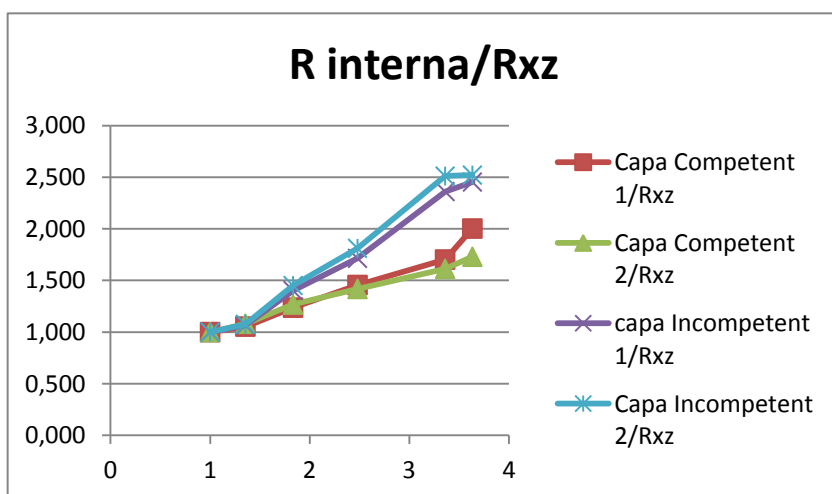
En les fotografies anteriors (Figura 9.A i B) es pot veure com l'angle de les capes, que inicialment era de $\approx 26^\circ$, disminueix fins a $\approx 6^\circ$ (Gràfic 4) a mesura que augmentem l'escurçament. Aquest baix angle afavoreix l'aparició d lliscament de vora i intern, com podem observar en la figura 9.B, i que apareix en les capes més incompetents (les blaves), mentre que en les més competents (grogues) només tenim lliscament de vora. El lliscament ha estat representat en el gràfic 1 en forma de $\Sigma slip$ (=slip de vora+slip intern) on s'observa com augmenta a mesura que augmenta l'escurçament.

Com a conseqüència del baix angle de les capes aquestes no poden rotar tant com s'observarà en el següent experiment i per tant es produirà deformació interna, sobretot a les incompetents, produint-se un aprimament de les capes a mesura que avança l'experiment. Aquesta deformació interna provoca un major estirament dels cercles, que passen a ser el·lipses, donant valors de R interna majors que en l'experiment 19.02 (Gràfic 2).

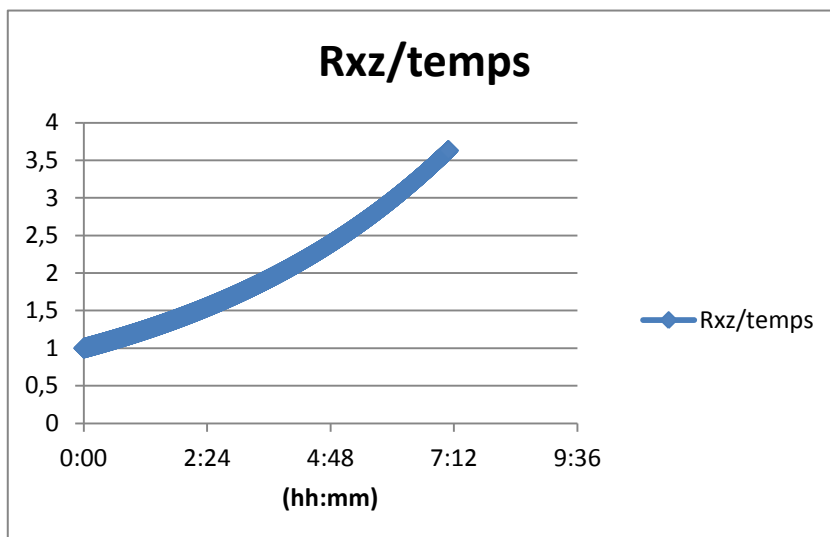
Aquest experiment no mostra nucleació de zones de cisalla, així que l'haurem de deformar una segona vegada per tal d'obtenir-ne alguna i poder-la estudiar.



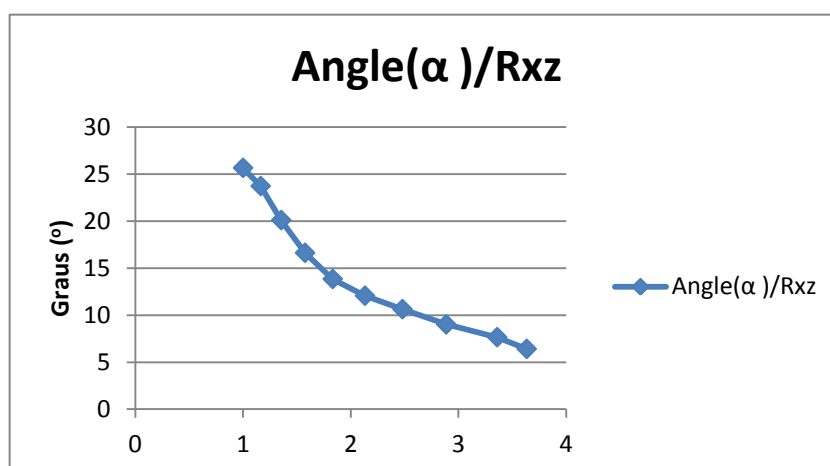
Gràfic 1. Gràfic on es relaciona el slip amb la Rxz.



Gràfic 2. Gràfic on es relaciona la R interna amb la Rxz.



Gràfic 3. Gràfic on es relaciona la Rxz amb el temps.



Gràfic 4. Gràfic on es relaciona l'angle amb la Rxz.

3.2.- Experiment 19.01.b

Aquest experiment és una segona deformació del 19.01, on partim de les condicions finals (en quant a lliscament entre capes, R interna i angle) de l'experiment anterior, però amb unes noves dimensions que ens donen un escurçament del 21%.

