

## Treball final de grau

**Estudi:** Grau en Arquitectura Tècnica

**Títol:** Proposta de un nou assaig in-situ per a murs de fàbrica sotmesos a compressió

**Document:** Memòria

**Alumne:** Francisco Mármol Casado

**Tutor:** Miquel Llorens Sulivera

**Departament:** Enginyeria Mecànica i de la construcció industrial

**Àrea:** Mecànica de medis continus i teoria de les estructures

**Convocatòria (mes/any):** Setembre de 2018

# ÍNDEX

<b>1. INTRODUCCIÓ</b>	<b>1</b>
<b>1.1. MARC HISTÒRIC DE L'OBRA DE FÀBRICA</b>	<b>1</b>
<b>1.2. ÀMBIT NORMATIU</b>	<b>2</b>
<b>1.3. OBJECTIUS</b>	<b>3</b>
1.3.1. OBJECTIUS GENERALS	3
1.3.2. OBJECTIUS ESPECÍFICS	3
<b>2. CONEIXEMENT ACTUAL</b>	<b>4</b>
<b>2.1. INTRODUCCIÓ</b>	<b>4</b>
<b>2.2. ELEMENTS L'OBRA DE FÀBRICA</b>	<b>5</b>
2.2.1.1. PECES	5
2.2.2. MORTERS	8
2.2.3. INTERFÍCIE	10
<b>2.3. COMPORTAMENT DE LA OBRA DE FÀBRICA</b>	<b>12</b>
2.3.1. INTRODUCCIÓ	12
2.3.2. COMPORTAMENT SOBRE COMPRESSIÓ UNIAXIAL	12
<b>2.4. CTE DB SE-F. SEGURETAT ESTRUCTURAL: FÀBRICA</b>	<b>18</b>
2.4.1. INTRODUCCIÓ	18
2.4.2. MATERIALS	18
2.4.3. COMPORTAMENT ESTRUCTURAL	19
2.4.4. EXECUCIÓ	21
2.4.5. VALORS DE RESISTÈNCIA CARACTERÍSTICA A COMPRESSIÓ	23
<b>3. MODELITZACIÓ DELS ELEMENTS DE L'OBRA DE FÀBRICA</b>	<b>24</b>
<b>3.1. MICROMODELITZACIÓ</b>	<b>25</b>

<b>4. CAMPANYA EXPERIMENTAL</b>	<b>26</b>
<b>4.1. PROPOSITS</b>	<b>26</b>
4.1.1. PROVETES D'ASSAIG A LABORATORI	26
4.1.2. MURS D'ASSAIG IN-SITU	28
<b>4.2. PRIMERS TANTEJOS</b>	<b>31</b>
<b>4.3. MATERIALS</b>	<b>38</b>
4.3.1. PECES	38
4.3.2. MORTER	44
<b>4.4. CONSTRUCCIÓ DE PROVETES I MURS</b>	<b>49</b>
<b>4.5. MODELITZACIÓ AMB ANSYS</b>	<b>57</b>
<b>4.6. INSTRUMENTACIÓ</b>	<b>68</b>
<b>5. RESULTATS</b>	<b>74</b>
<b>5.1. PROVETA D'OBRA DE FÀBRICA 01</b>	<b>74</b>
<b>5.2. PROVETA D'OBRA DE FÀBRICA 02</b>	<b>78</b>
<b>5.3. PROVETA D'OBRA DE FÀBRICA 03</b>	<b>84</b>
<b>5.4. MUR 01</b>	<b>89</b>
<b>5.5. MUR 02</b>	<b>92</b>
5.5.1. TRANSDUCTORS DE DESPLAÇAMENT	95
<b>5.6. MUR 03</b>	<b>99</b>
5.6.1. TRANSDUCTORS DE DESPLAÇAMENT	102
5.6.2. GALGUES EXTENSOMÈTRIQUES	104
5.6.3. ROSETES EXTENSOMÈTRIQUES	106
5.6.4. COMPARACÓ DELS RESULTATS	142
<b>6. CONCLUSIONS</b>	<b>144</b>
<b>6.1. CONCLUSIONS DEL PROJECTE</b>	<b>144</b>
<b>6.2. PROPOSTES PER A FUTURS DESENVOLUPAMENTS</b>	<b>145</b>
<b>7. REFERÈNCIA BIBLIOGRÀFICA</b>	<b>146</b>
<b>7.1. NORMATIVA APLICABLE</b>	<b>146</b>
<b>7.2. ARTICLES</b>	<b>146</b>
<b>7.3. DOCUMENTS</b>	<b>147</b>
<b>7.4. LLIBRES</b>	<b>147</b>

## 1. INTRODUCCIÓ

### 1.1. MARC HISTÒRIC DE L'OBRA DE FÀBRICA

La utilització de l'obra de fàbrica en la construcció ha estat vigent al llarg de la història. De fet, la fàbrica és el material de construcció més antic que encara segueix tenint un ampli ús, dominant en la construcció des dels orígens de la civilització fins que, a mitjans del segle XIX, van aparèixer nous materials, com l'acer i el formigó armat, que van provocar una lenta decadència del seu ús, i finalment a principis del segle XX va deixar de ser tan rellevant en la construcció.

La construcció de l'obra de fàbrica consisteix en la superposició de blocs o maons, podent ser de pedra, de morter o de ceràmica, travades unes amb les altres, ja sigui amb junta seca o amb un lligant com el morter.

El seu ús tan popular es basa en la facilitat de la seva construcció, i en l'abundància dels seus materials. Tot i els nous desenvolupaments en obra, les tècniques per unir els maons segueixen sent els mateixos des de fa segles. La característica principal és la seva simplicitat i la durabilitat de les construccions.

Malgrat la simplicitat associada a les estructures realitzades amb obra de fàbrica, el comportament mecànic de la construcció de maçoneria continua sent un veritable desafiament, ja que les seves propietats mecàniques bàsiques estan fortament influenciades per les propietats mecàniques dels components que la formen, és a dir, maó i morter.

A dia d'avui, la maçoneria com a element estructural es veu frenat pel fet de no tenir unes regles tan precises com les obtingudes per altres materials, com el formigó i l'acer. Tot això ve donat per la falta de comprensió del comportament de maons, morter i juntes com un material compost.

Com a conseqüència, pocs recursos s'han posat en la investigació de maçoneria estructural, els codis actuals de la pràctica no estan prou desenvolupats i hi ha una manca de coneixement sobre el comportament d'aquest material compost.

### 1.2. ÀMBIT NORMATIU

Anteriorment, el món de l'estructura de fàbrica es regia a Espanya per la Norma NBE-FL-90 "*Muros resistentes de Fábrica de Ladrillo*", que actualitzava i feia una lleugera correcció de l'anterior MV-201-1972, que té origen en el plec PIET 70 "Prescripciones del Instituto Eduardo Torroja".

L'aparició l'any 1997 de l'Eurocodi d'estructures de fàbrica, desenvolupa un mètode de càlcul de murs resistents diferent al de la NBE-FL-90.

El 2006 va entrar en vigor el conjunt de normatives que regulen la construcció d'edificis a Espanya, anomenat *Código Técnico de la Edificación* (CTE). Dins aquest conjunt de normatives, existeix el document "*Documento Básico SE-F, Seguridad estructural: Fábrica*", el qual esta destinat a la verificació de la seguretat estructural dels murs d'obra de fàbrica.

En aquest projecte, que intenta donar una proposta a un nou assaig in situ per a murs de fàbrica sotmesos a compressió, es regeix per les pautes de càlcul de murs resistents que conté la normativa actual del CTE-BD-SE-F, *Seguridad estructural: Fábrica*, per tal de fer un estudi comparatiu de la resistència d'aquesta entre assajant-la en forma de proveta a laboratori i assajant-la in situ en la pròpia obra.

Per la construcció de provetes d'obra de fàbrica s'ha posat emprat la norma "UNE-EN 1052-1. *Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión*". Aquesta norma té com objectiu determinar les característiques de les provetes, la descripció del mètode d'assaig, els seu model de càlcul i el contingut que ha d'incloure l'acta de l'assaig.

### **1.3. OBJECTIUS**

#### **1.3.1. OBJECTIUS GENERALS**

Els assajos a compressió de la fàbrica estan regulats per la norma UNE-EN 1052-1. Aquesta norma és de difícil aplicació, ja que per realitzar aquests assajos s'han d'extreure les provetes a partir de talls al mur del mateix edifici. El transport d'aquestes provetes és delicat, ja que les mostres poden arribar al laboratori amb greus desperfectes quedant llavors afectats els resultats obtinguts.

L'objecte d'aquest projecte és elaborar un nou mètode per poder assajar la resistència a compressió dels murs de fàbrica in situ, de tal forma que es puguin evitar els possibles danys que pot estar sotmès l'obra de fàbrica durant el seu transport a laboratori.

També es vol entendre com es comporten i es reparteixen les tensions en el mur de fàbrica a assajar a l'hora que aquest està sotmès a esforços.

La hipòtesi inicial respecte la que és desenvolupa el treball és realitza amb la modelització del mur amb el programa ANSYS.

#### **1.3.2. OBJECTIUS ESPECÍFICS**

L'abast del projecte pretén:

- Realitzar una lectura acurada sobre els assajos a compressió uniaxial de la fàbrica i la normativa vigent (Código Técnico de la Edificación, Documento Básico, Seguridad Estructural: Fábrica)
- Entendre les variables que governen el comportament dels murs d'obra de fàbrica.
- Fer models numèrics com a tècnica de pretest.
- Dissenyar i muntar el banc de proves per fer l'assaig.
- Realitzar diverses provetes, per assajar i poder comparar el mètode proposat amb el normatiu
- Recollir els resultats i redactar les conclusions de l'estudi realitzat.

## **2. CONEIXEMENT ACTUAL**

### **2.1. INTRODUCCIÓ**

Els murs en obra de fàbrica són elements encarregats de complir una funció resistent. Aquests poden presentar-se com elements estructurals que suporten principalment càrregues verticals, però també poden servir per resistir càrregues horitzontals. Quan un edifici construït amb fàbrica estructural està sotmès a càrregues en el pla i fora del pla, produïdes per un terratrèmol, els murs són els elements estructurals que asseguren l'estabilitat global de l'edifici. Això vol dir que les parets han de tenir propietats mecàniques adequades que els permetin resistir diferents combinacions d'esforços compressius, de cisallament i tensió.

En aquest capítol s'introdueix l'estat actual del coneixement sobre el comportament mecànic de l'obra de fàbrica sotmesa a esforços de compressió uniaxial, analitzant les propietats dels seus elements de forma individual, els diferents mecanismes de trencament a compressió, els diversos models analítics proposats i la normativa del CTE referent a la compressió.

En aquest treball només es contempla que les provetes que s'assajaran, treballin amb càrregues uniaxials. Per tant, en aquest capítol no es descriu el comportament per càrregues biaxials.

## 2.2. ELEMENTS L'OBRA DE FÀBRICA

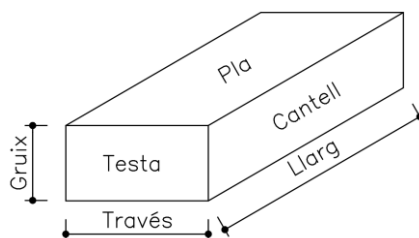
L'obra de fàbrica és un material heterogeni, format per la disposició de peces o blocs lligats entre si per mitjà d'algun material d'unió, com ara el morter, formant així un conjunt estructural resistent. No obstant això al llarg de la història moltes construccions amb obra de fàbrica s'han elaborat només amb la superposició i disposició adequada de peces, sense necessitat d'utilitzar cap material lligant.

Per a conèixer el comportament de l'obra de fàbrica sota un estat de càrrega uniaxial a compressió, cal partir del coneixement dels elements que la componen i les seves respectives característiques mecàniques. Els elements que la componen són les peces, el morter i la interfície que uneix ambdós materials.