Per a dur a terme les mesures s'han utilitzat els mateixos marcadors que en l'experiment 19.01.

En aquesta redeformació l'angle de les capes continua disminuint a mesura que augmenta l'escurçament (Gràfic 8), però en menor proporció ja que són casi horitzontals ($\approx 6^\circ$). El lliscament continua en augment (Gràfic 5), tant el de vora com l'intern, aquest últim només present en les capes incompetents. La R interna també continua augmentant (Gràfic 6), igual que continua l'aprimament de les capes, sobretot les incompetents.

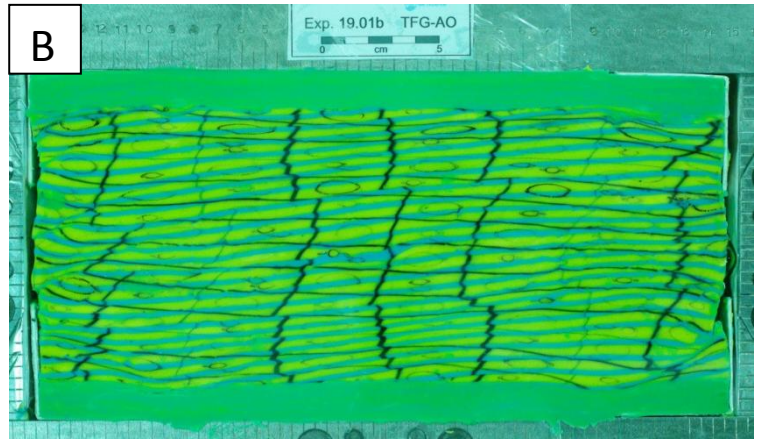
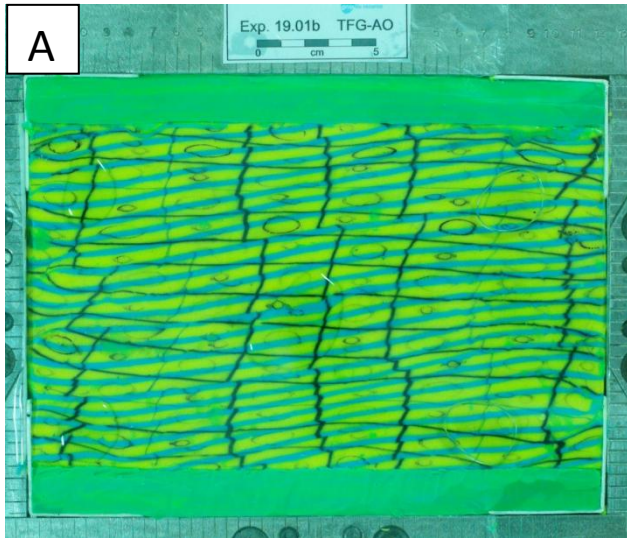


Figura 10. A) Estadi inicial de l'experiment 19.01.b que és igual al estadi final de l'experiment 19.01. B) Estadi final de l'experiment 19.01.b.

En els estadis finals sobretot es comença a intuir la nucleació d'un sistema de cisalla conjugat, i s'observa més clarament en els escàners realitzats l'estadi final del experiment realitzats a diferents profunditats de 2, 4 i 6 cm (Figura 11), ja que no tenim la quadrícula dibuixada. Aquests escàners es podran consultar a l'Annex 2. Considerarem les cisalles situades al centre o prop del centre del model, ja que les properes als marges poden estar influenciades per efectes de vora o proximitat als pistons de deformació.