### 2.2.1.1. PECES

#### 2.2.1.2. Geometria

L'obra de fàbrica està constituïda per peces que poden ser ceràmiques, blocs de morter, pedres, entre d'altres. En aquest projecte s'utilitzen maons massissos ceràmics, definits en l'apartat 4.3.1. Per regular la seva descripció geomètrica pel que fa a dimensions i cares, s'utilitza la nomenclatura utilitzada en imatge 001:



**Imatge 001.** Nomenclatura per a les dimensions i cares de les peces.

Les dimensions de les peces poden ser molt variables, encara que les mides dels maons ceràmics solen tenir les següents mides aproximades:

- El través ha de permetre agafar el maó amb una sola mà, això fa que aquest valor oscil·li entre els 10 i 16 cm.
- El llarg, per motius d'aparell, sol ser el doble del través més el gruix normal d'una junta (21 a 33 cm).
- El gruix és el valor més lliure. Generalment els seus límits són deguts a raons estètiques o de fabricació (entre els 3 i 10 cm).



**2.2.1.3. Propietats mecàniques**

Les propietats mecàniques depenen essencialment de la naturalesa de les peces però també, en el cas de construccions històriques, de l'acció del temps sobre elles.

Les propietats mecàniques més rellevants de les peces consisteixen en la resistència a la compressió, el mòdul de deformació elàstic, la resistència a la tracció i la densitat. El comportament mecànic de l'obra de fàbrica depèn molt de les propietats mecàniques de les peces.

La resistència a compressió de les peces es pot veure com una mesura de la seva qualitat i és important per predir la resistència a la compressió del conjunt de l'obra de fàbrica.

A continuació, es procedeix a descriure les propietats esmentades de les peces:

**a) Pes específic  $\gamma_b$**

Dins de l'anàlisi estructural, el pes específic determina la majoria de les càrregues gravitatòries, les quals suposen la major sol·licitació en estructures. Segons el catàleg d'elements constructius del CTE, la densitat dels maons ceràmics massissos (LM) és de 2.300 Kg/m<sup>3</sup>.

Productos cerámicos				
Producto	HE			
	$\rho$ kg / m <sup>3</sup>	$\lambda$ W/m·K	$C_p$ J / kg·K	$\mu$
Azulejo cerámico	2300	1,30	840	$\infty$
Bloque cerámico de arcilla aligerada	910	0,28	1000	10
Bovedilla o casetón cerámico	500	0,67	1000	10
Ladrillo hueco LH	770	0,32	1000	10
Ladrillo hueco gran formato GF	650	0,29	1000	10
Ladrillo perforado LP	780	0,35	1000	10
Ladrillo macizo LM	2300	0,85	1000	10
Plaqueta o baldosa cerámica	2000	1,00	800	30
Plaqueta o baldosa de gres	2500	2,30	1000	30
Tablero cerámico	650	0,29	1000	10
Teja de arcilla cocida	2000	1,00	800	30
Teja cerámica-porcelana	2300	1,30	840	30
<b>Gres</b>				
Gres cuarzoso	2600 $\leq \rho \leq$ 2800	2,60	1000	30
Gres(sílíce)	2200 $\leq \rho \leq$ 2590	2,30	1000	30
Gres calcáreo	2000 $\leq \rho \leq$ 2700	1,90	1000	20

Taula 001. Característiques de la ceràmica, segons el catàleg d'elements constructius del CTE.

**b) Resistència a compressió  $f_b$**

La resistència a compressió dels maons depèn fonamentalment de la seva composició i del procés de cocció.

La falla mecànica dels materials ceràmics es dona principalment per defectes estructurals. Les causes principals de la fractura en peces ceràmiques són degudes a les esquerdes superficials produïdes durant els processos de conformació i acabat, porus, inclusions i

estructures de grans grans formats durant el procés de cocció, que actuen com a concentradors de tensions fent fràgil al material.

Quan la tensió al voltant d'un porus arriba a un valor crític, es forma un inici d'esquerda que es propaga ràpidament pel material. Els porus també actuen minvant la resistència del material en disminuir la secció útil del mateix i per tant disminueix la tensió que és capaç de suportar aquest. Així, la mida i la fracció en volum dels porus en les ceràmiques són factors importants que afecten a la seva resistència.

La resistència a compressió es calcula a partir de la zona carregada, que és l'àrea bruta, "llarg" x "través" de la peça. En general, s'obté un valor mitjà dels resultats experimentals, fent possible calcular el valor de la resistència a compressió de les peces,  $f_b$ .

### **c) Resistència a tracció $f_{tb}$**

La poca capacitat per a resistir tensions de tracció és una característica de la fàbrica. No obstant això, la falta de resistència a tracció de l'obra de fàbrica com a material compost, no implica que els seus materials constituents no posseeixin aquesta propietat mecànica.

Els materials ceràmics mostren grans diferències entre la resistència a tracció i a compressió, sent la resistència a tracció entre 0,10 i 0,30 vegades la resistència a compressió.

### **d) Mòdul de deformació longitudinal $E_b$**

El mòdul d'elasticitat longitudinal és un paràmetre que caracteritza el comportament d'un material elàstic, segons la direcció en la qual s'aplica una força.

La deformabilitat de la fàbrica com a material compost es deu en gran part al seu component menys rígid, el morter. De totes maneres és interessant conèixer el mòdul d'elasticitat de les peces ja que la relació de rigideses entre peces i morter és un paràmetre que determina el comportament de l'obra de fàbrica com a material compost. En la taula 002, realitzada per "ATCP Ingeniería Física" es poden observar els valors del mòdul d'elasticitat de diferents components ceràmics.

Material	Módulo de elasticidad		Coeficiente de Poisson
	GPa	10 <sup>6</sup> psi	
<b>Cerámicas y materiales semiconductores</b>			
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) 99,9%:	380	55	0,22
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) 96%:	303	44	0,21
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) 90%:	275	40	0,22
Zirconia (3% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ):	205	30	0,31
Carbeto de silicio sinterizado:	207-483	30-70	0,16
Carbeto de silicio prensado caliente:	207-483	30-70	0,17
Sílica fundida:	73	10,6	0,17
Silicio monocristal(100):	129	18,7	0,28
Silicio monocristal (110):	168	24,4	-
Silicio monocristal (111):	187	27,1	0,36
Nitrato de silicio colado por reacci3n:	304	44,1	0,22
Nitrato de silicio prensado caliente:	304	44,1	0,30
Nitro de silicio sinterizado:	304	44,1	0,28
Diamante natural:	700-1200	102-174	0,10-0,30
Diamante sint3tico:	800-925	116-134	0,20

**Taula 002.** M3dul d'elasticitat i coeficient de Poisson de diferents components, realitzada per *ATCP Ingeniería Física*.

Les propietats dels materials estan expressats en valors aproximats on poden variar significativament en funció del processament i de la qualitat del material.

### e) Coeficient de Poisson $\mu_b$

Aquest paràmetre deformacional influeix en la deformabilitat relativa i apareix nominalment en certs models analítics del comportament de l'obra de fàbrica. En la taula 002, es poden observar els coeficients de Poisson aproximats de diferents materials ceràmics.

## 2.2.2. MORTERS

### 2.2.2.1. Característiques

El morter és un material que presenta un comportament perfectament plàstic en el moment de la seva col·locació, enduriment a les poques hores i que adquireix rigidesa i resistència al llarg del temps. Les seves funcions principals en la maçoneria son:

- Omplir les juntes impedit el pas de l'aigua.
- Regularitzar el seient entre les peces i repartir uniformement les càrregues.

El morter té una funció molt important en la transferència d'esforç entre les peces quan es carrega el conjunt, evitant concentracions de tensions que poden donar lloc al col·lapse prematur de la maçoneria. El morter també té el paper de reduir les irregularitats de les peces i acomodar les deformacions associades a l'expansió tèrmica i la contracció.

El morter es un compost d'àrids fins, un conglomerant inorgànic, que fa la funció de lligant, i aigua. El morter és el component més feble de l'obra de fàbrica, el menys rígid, responsable de la major part de la deformació instantània i pràcticament tota la deformació diferida. En aquest projecte s'utilitza el morter de calç, definit en l'apartat 4.3.1.

### 2.2.2.2. Propietats mecàniques

El morter, dins de la fàbrica es troba sotmès a un estat tensional triaxial. Per això cal que en estudiar les seves propietats mecàniques, això es faci sota un estat triaxial per poder entendre el seu comportament en estat de servei i en condicions uniaxials o d'absència de coacció lateral.

#### a) Pes específic $\gamma_m$

Segons el catàleg d'elements constructius del CTE, la densitat del morter de calç col·locat in situ es considera de 1900Kg/m<sup>3</sup>.

Morteros				
Material	HE			
	$\rho$ kg / m <sup>3</sup>	$\lambda$ W / m·K	$C_p$ J / kg·K	$\mu$
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco o enlucido <sup>(1)(2)</sup>	$\rho > 2000$	1,80	1000	10
	$1800 < \rho \leq 2000$	1,30	1000	10
	$1600 < \rho \leq 1800$	1,00	1000	10
	$1450 < \rho \leq 1600$	0,80	1000	10
	$1250 < \rho \leq 1450$	0,70	1000	10
	$1000 < \rho \leq 1250$	0,55	1000	10
	$750 < \rho \leq 1000$	0,40	1000	10
	$500 < \rho \leq 750$	0,30	1000	10
Mortero de áridos ligeros (vermiculita, perlita) <sup>(2)</sup>	$\rho \leq 1000$	0,41	1000	10
Mortero de yeso	$\rho \leq 1600$	0,80	1000	6

<sup>(1)</sup> Para el mortero colocado "in situ" se considera una densidad de 1900 kg/m<sup>3</sup>

<sup>(2)</sup> Los valores de diseño anotados corresponden a un percentil del 90% y provienen de los valores declarados obtenidos según la norma UNE EN 1745:2002 y corregidos según los criterios de la norma UNE EN 12524:2000, con factor de corrección de humedad, Fm, igual a 1,17.

Taula 003. Característiques del morter, segons el catàleg d'elements constructius del CTE.

#### b) Resistència a compressió $f_m$

La resistència a compressió del morter està sempre referida a provetes de mida petita, i s'entén com a resistència del morter no confinat, però tal resistència no és identificable amb la resistència del morter a la fàbrica sinó que és un índex de qualitat d'aquest que pot ser utilitzat com a paràmetre en algunes fórmules empíriques.

La resistència a compressió del morter també s'utilitza com a indicador de la qualitat de la mà d'obra, sent comú prendre algunes mostres de morter durant la construcció per a realitzar assajos i comparar amb la resistència a compressió requerida.

**c) Mòdul de deformació longitudinal  $E_m$** 

En el Codi UIC-778/3 (Union Internationale des Chemins de fer) "Recomanacions per a la inspecció, avaluació i manteniment de ponts d'arc de maçoneria"(1995), podem trobar valors orientatius per al mòdul d'elasticitat dels morters, descrits en la taula 004.

Tipo de mortero	$E_m$ (N/mm <sup>2</sup> )
De cal aèrea	400 – 1,000
De cal hidràulica	1,000 – 2,000
De cemento y cal	2,000 – 6,000
De cemento	6,000 – 10,000

**Taula 004.** Mòdul de deformació longitudinal dels morters.

**d) Coeficient de Poisson  $\mu_m$** 

El coeficient de Poisson del morter en l'obra de fàbrica depèn de l'estat tensional. Com a referència es sol prendre un valor de  $\mu_m$  de 0,20.

**2.2.3. INTERFÍCIE**

El vincle d'unió entre el morter i les peces es desenvolupa a través de la fixació mecànica resultant de la seva adherència. Aquesta adherència pot venir provocada, en certa mesura, també per una fixació química.