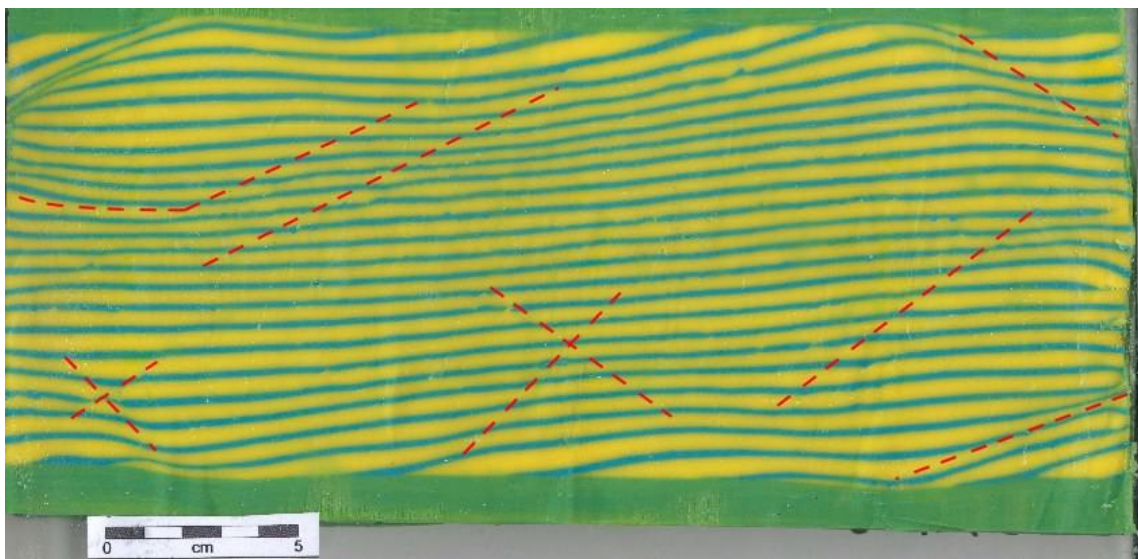
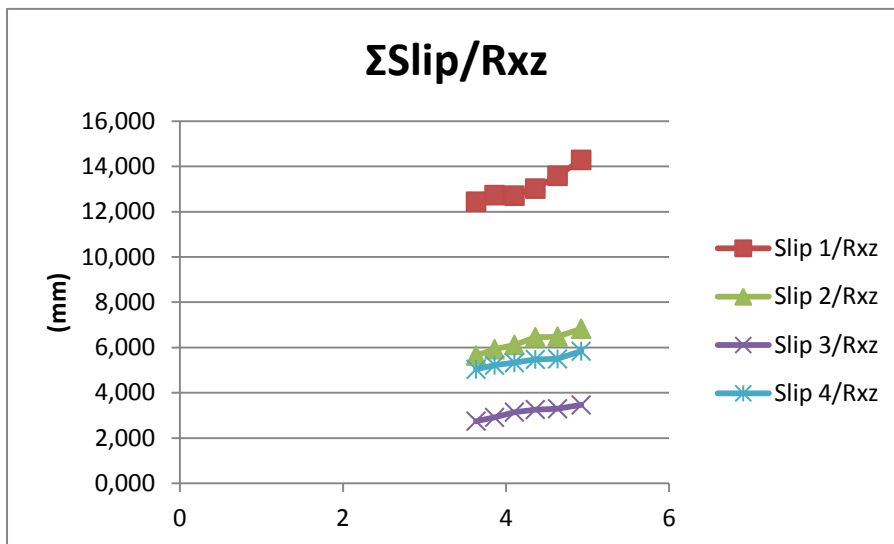
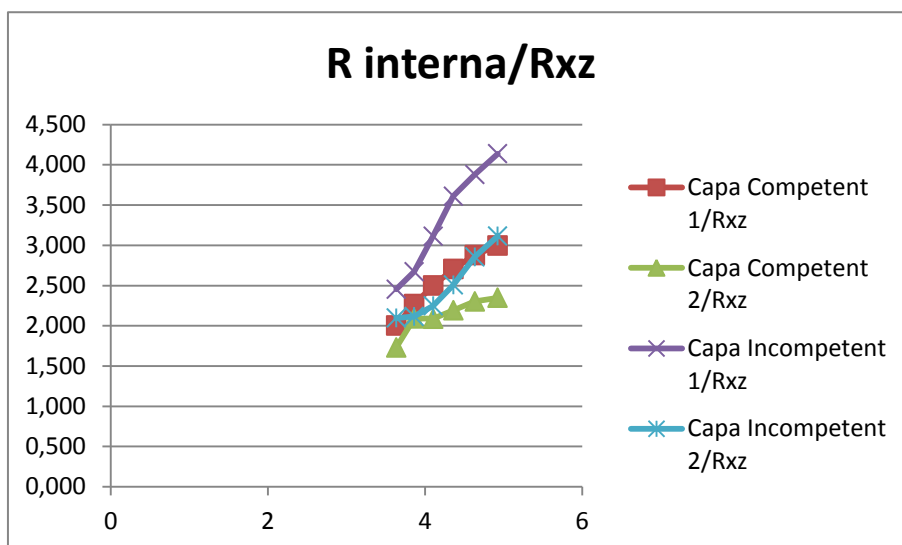


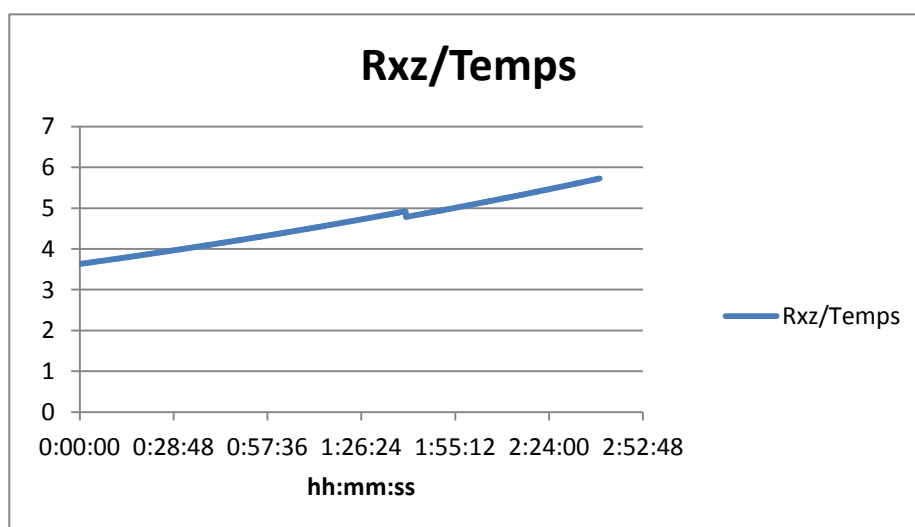
Figura 11. Escàner del estat final de l'experiment 19.01.b a 4 cm de profunditat, on es pot observar com nuclea un sistema de cisalla conjugat amb un angle obtús degut a la seva ductilitat, mentre que si fossin més fràgils formarien angles més aguts. .



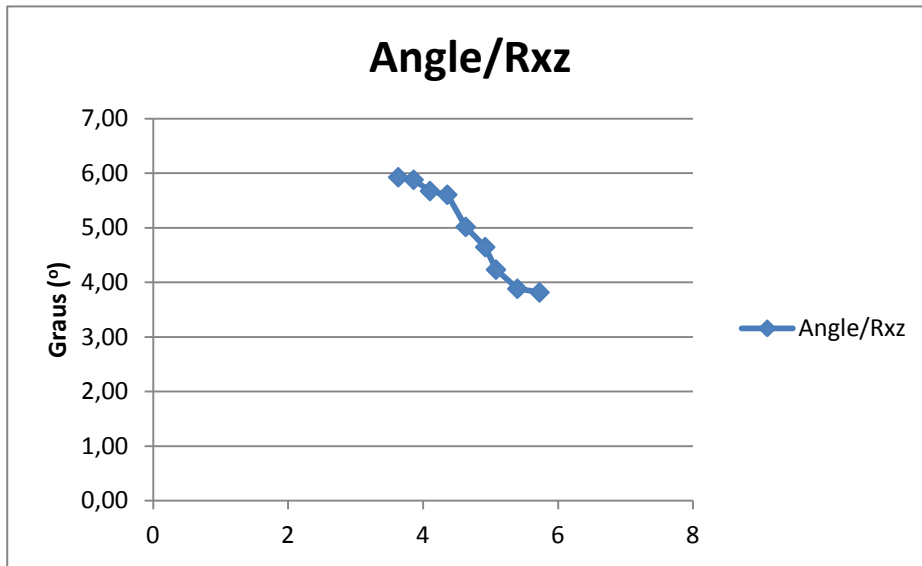
Gràfic 7. Gràfic on es relaciona el slip amb la Rxz.