Son diversos factors els que influeixen en la unió entre el morter i les peces, com ara les propietats de les peces, el tipus de morter utilitzat, la relació aigua-ciment, la mà d'obra a l'hora de la construcció, la treballabilitat del morter i les condicions del curat entre d'altres.

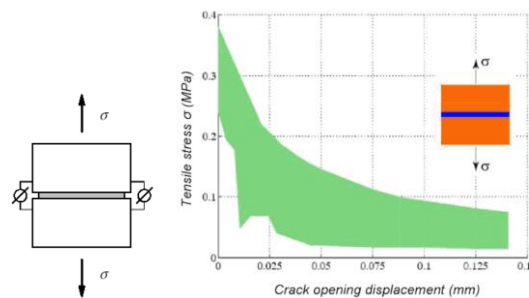
La unió de les peces i el morter és sovint l'element més feble. El comportament no lineal de les juntes, el qual és controlat per la unió peça-morter, és una de les característiques més importants del comportament de l'obra de fàbrica. Dos fenòmens diferents caracteritzen el comportament d'unió de les peces amb el morter:

- La falla a tracció (mode I). S'associa amb tensions que actuen de forma normal a les unions i condueixen a la separació dels elements.
- La falla a tallant (mode II). Correspon a un mecanisme lliscant de les peces o falla a tallant de la junta de morter.

**2.2.3.1. Mode I de falla, a tracció**

Van der Pluijm<sup>1</sup> va realitzar assajos de deformació sobre mostres d'obra de fàbrica. Les proves experimentals realitzades mostren una gràfica amb una corba exponencial per al reblaniment per tracció amb energia de fractura, com a conseqüència d'una unió de petites esquerdes que acaben formant una gran esquerda.

Van der Pluijm ha observat que no existeix una correlació clara entre la força d'adherència i l'energia de la fractura, però l'augment de la força de l'adherència sempre s'associa amb l'augment de l'energia de fractura. El mode de falla depèn principalment de la qualitat del morter, la qualitat de la unió entre ambdós materials i de la superfície de connexió real entre les peces i el morter.

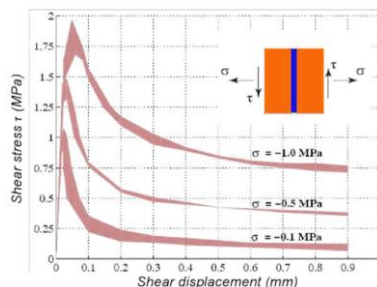


**Imatges 002 i 003.** 002- Mostra d'assaig de les proves experimentals de Pluijm  
 003- Diagrama de tensions a tracció-desplaçament en la unió de les peces amb el morter.  
 L'àrea ombrejada representa els valors trobats sobre tres proves realitzades per Van der Pluijm.

**2.2.3.2. Mode II de falla, a tallant**

El mode II representa el fall per tensions tallants per a la interfície peça-morter i té una gran influència en el comportament de l'obra de fàbrica .L'augment de la compressió normal a la unió de les peces amb el morter de les juntes condueix a un augment de la resistència al tallant.

Els resultats de la prova a tallant obtinguts per van der Pluijm es mostren una gran semblança amb el comportament sota tensions a tracció, com es pot observar en la imatge 004, excepte que la corba de reblaniment no es redueix a zero, sinó que es manté estable amb una certa tensió al tallant. Aquest nivell de tensió correspon a la fricció de les dues superfícies sense cohesió.



**Imatge 004.** Diagrames de diferents proves de tensions a tallant-desplaçament en la unió de les peces amb el morter en el mode de falla II, realitzades per Van der Pluijm.

<sup>1</sup> Van der Pluijm, R. (1992). Material properties of masonry and its components under tension and shear, in: Proc. 6th Canadian Masonry Symposium, eds. V.V. Neis, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, p. 675-686.

## 2.3. COMPORTAMENT DE LA OBRA DE FÀBRICA

### 2.3.1. INTRODUCCIÓ

La quasi totalitat d'estructures que utilitzen com a material l'obra de fàbrica es troben sol·licitades per un estat de tensions principalment de compressió.

Els mètodes de càlcul es basen en models que utilitzen una força compressiva uniaxial en la qual les tensions de l'obra de fàbrica es determinen pel seu comportament triaxial, com es pot veure en la imatge 005. Les fórmules de càlcul disponibles només es poden aplicar quan les propietats de deformació del morter són més grans que les peces.

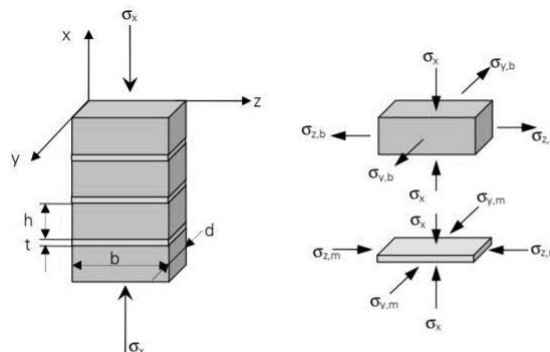
### 2.3.2. COMPORTAMENT SOBRE COMPRESSIÓ UNIAXIAL

L'estat de compressió uniaxial és el cas més desenvolupat en l'àrea en la recerca per establir una relació directa entre la resistència a compressió d'obra de fàbrica com a conjunt amb les propietats dels materials que formen part. Com a base principal s'ha acceptat que la diferència de les característiques a la deformació entre les peces i el morter, sent molt més rígida la primera, són el fet principal de la decisió.

El treball fonamental sobre el model de comportament de l'obra de fàbrica sota compressió va ser realitzat per Hilsdorf<sup>2</sup>, qui va introduir en les seves fórmules la fricció entre el morter i les peces durant la fallada de compressió a causa de la deformació del morter.

#### 2.3.2.1. Hildorf.

Els primers treballs sobre models de falla a compressió de fàbrica van assenyalar que les diferents deformacions de les peces i el morter, tenen una influència significativa en la resistència a la tracció transversal de la maçoneria.



**Imatge 005.** Estat de tensions en la peça i en el morter que componen l'obra de fàbrica, quan es troba sotmesa.

<sup>2</sup> Hilsdorf H. K. (1969). Investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression. Proc. Int. Conf. on Masonry Structural Systems. Texas, pp. 34-41

Hilsdorf va formular l'estat de tensions i deformació a partir d'equacions de elasticitat. La solució proposada es va obtenir considerant un prisma de maó-morter subjecta a una tensió axial compressiva  $\sigma_x$  com es mostra a la imatge 005. Les relacions entre les tensions i deformacions es poden obtenir a partir de la llei de Hooke per a les peces i el morter:

- Peces:

$$\varepsilon_{y,b} = \frac{1}{E_b} [\sigma_{y,b} + \mu_b(\sigma_x - \sigma_{z,b})]$$

$$\varepsilon_{z,b} = \frac{1}{E_b} [\sigma_{z,b} + \mu_b(\sigma_x - \sigma_{y,b})]$$

- Morter

$$\varepsilon_{y,m} = \frac{1}{E_m} [-\sigma_{y,m} + \mu_m(\sigma_x - \sigma_{z,m})]$$

$$\varepsilon_{z,m} = \frac{1}{E_m} [-\sigma_{z,m} + \mu_m(\sigma_x - \sigma_{y,m})]$$

On:

$E_b, E_m$	Els mòduls elàstics de les peces i morter.
$\mu_b, \mu_m$	El coeficient de Poisson de les peces i morter.
$\sigma_{y,b}, \sigma_{z,b}$	Les tensions laterals en les peces.
$\sigma_{y,m}, \sigma_{z,m}$	Les tensions laterals en el morter.
$\sigma_x$	Les tensions verticals a compressió.

Les equacions de la elasticitat mostren que, la compressió vertical de la peça produeix tensions de tracció laterals a causa de l'efecte de Poisson. Per dur a terme l'equilibri, la força a tracció lateral total resultant en la peça ha de ser igual a la força de compressió lateral del morter:

$$t \cdot \sigma_{y,m} = h \cdot \sigma_{y,b}$$

$$t \cdot \sigma_{z,m} = h \cdot \sigma_{z,b}$$

On:

$t$	El gruix de la junta de morter.
$h$	El gruix de la peça.

Utilitzant les fórmules anteriors, les tensions laterals es poden obtenir de la equació:

$$\sigma_L = \sigma_{y,b} = \sigma_{z,b} = \frac{\frac{E_b}{E_m} \cdot \mu_m - \mu_b}{\frac{h}{t} \cdot \frac{E_b}{E_m} (1 - \mu_m) + (1 - \mu_b)} \cdot \sigma_x$$



Les peces de la fàbrica estan tensionades de forma bidireccional. Aquestes poden fallar localment en forma de una esquerda vertical que pot aparèixer quan es compleix el criteri de falla segons Hilsdorf:

$$\frac{\sigma_L}{f_{bt}} + \frac{\sigma_x}{f_b} = 1$$

On:

$f_b$  La resistència a compressió de la peça.

$f_{bt}$  La resistència a tensió de la peça.

Aquest criteri de falla es representa per la línia A de la imatge 006. La línia B representa el desenvolupament de tensions internes a l'augment de la compressió externa.

El punt d'intersecció de la línia A i B fa referència al desenvolupament d'una esquerda local. No obstant això, aquest no és el punt de falla, la falla segons Hilsdorf pot ocórrer quan el maó ja no pot proporcionar la restricció biaxial necessària per evitar la falla del morter. Això es produirà quan la línia que defineix la força triaxial de la línia de morter C interseca la línia de falla de la peça.

La resistència a compressió del morter es pot incrementar augmentant les tensions de confinament. Per tant, la força triaxial del morter podria estar representada per una equació originalment obtinguda per al formigó:

$$\sigma_x = f_m + 4.10 \cdot \sigma_{y,m}$$

On:

$f_m$  La resistència a compressió uniaxial del morter

Considerant:

$$\sigma_{y,m} = \frac{h}{t} \cdot \sigma_{y,b} = \frac{h}{t} \cdot \sigma_L$$

Podem obtenir:

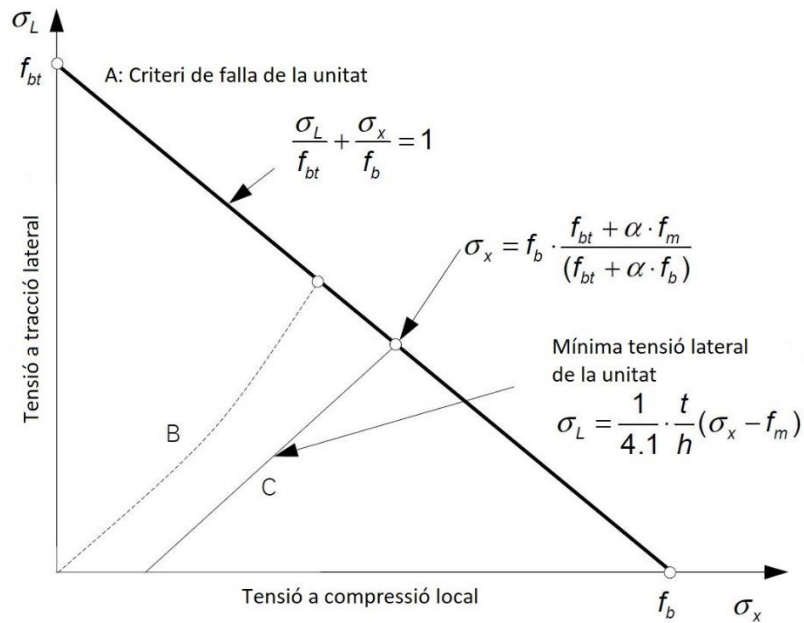
$$\sigma_L = \frac{1}{4.10} \cdot \frac{t}{h} (\sigma_x - f_m)$$

Aquesta fórmula representa la línia C. La magnitud de les tensions locals a la falla corresponen a la intersecció de les línies A i C. Aquesta intersecció es pot obtenir de la fórmula:

$$\sigma_x = f_b \cdot \frac{f_{bt} + \alpha \cdot f_m}{f_{bt} + \alpha \cdot f_b}$$

On:

$$\alpha = \frac{1}{4.10} \cdot \frac{t}{h}$$



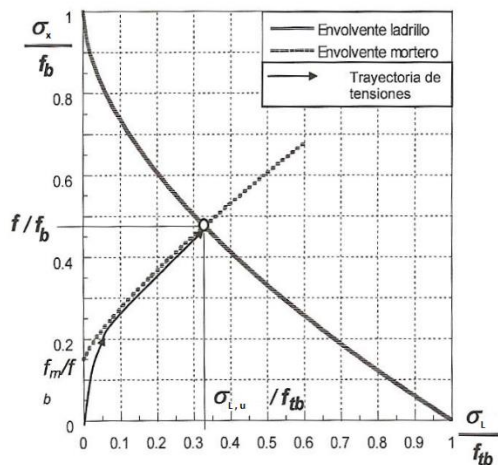
Imatge 006. Teoria de Hilsdorf sobre la falla a compressió de l'obra de fàbrica sota compressió.

### 2.3.2.2. Khoo i Hendry<sup>3</sup>

Posteriorment Khoo i Hendry van buscar millorar aquest criteri, i van establir que la resistència compressió-tracció de la peça es pot representar amb la següent relació:

$$\left(\frac{\sigma_x}{f_b}\right) + \left(\frac{\sigma_L}{f_{tb}}\right)^{0.546} = 1$$

En el seu treball realitzar van trobar que la ruptura de les peces era convexa cap a l'origen i considerablement diferent de la línia recta teòrica, assumida per Hilsdorf.



Imatge 007. Teoria de Khoo i Hendry sobre la falla a compressió de l'obra de fàbrica sota compressió.

<sup>3</sup> Khoo, C.L. & Hendry, A.W. (1973): A Failure Criterion for Brickwork in Axial Compression. In: Proc. of Third International Brick Masonry Conference, eds. L. Foertig and K. Gobel, Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie, Bonn: Essen, 139-145

Una causa de la desviació de les dades del model proposat per Hilsdorf contra les dades experimentals es trobava en què estava basat en un estat de tensions intern que no satisfà totes les condicions de contorn. Addicionalment, el model tampoc considerava la incidència de les juntes verticals.

Hendry i Khoo van investigar l'efecte de la força de compressió del morter sota pressió de confinament, trobant la relació:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_0} = 1 + 2,91 \cdot \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_0}\right)^{0,805}$$

On:

- $\sigma_1$  Major tensió principal
- $\sigma_z$  Menor tensió principal
- $\sigma_0$  Força a compressió uniaxial

### 2.3.2.3. Ohler<sup>4</sup>

Ohler va desenvolupar un treball amb el mateix enfocament que el realitzat per Khoo i Hendry, i va incloure algunes simplificacions numèriques que el van conduir a obtenir una expressió per a la resistència de la fàbrica, imatge 008:

$$f_k = f_m + \frac{af_b - f_m}{1 + \frac{b\alpha}{m} \cdot \frac{f_b}{f_{tb}}}$$

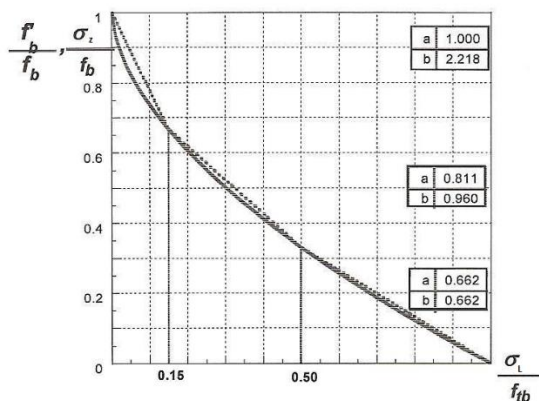
On:

- $f_k$  és la resistència a compressió de la fàbrica.
- $f_b$  és la resistència a compressió de la peça en assaig triaxial
- $f_m$  és la resistència a compressió del morter en assaig triaxial.
- $\alpha$  és la relació entre l'alt de la peça i el gruix de les juntes horitzontals.
- $a$  i  $b$  són els paràmetres de l'envolvent trilineal de Ohler per a la peça imatge 008
- $m$  el pendent de la envolvent de trencament del morter.

Amb aquesta fórmula sí que s'ha trobat bastant aproximació amb les dades experimentals obtingudes per fàbrica de maó.

---

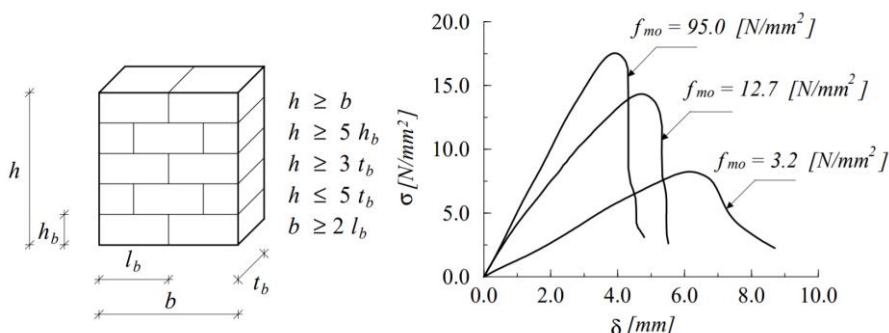
<sup>4</sup> Ohler, A. (1986). Determining the Compressive Strength of Masonry Taking Account of the Multiaxial Stress States in the Unit and Mortar. Bautechnik 63(5), pp. 163-169.



Imatge 008. Envolent de trencament de de Ohler. Un punt a la dreta de la corba representa trencament.

### 2.3.2.4. Wesche i Ilantzis<sup>5</sup>

L'assaig més acceptat per obtenir la resistència a compressió uniaxial de la fàbrica és l'assaig RILEM, descrit per Wesche i Ilantzis el 1980. Aquest assaig es realitza a partir de la proveta descrita en la imatge 009, on es poden veure les mides necessàries i alguns exemples d'aquest assaig



Imatges 009 i 010. 009- Representació esquemàtica de la proveta RILEM.  
010- Diagrames experimentals esforç-desplaçament

La norma UNE-EN 1052-1 “Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión”, es basa en l’assaig RILEM i en les mides que han de complir les provetes a assajar.

D'acord amb les observacions realitzades per Mann i Betzler;

- Inicialment apareixen fissures verticals en les peces al llarg de la línia mitjana de la proveta, continuat en una junta vertical.
- En un nivell superior d'increment de deformació apareixen fissures addicionals, generalment verticals i situades a la cara menor de la proveta, les quals porten a la falla per l'esquerdament del prisma.

<sup>5</sup> Wesche, K. y Ilantzis, A. (1980). General recommendations for methods of testing load bearing walls. Materials and Structures, RILEM, 13(78), pp. 433-445.

## 2.4. CTE DB SE-F. SEGURETAT ESTRUCTURAL: FÀBRICA

### 2.4.1. INTRODUCCIÓ

La normativa referent a la construcció dels murs d'obra de fàbrica és la CTE-DB-SE-F. El camp d'aplicació d'aquest document bàsic és el de la verificació de la seguretat estructural de murs resistents a l'edificació realitzats a partir de peces relativament petites, comparades amb les dimensions dels elements, assentades mitjançant morter, com ara fàbriques de maó, blocs de formigó i de ceràmica alleugerida, i fàbriques de pedra.

Per tant, a continuació s'exposa la documentació relativa a la compressió uniaxial dels elements de maçoneria.

### 2.4.2. MATERIALS

Aquest document bàsic, classifica les peces per a fàbrica en diferents grups en el seu apartat "4.1 PIEZAS" segons la taula 005. També exposa que la resistència normalitzada a compressió mínima de les peces,  $f_b$ , serà de 5 N/mm<sup>2</sup>.

Tabla 4.1 Grupos de piezas

Característica	Grupo						
	Maciza	Perforada		Aligerada		Hueca	
		cerámica	hormigón	cerámica	hormigón	cerámica	hormigón
Volumen de huecos (% del-bruto) <sup>(1)</sup>	≤ 25	≤ 45	≤ 50	≤ 60 <sup>(2)</sup>	≤ 60 <sup>(2)</sup>	≤ 70	
Volumen de cada hueco (% del bruto)	≤ 12,5	≤ 12,5	≤ 25	≤ 12,5	≤ 25	≤ 12,5	≤ 25
Espesor combinado (% del ancho total) <sup>(3)</sup>	≥ 37,5		≥ 20		≥ 20		

<sup>(1)</sup> Los huecos pueden ser huecos verticales que atraviesan las piezas, rebajes o asas.  
<sup>(2)</sup> El límite del 60% de huecos puede aumentarse si se dispone de ensayos que confirmen que la seguridad de las fábricas no se reduce de manera importante.  
<sup>(3)</sup> El espesor combinado es la suma de los espesores de las paredes y tabiquillos de una pieza, medidos perpendicularmente a la cara del muro.

Taula 005. Classificació de les peces segons el CTE-DB-SE-F.

En l'apartat "4.2 MORTEROS", menciona que el morter ordinari per a fàbriques convencionals no serà inferior a 1 N/mm<sup>2</sup>. Per evitar trencaments fràgils dels murs, la resistència a la compressió del morter no ha de ser superior al 0,75 de la resistència normalitzada de les peces.

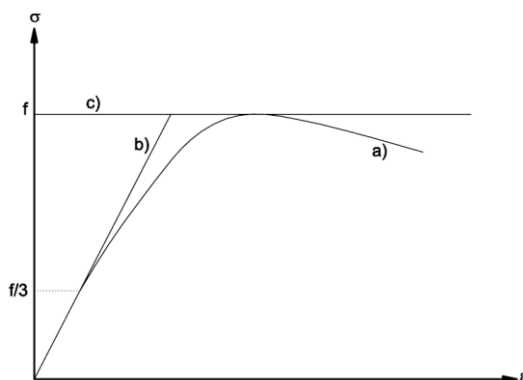
En l'apartat "4.6. FÁBRICAS", menciona que la resistència característica a la compressió de la fàbrica,  $f_k$ , corresponent a un esforç normal a les juntes horitzontals, es podrà prendre per referència als valors de la taula 006, que recull els casos més usuals.

Tabla 4.4 Resistencia característica a la compresión de fábricas usuales  $f_k$  (N/mm<sup>2</sup>)

Resistencia normalizada de las piezas, $f_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	5		10		15		20		25
Resistencia del mortero, $f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	2,5	3,5	5	7,5	7,5	10	10	15	15
Ladrillo macizo con junta delgada	-	-	3	3	3	3	3	3	3
Ladrillo macizo	2	2	4	4	6	6	8	8	10
Ladrillo perforado	2	2	4	4	5	6	7	8	9
Bloques aligerados	2	2	3	4	5	5	6	7	8
Bloques huecos	1	1	2	3	4	4	5	6	6

Taula 006. Resistència característica a compressió de diferents tipus d'obra de fàbrica.

En la gràfica 001, el diagrama de tensió-deformació de la fàbrica té la forma genèrica que es representa amb la línia a). Com a diagrames de càlcul es poden adoptar els de les línies b) o c).



Gràfica 001. Diagrama de tensió deformació de l'obra de fàbrica.

Com mòdul d'elasticitat longitudinal instantani,  $E$ , d'una fàbrica es pot prendre com a referència igual a  $1000 \cdot f_k$ . Per a càlculs d'estats límits de servei, es pot multiplicar el valor  $E$  pel factor 0,6. Per determinar deformacions diferides, el mòdul a utilitzar pot ser deduït del mòdul d'elasticitat per deformacions instantànies multiplicat pel coeficient de fluència que es dedueix de la taula 007.