Gràfic 6. Gràfic on es relaciona la R interna amb la Rxz.



Gràfic 7. Gràfic on es relaciona la Rxz amb el temps.



Gràfic 8. Gràfic on es relaciona l'angle amb la Rxz.

3.3.- Experiment 19.02.

En aquest segon experiment tenim unes condicions inicials de 152 mm en l'eix X i 292 mm en l'eix Z, amb un escurçament del 50%, finalitzant amb 306 mm en l'eix X i 145 mm en l'eix Z.

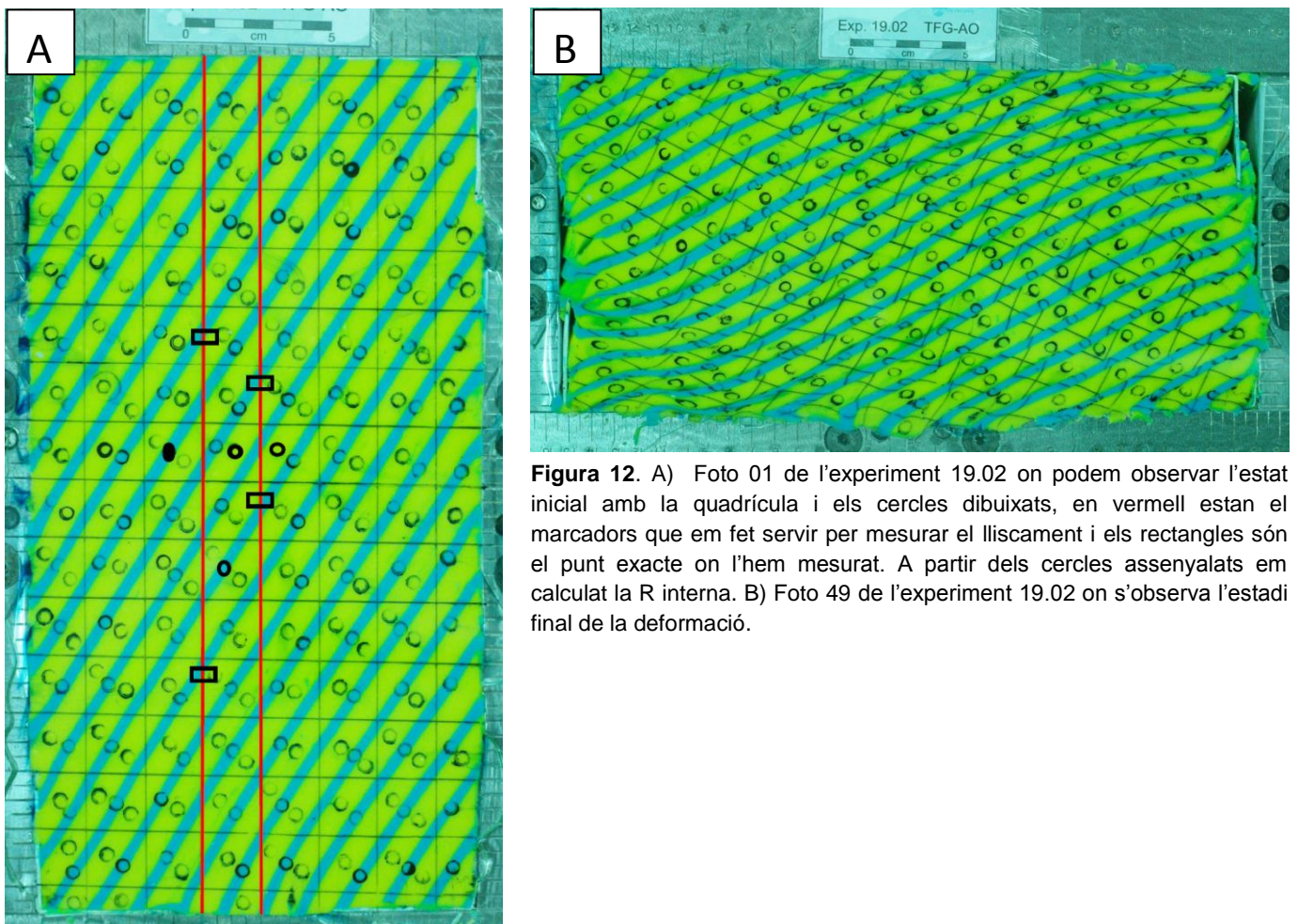
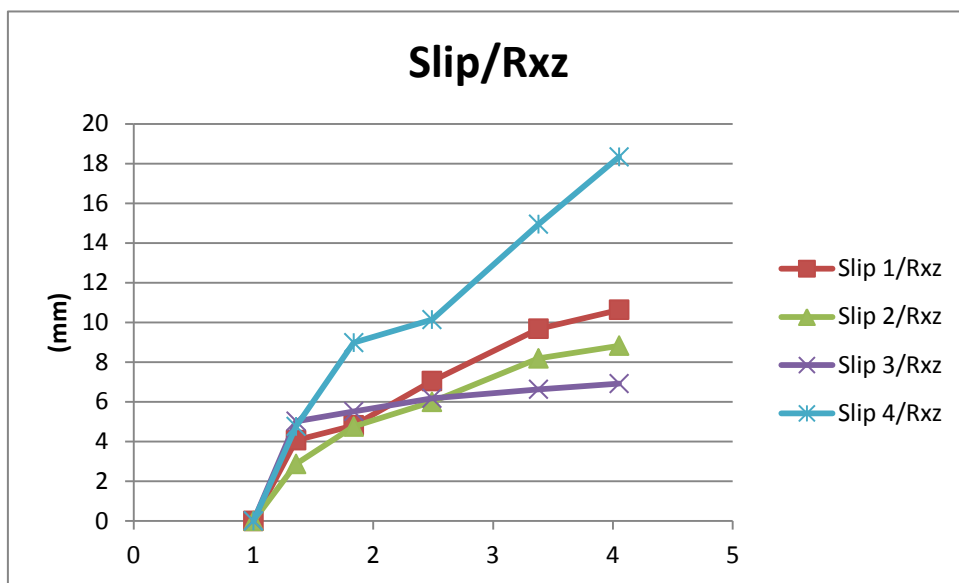


Figura 12. A) Foto 01 de l'experiment 19.02 on podem observar l'estat inicial amb la quadrícula i els cercles dibuixats, en vermell estan el marcadors que em fet servir per mesurar el lliscament i els rectangles són el punt exacte on l'hem mesurat. A partir dels cercles assenyalats em calculat la R interna. B) Foto 49 de l'experiment 19.02 on s'observa l'estadi final de la deformació.

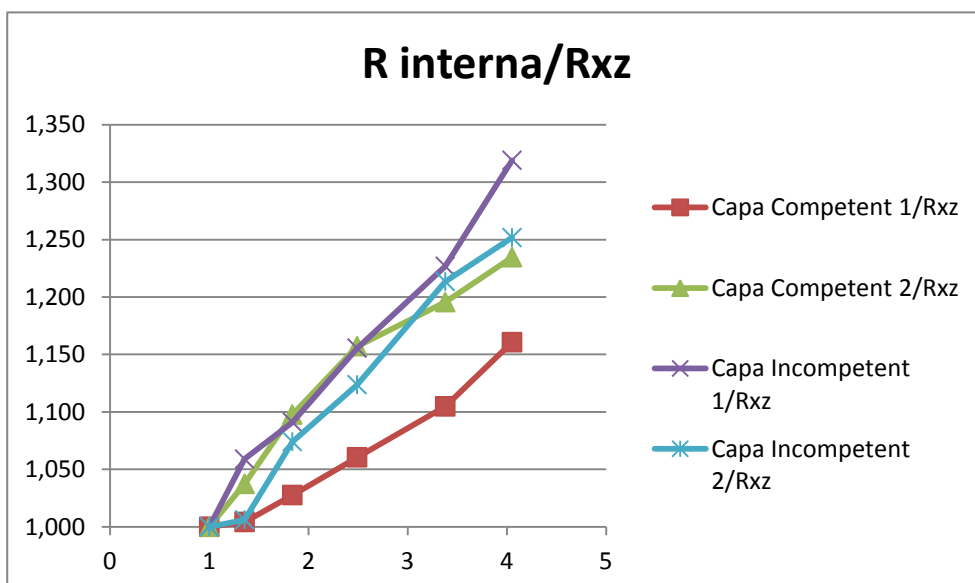
En aquest experiment (Figura 12. A i B) l'angle va disminuint de $\approx 56^\circ$ fins a $\approx 32^\circ$ a mesura que evoluciona l'escurçament (Gràfic 12). No s'observa lliscament intern ni en les capes competents ni en les incompetents, però sí continua present el lliscament de vora, que va en augment a mesura que avança la l'escurçament (Gràfic 9).

La R interna és menor a la mesurada en l'experiment anterior (19.01) degut a que les capes inicialment tenen un major angle ($\approx 60^\circ$) tenen més espai per rotar i per tant sofreixen menys aixafament i per tant menys deformació interna (Gràfic 10), fet que explica també el per que no trobem lliscament intern en aquest experiment.

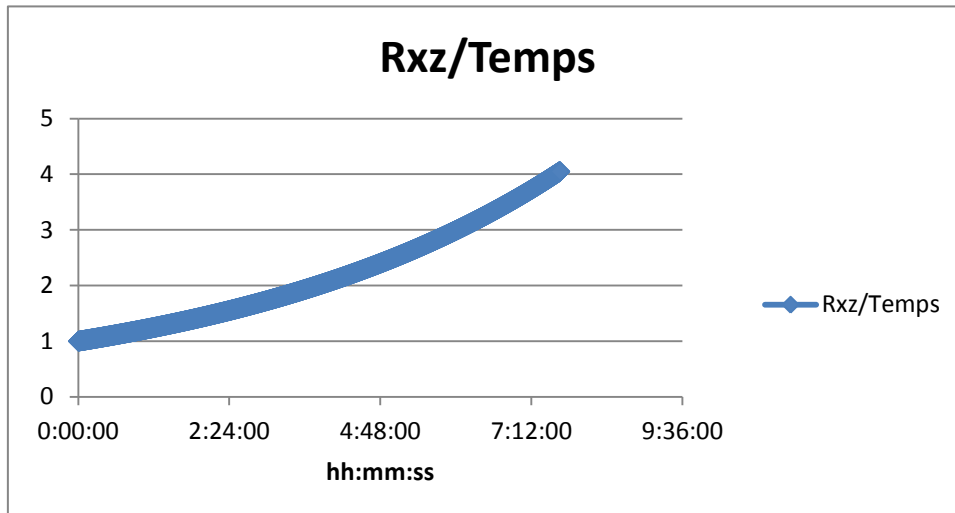
Per últim dir que encara no s'observa nucleació de zones de cisalla i haurem de deformar una segona vegada aquest model per tal de que apareguin i les puguem estudiar.