Tipo de pieza	Coeficiente final de fluencia, $\varphi_{\varphi}$	Retracción o expansión final por humedad, <sup>(1)</sup> (mm/m)	Coeficiente de dilatación térmica ( $10^{-6}$ /m °C)
Cerámica	1	0,2 a 1,0 <sup>(2)</sup>	6
Silico-calcáreos	1,5	-0,2	9
Hormigón ordinario y piedra artificial	1,5	-0,2	10
Hormigón de árido ligero	2	-0,4 <sup>(3)</sup>	10
Hormigón celular de autoclave	1,5	0,2	8
Piedra natural	1	0,1	7

<sup>(1)</sup> Acortamiento negativo y alargamiento positivo

<sup>(2)</sup> Depende del material

<sup>(3)</sup> Para áridos ligeros de piedra pómez y de arcilla expandida; en otro caso el valor es - 0,2

Taula 007. Deformabilitat de les obres de fàbriques.

Com mòdul d'elasticitat transversal,  $G$ , es pot prendre el 40% del mòdul d'elasticitat  $E$ .

### 2.4.3. COMPORTAMENT ESTRUCTURAL

Per poder aplicar la normativa d'aquest document a un mur de càrrega, aquest ha de tenir un gruix mínim de 115mm. En murs d'una fulla, la capacitat resistent vertical de càlcul a compressió vertical,  $N_{Rd}$ , per unitat de longitud, val:

$$N_{Rd} = \Phi \cdot t \cdot f_d$$

on:

- $\Phi$  és el factor de reducció del gruix del mur per efecte de l'esveltesa i / o de l'excentricitat de la càrrega.
- $t$  és el gruix del mur.
- $f_d$  és la resistència de càlcul a compressió de la fàbrica. Quan l'àrea  $A$ , de la secció horitzontal d'un mur sigui menor que  $0,1\text{m}^2$ , es reduirà pel factor  $0,7 + 3 \cdot A$ .

Al cap i base de mur, el factor de reducció,  $\Phi$ , val:

En el cap:  $\Phi = 1 - 2\frac{e}{t}$

En la base:  $\Phi = 1 - 2\frac{e}{t} - 2\frac{a}{t}$

sent:

$a$  la profunditat amb què es remet el cantell del forjat respecte a la cara exterior del mur.

$e$  l'excentricitat total de la secció que es comprova. Llevat que s'hagi obtingut per capacitat, es considerarà:

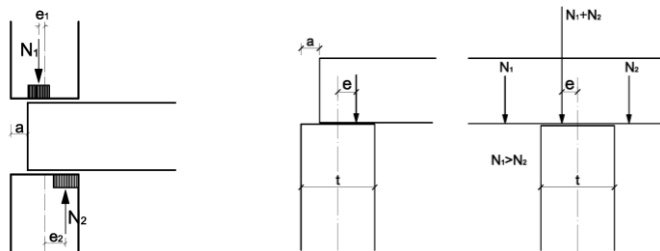
$$e = M_{Sd}/N_{Sd} + e_a > 0,05 \cdot t$$

on:

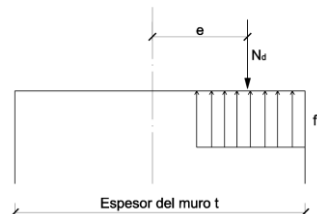
$M_{Sd}$  és el moment flector de càlcul de la secció que es comprova, deduït del model estructural adoptat, a causa de càrrega vertical.

$N_{Sd}$  és l'esforç normal de càlcul en la secció que es comprova, deduït del model estructural, en general considerant les plantes superiors sense sobrecàrrega.

$e_a$  és un increment d'excentricitat per execució.



**Imatges 011 i 012.** 011- Equilibri dels nusos intermedis.  
012- Excentricitat de recolzament en cap de mur superior.



**Imatge 013.** Excentricitat de l'esforç normal de càlcul.

En tot mur que estigui sol·licitat per una càrrega concentrada, la tensió de càlcul aconseguida sobre la superfície d'aplicació no serà més gran que la resistència de càlcul del material en el qual dona suport.

En un mur realitzat amb maó massís, la resistència de càlcul a compressió de la superfície d'aplicació es pot incrementar per un factor  $\xi$ . El valor de  $\xi$  pot prendre, de manera simplificada, de l'equació:

$$\xi = (1,10 + a/h) < 1,40$$

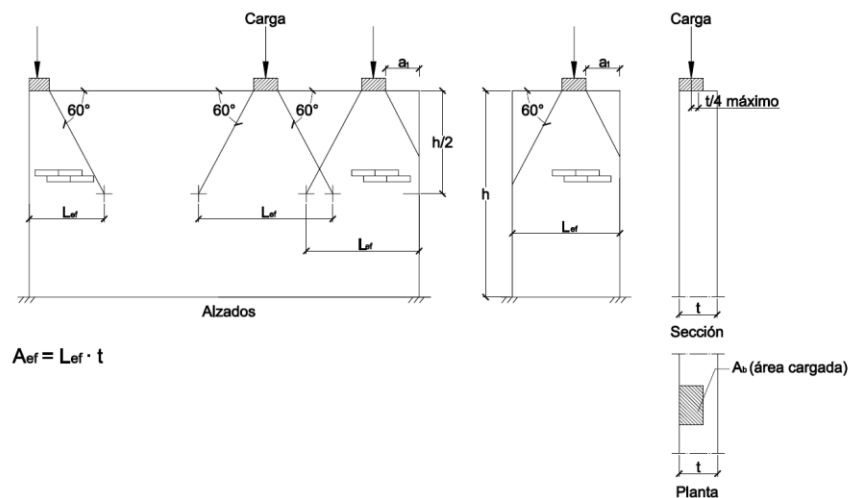
on:

$a$  la distància de la vora de l'àrea carregada a la vora vertical del mur més pròxim.

$h$  l'altura del drap fins al nivell en què s'aplica la càrrega.

L'excentricitat de la càrrega que s'origini segons càlcul al mur no serà major de  $t/4$ . A més s'ha de comprovar la compressió repartida en la longitud eficaç  $L_{ef}$  incloent l'efecte de qualsevol altra càrrega vertical, particularment quan incideixen càrregues concentrades properes, que solapen les seves longituds eficaces, i adoptar les mesures que siguin procedents per a garantir l'equilibri.

La càrrega concentrada es donarà suport sobre peces o un altre material massís en una longitud igual a la de l'àrea carregada incrementada en una longitud addicional a l'efecte que les tensions, suposant que es reparteixen amb un angle de  $60^\circ$ , siguin suportables per al material que constitueix el mur.



Imatge 014. Murs amb càrregues concentrades.

#### 2.4.4. EXECUCIÓ

En aquest subapartat es mencionen les pautes que dona aquest document per a la construcció d'elements d'obra de fàbrica, ja que són les que s'han seguit per la construcció dels murs i de les provetes d'assaig, com es pot observar en les imatges de l'apartat 4.4.

##### a) Humectació de les peces

Les peces s'humitejaran abans de la execució de la fàbrica, per aspersió o per immersió. La quantitat d'aigua embeguda en la peça ha de ser la necessària perquè en posar-la en contacte amb el morter no faci canviar la consistència d'aquest, és a dir, perquè la peça ni absorbeixi aigua, ni l'aporti.

##### b) Col·locació de les peces

Les peces es col·locaran generalment a refrec sobre un llit de morter fins que el morter vessi per la junta vertical i horitzontal. No es mourà cap peça després d'efectuada l'operació de refrec. Si cal corregir la posició d'una peça, es traurà, retirant també el morter.



**c) Reomplert de les juntes**

El morter ha d'omplir totalment les juntes de horitzontals i verticals, en funció del tipus de peça utilitzada.

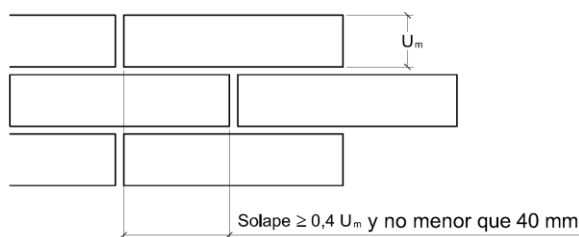
Quan s'especifiqui la utilització de juntes primes, les peces s'assentaran acuradament perquè les juntes mantinguin el gruix establert de manera uniforme. En murs de gruix menor que 200 mm, les juntes no s'enfonsaran una profunditat major que 5 mm.

De procedir-se al rejuntat, el morter tindrà les mateixes propietats que el d'assentar les peces. Abans del rejuntat, es raspallarà el material solt, i si cal, s'humitejarà la fàbrica.

**d) Trava de la fàbrica**

Les fàbriques s'han d'aixecar per filades horitzontals en tota l'extensió de l'obra, sempre que sigui possible.

En les filades consecutives d'un mur, les peces es solaparan per a què el mur es comporti com un element estructural únic. El solapament serà almenys igual a 0,4 vegades el gruix de la peça i no menor que 40 mm. A les cantonades o trobades, el solapament de les peces no serà menor que el seu través; a la resta del mur, poden emprar peces tallades per aconseguir el solapament precís.



**Imatge 015.** Solapament de les peces.

Per poder emprar els valors i equacions de l'apartat 4.6 i l'annex C del document bàsic, el gruix dels junts horitzontals i verticals de morter ordinari no serà menor que 8 mm ni major que 15 mm.

**e) Recolzaments de càrregues concentrades**

La longitud suport d'una càrrega concentrada sobre un mur serà no inferior a 100 mm.

### 2.4.5. VALORS DE RESISTÈNCIA CARACTERÍSTICA A COMPRESSIÓ

En l'annex C del document bàsic, exposa que la resistència característica a la compressió,  $f_k$ , en N/mm<sup>2</sup>, d'una fàbrica realitzada amb morter ordinari amb juntes que ocupen tot el gruix, es pot calcular amb l'equació:

$$f_k = K \cdot f_b^{0.65} \cdot f_m^{0.25}$$

on:

- $K$  és una constant, de valor:
- a) en murs d'una fulla, quan el gruix de la fàbrica sigui igual al través o al llarg de les peces  $K=0,60$  per a peces massisses,  $K=0,55$  per a peces perforades,  $K=0,50$  per a les alleugerides i  $K=0,40$  per a les buides.
  - b) en murs de dues fulles o amb sutures contínues,  $K=0,50$  per a peces massisses,  $K=0,45$  per les perforades i  $K=0,40$  per a les alleugerides.
- $f_b$  és la resistència normalitzada a la compressió de les peces de fàbrica, a l'adreça de l'esforç, en N/mm<sup>2</sup>.
- $f_m$  és la resistència a la compressió especificada del morter ordinari en N / mm<sup>2</sup>, no més gran que 20N/mm<sup>2</sup>, ni que  $0,75 f_b$ .

### 3. MODELITZACIÓ DELS ELEMENTS DE L'OBRA DE FÀBRICA

Per l'estudi del comportament dels murs de fàbrica s'ha realitzat una anàlisi mitjançant el mètode dels elements finits.

El mètode dels elements finits (MEF) és un mètode numèric general per a l'aproximació de solucions d'equacions diferencials parcials complexes, pensat per a ser utilitzat en ordinadors i permet resoldre equacions diferencials associades a un problema físic sobre geometries complicades.

El MEF permet obtenir una solució numèrica aproximada sobre un cos o estructura a partir de subzones interconnectades les quals es denominen elements finits. Aquests elements poden prendre formes simples, com ara línies, triangles o rectangles, i s'uneixen de diferents formes per representar la solució sobre una regió.

Aquests elements estan per una sèrie de punts anomenats nodes els quals formen una malla de punts. La generació de la malla es realitza usualment amb programes especials anomenats generadors de malles.

L'anàlisi dels elements finits permet calcular el camp de desplaçaments i, posteriorment, les deformacions i tensions respectivament, quan es tracta d'un problema de mecànica de sòlids deformables.

Dins la tècnica dels elements finits, existeixen diferents tipus de models, segons les dades disponibles per al model i l'enfocament que es vol tenir:

- Macromodelament, on s'enfoca a un nivell menor de detall i complexitat dels elements. Es una bona estratègia utilitzar aquesta tècnica per a estructures de grans dimensions. En el cas d'analitzar el mur d'estudi d'aquest projecte, s'homogeneïtzarien les peces i el morter, formant un únic material i element.
- Micromodelament, on s'enfoca a modelar detalladament cada un dels elements que compona l'estructura. Aquesta tècnica té el problema que segons el número d'elements que componen l'estructura, pot estar limitada per la capacitat de processament dels ordinadors.

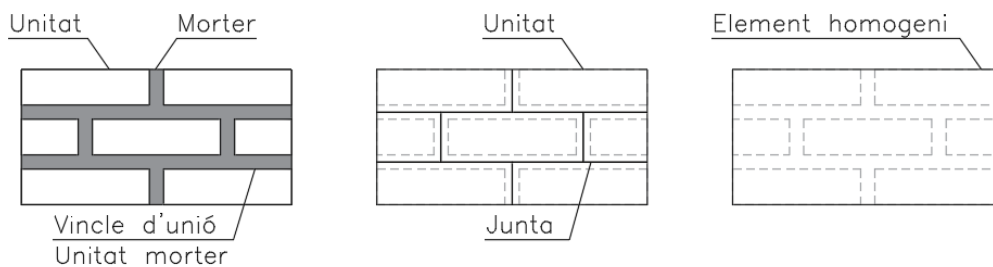
### 3.1. MICROMODELITZACIÓ

Amb la micromodelització es pot observar a nivell local els estats de tensions i deformacions per a diversos nivells de sol·licitacions, i el dany en la obra de fàbrica.

La micromodelització es divideix en dos sistemes diferents, en la micromodelització detallada i la simplificada:

- La micromodelització detallada incorpora tots els elements que componen l'obra de fàbrica amb les diferents propietats. Com ja s'ha comentat, aquest tipus de model necessita un processament més elaborat, ja que necessita una malla més complexa i per tant, l'ordinador necessita fer més càlculs numèrics.
- La micromodelització simplificada busca simplificar el model numèric per poder treballar de forma més fluida a l'hora de processar les dades amb l'ordinador, però alhora veure el comportament de cada una de les peces.

A la imatge 016, es poden contemplar els diferents exemples de com serien els diferents models numèrics en una obra de fàbrica.



**Imatge 016.** Diferents models numèrics per a elements finits en una obra de fàbrica. Micromodel detallat (esquerra), micromodel simplificat (centre) i macromodel (dreta).

En aquest projecte s'ha optat per fer un model numèric a partir de un micromodel detallat, ja que es volen analitzar petits elements estructurals, un model amb unes mides del pla de 188x119cm, com es pot observar en l'apartat 4.1.4.

Un micromodel té en compte el mòdul de deformació, el coeficient de Poisson i les resistències de la peça i mortero. Això permet que l'acció combinada de peça, mortero i el vincle d'unió es puguin estudiar en deteniment.

Per fer el modelatge del mur s'utilitzarà el programa informàtic ANSYS, ja que ofereix solucions per resoldre anàlisis estàtics lineals.

## 4. CAMPANYA EXPERIMENTAL

### 4.1. PROPOSITS

En aquest projecte es pretén obtenir una relació dels resultats que s'obtenen entre assajar a compressió l'obra de fàbrica a laboratori, segons la normativa vigent, i assajar el murs in-situ, amb una instrumentació proposada.

En aquest capítol s'explicarà com s'han de d'assajar i construir les provetes de fàbrica i els murs, quines mides tindran, i els primers tantejos que es van realitzar per considerar les possibles tensions admissibles de l'obra de fàbrica.

Un cop fetes les primeres proves, es definiran els materials a utilitzar en la campanya, es construiran les provetes i els murs a assajar, i es procedirà a fer el model amb el programa ANSYS. També es definirà la instrumentació que s'utilitzarà per estudiar els murs.

#### 4.1.1. PROVETES D'ASSAIG A LABORATORI

Per fer les provetes d'obra de fàbrica i simular l'assaig que es realitza a laboratori, ens hem regit segons la norma "UNE-EN 1052-1/1999: Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión".

Aquesta norma té com objecte determinar les característiques de les provetes de fàbrica, la descripció del mètode d'assaig, el seu model de càlcul i el contingut que ha d'incloure l'acta de l'assaig.

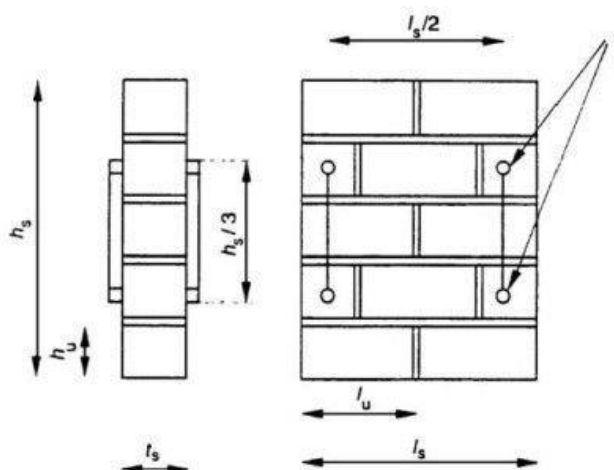
Aquesta norma es basa en l'assaig RILEM, esmentat en l'apartat 3.2.2.5. L'assaig requereix d'almenys tres mostres de fàbrica executades segons les característiques que tinguin en obra i conèixer els valors de resistència del morter, és a dir, assajar el morter d'execució de la fàbrica a compressió i a la mateixa edat en què es posi a prova el conjunt.

Les dimensions de les mostres es recullen taula 008 i la imatge 017:

**Tamaños de probeta mínimos para ensayar la resistencia a compresión de fábricas de albañilería**

Tamaño de la cara vista de la pieza		Tamaño de la probeta de fábrica de albañilería			
$l_u$ (mm)	$h_u$ (mm)	Longitud $l_s$	Altura $h_s$		Espeor $t_s$
≤300	≤150	≥ (2 x $l_u$ )	≥ 5 $h_u$	≥3 $t_s$ y ≤ 15 $t_s$ y ≥ $l_s$	≥ $t_u$
	>150		≥3 $h_u$		
>300	≤150	≥ (1,5 x $l_u$ )	≥5 $h_u$		
	>150		≥3 $h_u$		

**Taula 008.** Dimensions mínimes i màximes de les provetes d'obra de fàbrica.



Imatge 017. Nomenclatura de les mides de les provetes d'obra de fàbrica.

On:

- $l_u$  és la longitud major del maó en mm.
- $h_u$  és l'altura del maó en mm.
- $l_s$  és la longitud total de la proveta en mm.
- $h_s$  és l'alçada total de la proveta en mm.
- $t_s$  és el gruix total de la proveta en mm.

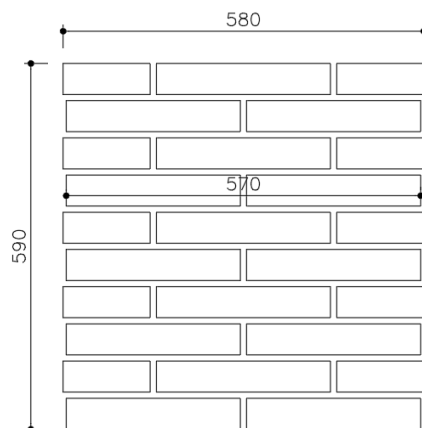
En l'apartat 4.3.1. es defineixen les peces utilitzades, i aquestes tenen unes mides comercials de:

- $l_u = 280$  mm.
- $h_u = 50$  mm.
- $t_s = 140$  mm

Per tant, seguint les indicacions de la taula 008, les mides de les provetes a assajar han de complir les següents dimensions:

- $l_u < 300$  mm.
- $h_u < 150$  mm.
- $l_s \geq 2 \times l_u \geq 2 \times 280$ .
- **$l_s \geq 560$ mm.**
- $h_s \geq 3 \times t_s \geq 3 \times 140$ .
- $h_s \geq 420$ mm.
- $h_s \leq 15 \times t_s \leq 15 \times 140$ .
- $h_s \leq 2.100$ mm.
- $h_s \geq l_s$ .
- **$l_s \leq h_s \leq 2.100$ mm.**

Per tant, la proveta a assajar tindrà una base de **570mm** (2 peces senceres, amb un llarg de 280mm, més la junta de 10 mm de morter) i una alçada de **590mm** (10 filades amb un gruix de 50mm cada peça més les juntes de 10mm de morter). Cada filada par, la mida horitzontal de la proveta,  $h_s$ , és de 580mm ja que apareix una junta més vertical, de 10mm. En la imatge 018, es poden apreciar les mides de les provetes.



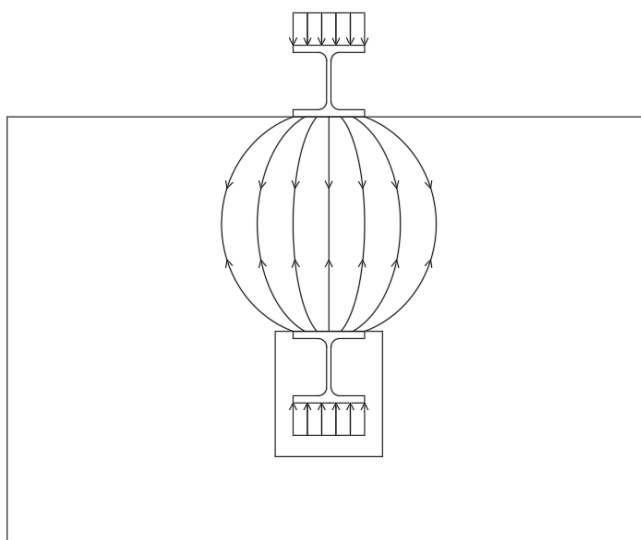
**Imatge 018.** Mides de les provetes de les provetes d'obra de fàbrica a assajar.

Per assegurar-nos que les superfícies de contacte entre les provetes i la premsa durant l'assaig és totalment plana alhora d'assajar-es, aquestes es refrontaran amb un llit de morter.

### 4.1.2. MURS D'ASSAIG IN-SITU

Per assajar els murs que simularan estar construïts en la mateixa obra, es procedeix a actuar, com es pot veure en la imatge 019, de la següent manera:

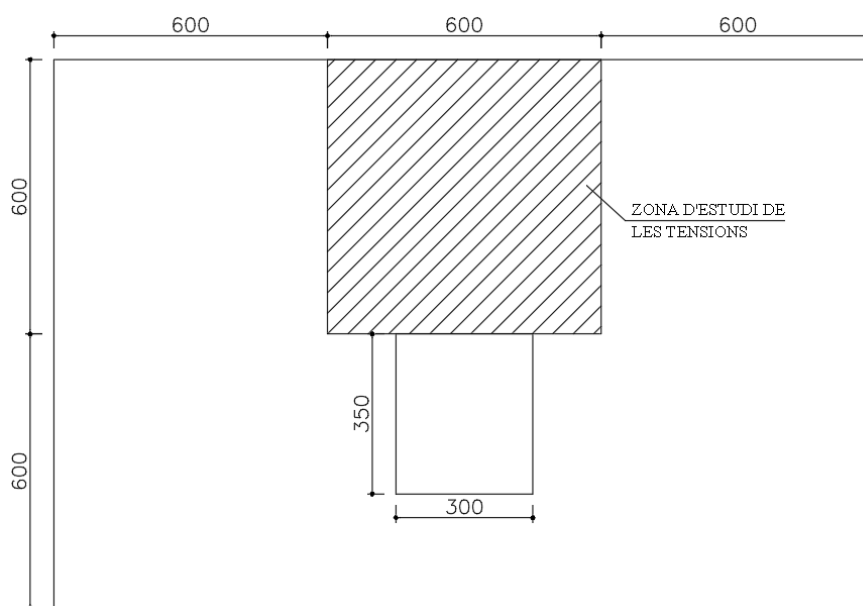
- Per transmetre les tensions als murs s'utilitzaran dos perfils metàl·lics que exerciran les càrregues sobre aquests.
- Per col·locar el perfil inferior es deixarà un buit en el mur. Aquest buit simula un tall realitzat en el mur en la mateixa obra a l'hora de realitzar l'assaig.
- El perfil superior es recolza en el cantell superior del mur, encara que en una obra real s'hauria de realitzar un altra buit al mur.