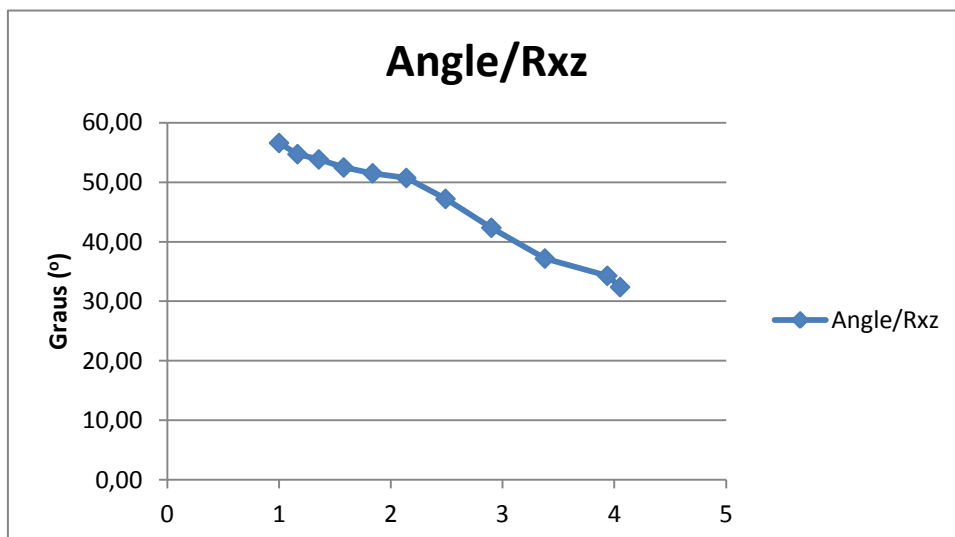
Gràfic 9. Gràfic on es relaciona el *slip* amb la Rxz.



Gràfic 10. Gràfic on es relaciona la R interna amb la Rxz.



Gràfic 11. Gràfic on es relaciona la Rxz amb el temps.



Gràfic 12. Gràfic on es relaciona l'angle i la Rxz.

3.4.- Experiment 19.02.b.

En aquesta segona deformació de l'experiment 19.02 partim de les seves dades finals, realitzant un escurçament del 40%. Mantenim els mateixos marcadors que en l'experiment anterior per a realitzar les mesures de lliscament (*slip*) i R interna.

Com podem observar (Gràfic 16) l'angle continua disminuint fins arribar a 15°, i la R interna segueix donant valors inferiors a la segona deformació del experiment 19.01, tot i que augmenta (Gràfic 14) ja que cada cop hi ha menys espai per a que les capes rotin.

Al tenir inicialment un angle elevat, implica un major espai per a la rotació de les capes i per tant no afavoreix l'aparició de deformació interna, o no de forma tant acusada com en el de 30°, i per tant només es forma lliscament de vora, superior als valors de l'experiment 19.01 (Gràfic 13). Continua havent aprimament de les capes a mesura que avança l'escurçament, però és menor a l'aprimament que es produeix en el primer experiment.

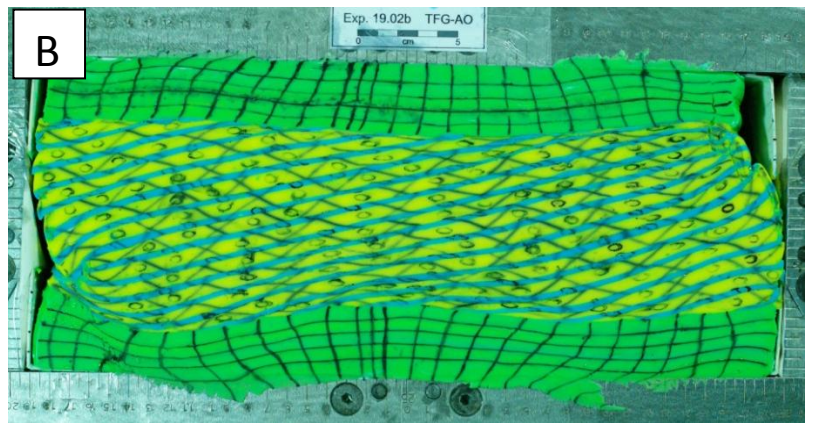
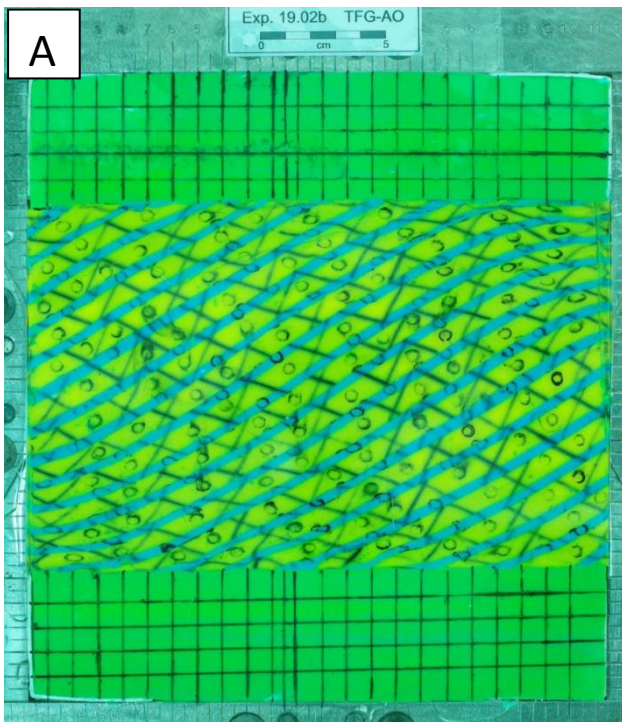


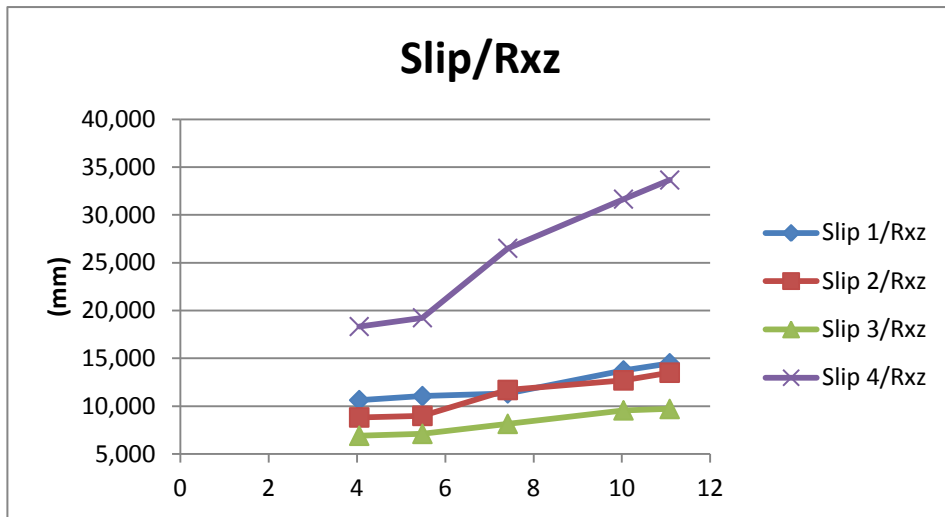
Figura 13. A) Estadi inicial de l'experiment 19.02.b i final de l'experiment 19.02. B) Estadi final de l'experiment 19.02.b.



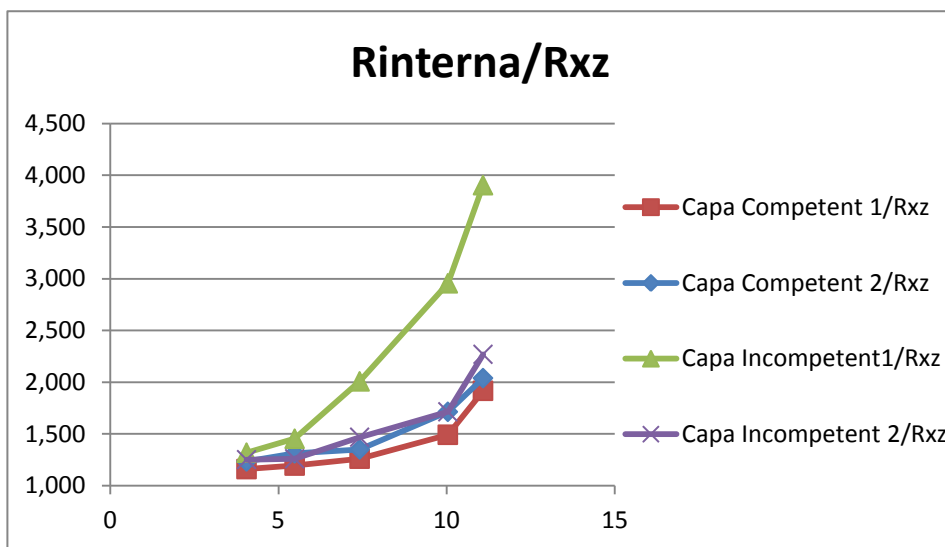
Figura 14. Escàner del estat final de l'experiment 19.02.b a 7 cm de profunditat, on es pot observar com nuclea un sistema de cisalla conjugat amb una estructura general de *pinch-and-swell*.

Igual que en l'experiment 19.01.b en els estadis finals es comença a intuir la nucleació de zones de cisalla, que podem observar i estudiar millor a través dels escàners a diferents profunditats (Figura 14), donant lloc a un sistema de falles conjugades, on domina la família antitètica a la rotació de les capes.

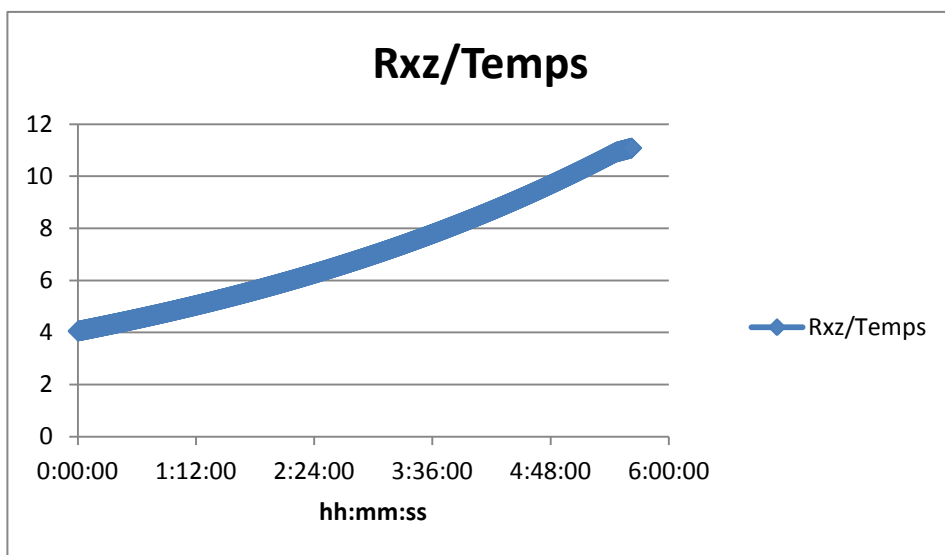
En la figura 14 es pot observar una estructura a escala de tot el model de *pinch-and-swell*, amb una zona de *pinch* central i un *swell* a cada banda, associat a al desenvolupament de zones de cisalla.



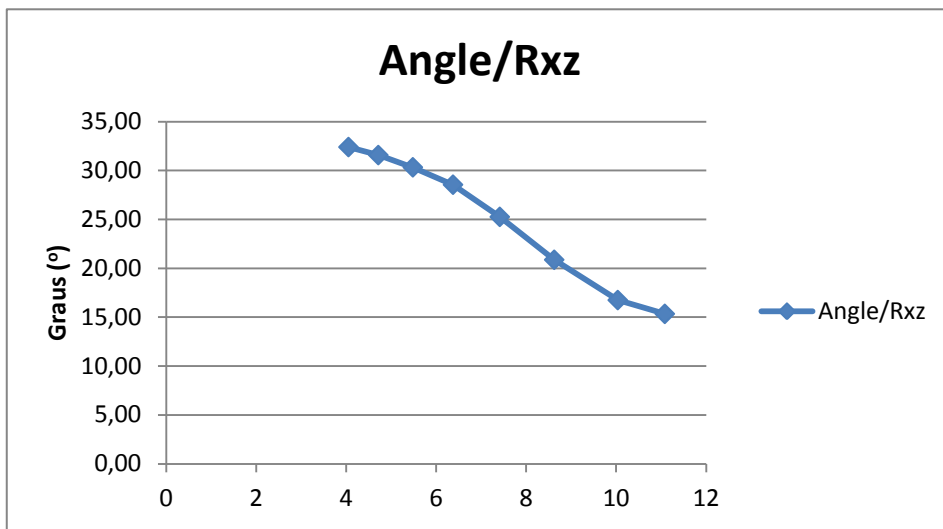
Gràfic 13. Gràfic on es relaciona el *slip* amb la Rxz.