**Imatge 019.** Esquema de la actuació a realitzar en el mur.

Per fer una estimació de les mides dels murs, s'ha procedit a partir de les següents pautes:

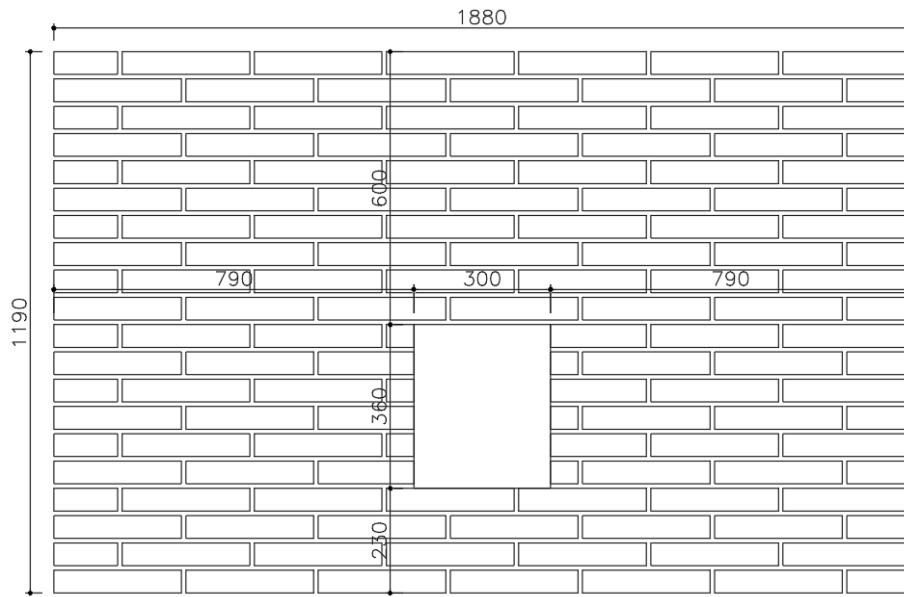
- La zona d'estudi principal de tensions s'ha optat que tingui unes mides semblants a les de les provetes d'obra de fàbrica que s'assajaran a laboratori, de uns 600x600 mm, com se pot veure en l'apartat 4.1.1.
- A part de la zona d'estudi, també es construiran 600 mm en cada lateral d'aquesta, ja que la resistència a compressió del materials augmenta si aquests es troben confinats. En obra, els elements d'un mur de fàbrica es troben confinats pels altres elements que formen el mur, per tant, s'ha procedit a ampliar el mur per a que la zona d'estudi es trobi en la mateixa situació que es trobaria en obra.
- Sota aquesta zona d'estudi es construiran 600 mm més de mur, per poder col·locar de forma adequada la instrumentació amb la que s'assajaran els murs.
- El buit per poder col·locar la instrumentació tindrà una base de 300 mm i una alçada de uns 350mm.
- Per tant, les mides aproximades dels murs a assajar, haurien de ser de 1800x1200 mm.



**Imatge 020.** Estimació de les mides dels murs (en mm).

Construint el mur només amb peces senceres i mitges peces ceràmiques obtenim que les mides finals dels murs són 1880x1190mm, amb un buit de 300x360mm.





**Imatge 021.** Mides dels murs (en mm).

## 4.2. PRIMERS TANTEJOS

Una de les primeres qüestions que es van tenir al principi de la campanya, va ser el no saber si la premsa hidràulica de la que es disposa seria capaç de trencar a compressió les provetes d'obra de fàbrica; La premsa arriba a exercir una força màxima de 60 tonelades.

Com s'esmenta en l'apartat 5.1., Per assajar les provetes de fàbrica s'ha utilitzat un perfil metàl·lic IPE-200, on la base d'aquest perfil és de 100mm. Per tant la superfície de contacte entre la premsa i la proveta és:

$$S = 580 \cdot 100 = 58.000mm^2$$

Per tant, les tensions que la premsa pot exercir sobre una proveta de fàbrica no poden superar els 10 MPa.

Abans de començar la campanya, es va realitzar una proveta de fàbrica de prova segons les indicacions de l'apartat 4.1.1. per poder comprovar si el recursos amb els quals es disposen al laboratori son apropiats per realitzar els assajos.

Per evitar que les construccions de fàbrica tinguin unes tensions admissibles massa elevades, es va optar per utilitzar com a morter el morter de calç, definit en l'apartat 4.3.2. Per fer el morter a utilitzar, es va fer la mescla d'arena, calç i aigua en el mateix laboratori, ja que en aquell moment no es disposava de cap preparat de morter.

Les peces utilitzades van ser maons massissos de ceràmica que havia en els laboratoris. Les mides d'aquestes peces són les mateixes que les que es van utilitzar per fer els assajos de les provetes finals, 280x140x50mm.

El dia 15 de març de 2018, es va construir la proveta de fàbrica a forma de prova, com es poden veure en les imatges 022 i 023. A part de la proveta de fàbrica, també es van realitzar mostres de morter, per poder comprovar la resistència a compressió d'aquest.



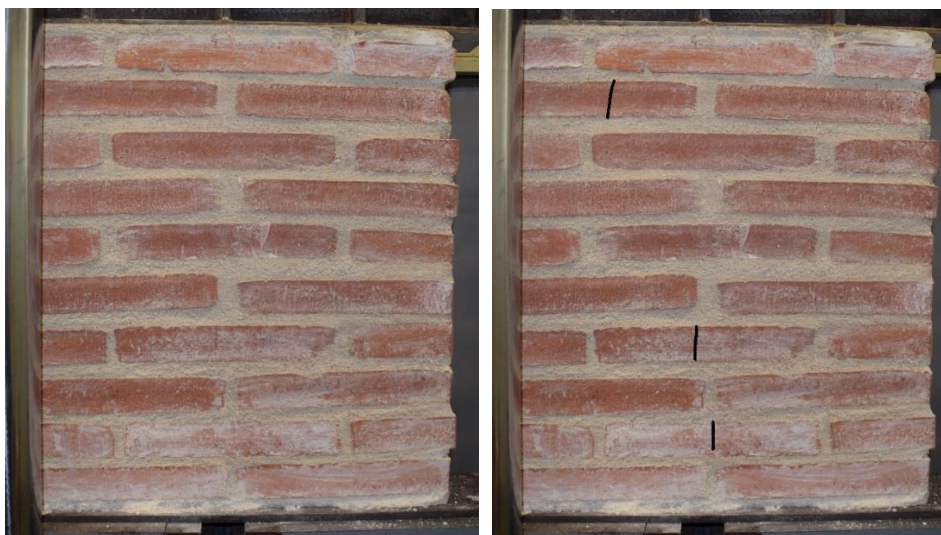
**Imatge 022 i 023.** 022- Construcció de la proveta a forma de prova.  
023- Proveta a forma de prova.

La proveta es va assajar dia 5 d'abril de 2018, 21 dies després de la seva construcció. Es va deixar que el procés de fraguat del morter només durés 3 setmanes perquè, al no tenir cap referencia de les possibles tensions admissibles que podien arribar les provetes de fàbrica i la incertesa de si la premsa seria capaç d'arribar a aquestes tensions, no es volia deixar que la resistència del morter fos massa elevada.

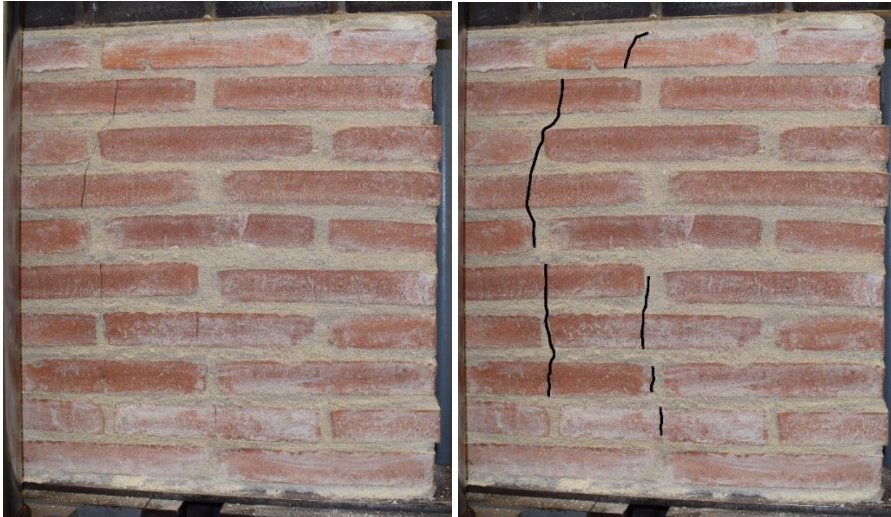
Es procedeix a mostrar gràficament el trencament de la proveta de fàbrica i el seguiment de les esquerdes que es van originant en el transcurs del procés d'assaig:



**Imatge 024.** Trencament de la proveta de proveta de fàbrica de prova.



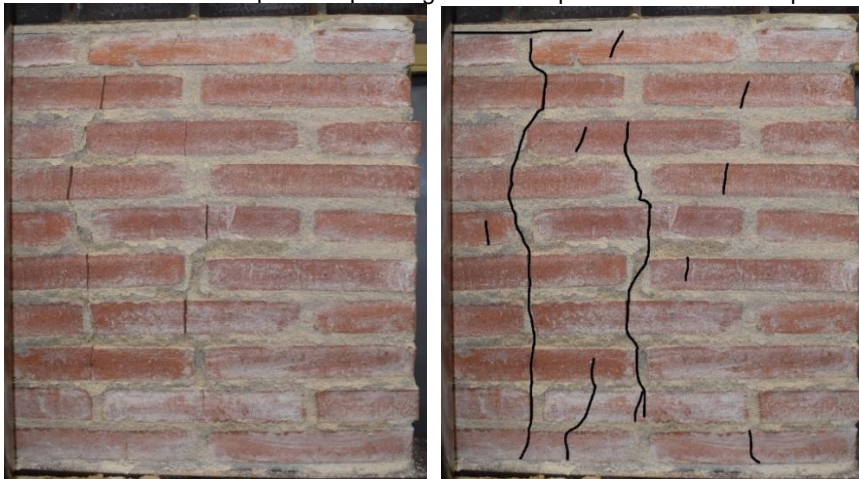
**Imatges 025 i 026.** 025- Seguiment de les esquerdes que sorgeixen en la proveta de fàbrica de prova (1).  
026- Remarcats de les esquerdes que sorgeixen en la proveta de fàbrica de prova (1).