Gràfic 14. Gràfic on es relaciona la R interna amb la Rxz.



Gràfic 15. Gràfic on es relaciona la Rxz amb el temps.



Gràfic 16. Gràfic on es relaciona l'angle amb la Rxz.

4.- Conclusions.

La deformació en sistemes multicapa es particiona de la manera següent, sempre i quan l'anisotropia sigui obliqua als eixos de deformació:

- **Rotació de capes global** (o cos rígid), on les capes roten cap a una posició paral·lela a l'eix X (extensió).
- **Slip** (lliscament) és antitètic respecte a la rotació de les capes i paral·lel a elles o en interfície (entre capes). Aquest lliscament seria el que hem estat anomenant lliscament de vora al llarg del treball i que va en augment a mesura que augmenta l'escurçament global.
- **Flow** (*slip* intern) que és un cisallament paral·lel a les capes, però al seu interior.
- **R interna** (deformació interna). Es pot observar com existeix un gradient poc marcat de les capes competents, amb menys deformació interna, a les capes incompetents que en tenen més.
- Formació de **cisalla obliqua** donant lloc a sistemes conjugats de cisalles. La temperatura juga un paper important en la formació de cisalla, degut a que a més temperatura més dúctilment es comporten i més difícil es fa la seva nucleació. En canvi tinguéssim fractures les zones de cisalla s'acomodarien en elles.

La proporció en que apareixen les estructures explicades anteriorment dependrà de l'angle de les capes respecte als eixos de deformació:

- Per angles elevats (60°) la rotació de les capes porta associat un lliscament de vora ja que es situa més a prop de la zona de màxima cisalla (45°), que és l'angle més favorable a la formació de lliscament entre capes, mentre que per angles més petits (30°) s'afavoreix més a l'aixafament (*slip* intern) per sobre de la cisalla, tot i que també es forma lliscament de vora, encara que és globalment més elevat en el de 60° . És precís valorar que en la majoria de situacions al camp no tenim marcadors, com la quadrícula que ens permeti observar i estudiar amb comoditat aquest desplaçament, com per exemple la figura 2.
- Les capes a mesura que va augmentant l'escurçament es van aprimant, sobretot les incompetents. També hi ha un aprimament major a l'experiment de 30° degut a que les capes poden rotar menys, mentre que al de 60° les capes estan menys aprimades per que tenen més espai per rotar.
- La R interna és major al model de 30° degut a que hi ha més deformació interna de les capes incompetents, sobretot, aprimant-se ja que la rotació és menor que en el model de 60° .

- La cisalla obliqua es troba poc localitzada. Per a l'experiment de 30° s'inicia un primer sistema conjugat, més o menys bisectat respecte l'eix Z (escurçament). Degut al alt grau de ductilitat es fa difícil apreciar quan s'inicia la nucleació de les zones de cisalla, degut a la temperatura a la que s'han realitzat els experiments (28°C). En altres experiments realitzats amb anterioritat com els de Gómez-Rivas i Griera, 2012 si que es nucleen zones de cisalla de forma fràgil-dúctil degut a que les condicions de temperatura eren inferiors, situant-se al voltant dels 25°C. Pel que fa al model de 60° s'observa un sistema conjugat també, però on domina la família antitètica a la rotació de les capes. En tots dos experiments es poden observar en els estadis finals de les segones deformacions (Figura 14).

5.- Agraïments.

Per finalitzar el treball m'agradaria agrair als meus tutors, Jordi Carreras i Elena Druguet, la seva inestimable ajuda i dedicació alhora de guiar-me en la realització del treball. També m'agradaria donar gràcies a tots aquells familiars i amics que m'han donat suport durant la realització d'aquest treball.

6.- Bibliografia.

- Biot, M.A. 1965. Mechanics of incremental deformations. Wiley, New York.
- Carreras, J. 2001. Zooming on Northern Cap de Creus shear zones. *Journal of Structural Geology* 23, 1457-1486.
- Carreras, J. I Druguet, E. 2013. Illustrated field guide to the geology of Cap de Creus. Publicacions Universitat Autònoma de Barcelona.
- Castaño, L.M. 2010, Emplazamiento y deformación de venas y diques magmáticos en cinturones tectonometamórficos: Análisis a partir de estudios de campo y modelización analógica. Tesis doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona, 275 p.
- Folch i Guillén, R. 1986. Enciclopèdia de la Història Natural dels Països Catalans 1. Geologia I. Enciclopèdia Catalana.
- Gomez-Rivas, E. 2008. Localización de deformación en medios dúctiles y anisótropos: estudio de campo, experimental y numérico. Tesis doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona.
- Gomez-Rivas, E. and Griera, A. 2012. Shear fractures in anisotropic ductile materials: an experimental approach. *Journal of Structural Geology*, 34, 61-76.
- Kidan, T.W. and Cosgrove, J.W. 1996. The deformation of multilayers by layer normal compression; An experimental investigation. *Journal of Structural Geology* 18, 461-474.
- Price, N.J. and Cosgrove, J.W. 1990. Analysis of Geological Structures. Cambridge University Press.
- Treagus, S.H. 1998. Strain refractions in layered systems. *Journal of Structural Geology* 10, 517-527.