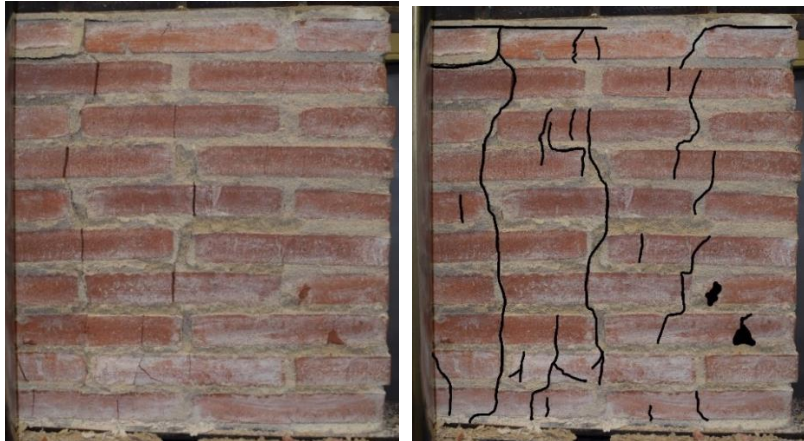
**Imatges 027 i 028.** 027- Seguiment de les esquerdes que sorgeixen en la proveta de fàbrica de prova (2).  
028- Remarcats de les esquerdes que sorgeixen en la proveta de fàbrica de prova (2).



**Imatges 029 i 030.** 029- Seguiment de les esquerdes que sorgeixen en la proveta de fàbrica de prova (3).  
030- Remarcats de les esquerdes que sorgeixen en la proveta de fàbrica de prova (3).



**Imatges 031 i 032.** 031- Seguiment de les esquerdes que sorgeixen en la proveta de fàbrica de prova (4).  
032- Remarcats de les esquerdes que sorgeixen en la proveta de fàbrica de prova (4).



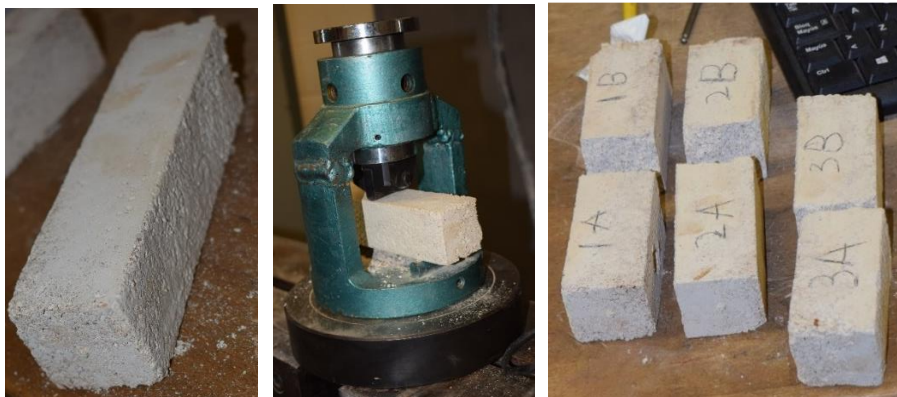
**Imatges 033 i 034.** 033- Seguiment de les esquerdes que sorgeixen en la proveta de fàbrica de prova (5).  
034- Remarcat de les esquerdes que sorgeixen en la proveta de fàbrica de prova (5).



**Imatges 035 i 036.** 035- Estat final de la proveta en haver acabar l'assaig de cara.  
036- Estat final de la proveta en haver acabar l'assaig de cantell.

S'han assajat 3 mostres de morter de la proveta de fàbrica de prova, realitzades el mateix dia que es van construir la proveta. Aquestes mostres de morter tenen unes mides de 160x40x40mm

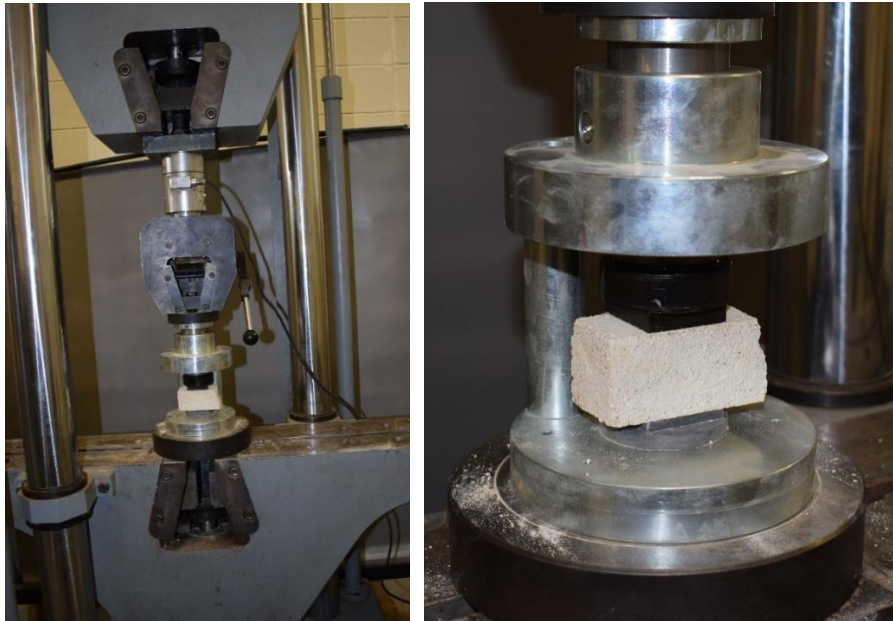
Aquestes mostres es van tallar per la meitat, utilitzant l'aparell que es mostra en la imatge 038, per així tenir 6 submostres a assajar i tenir més dades de la resistència a compressió del morter.



**Imatges 037, 038 i 039.** 037- Mostra de morter.  
038- Demostració de com es trenquen les mostres per la meitat.  
039- Enumeració de les submostres de morter a assajar

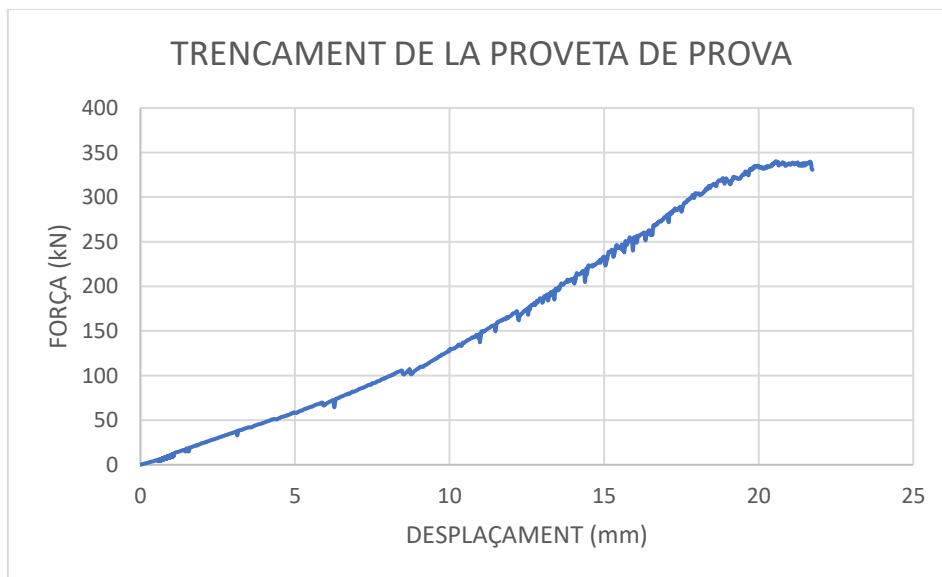
Per assajar les submostres, la superfície de contacte entre la premsa i la proveta és 40x40mm:

$$S = 40 \cdot 40 = 1.600\text{mm}^2$$



**Imatges 040 i 041.** 040- Assaig de una submostra de morter.  
41- Detall de la mostra de morter abans de realitzar l'assaig.

En els assajos realitzats, es va obtenir com a resultat que la proveta d'obra de fàbrica de prova suporta una força de 340,42 kN, com es pot comprovar en la gràfica 002 i en la taula 009.



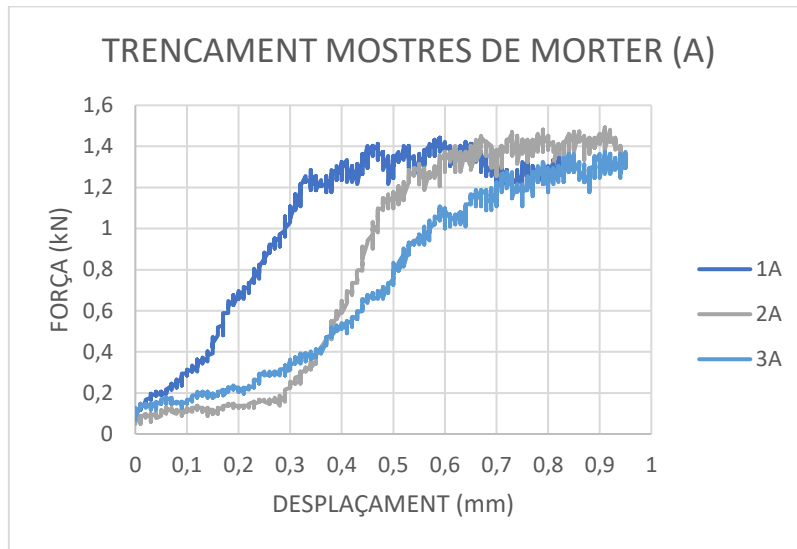
**Gràfica 002.** Trencament de la proveta de prova.

Per tant, les tensions admissibles d'aquesta proveta d'obra de fàbrica són de 5,87 MPa.

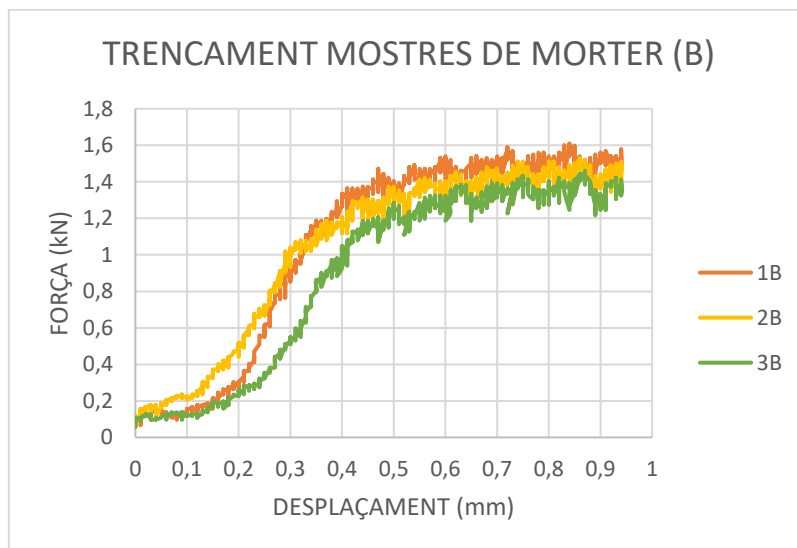
	<b>Força</b>	<b>Tensions</b>
Proveta de prova	340,24 kN	5,87 MPa

**Taula 009.** Força màxima i tensió aplicada a la proveta de prova.

La resistència a compressió del morter s'ha obtingut assajant les submostres de morter, obtenint com a resultat les dades mostrades en les gràfiques 003-004 i en la taula 010.



Gràfica 003. Trencament de les mostres de morter (A).



Gràfica 004. Trencament de les mostres de morter (B).

	Força	Tensions
<b>1A</b>	1,44 kN	0,90 MPa
<b>2A</b>	1,49 kN	0,93 MPa
<b>3A</b>	1,37 kN	0,86 MPa
<b>1B</b>	1,61 kN	1,01 MPa
<b>2B</b>	1,53 kN	0,96 MPa
<b>3B</b>	1,46 kN	0,91 MPa

Taula 010. Força i tensió màximes aplicades a les mostres de morter.

Segons, els resultats obtinguts, la tensió admissible del morter abasta entre 0,86-1,01MPa.

Com s'explica en l'apartat 2.4.2, el CTE exposa que el morter per a obres de fàbrica no pot ser inferior a 1,00 Mpa. Per tant, segons les dades obtingudes, aquest morter en principi no seria vàlid per poder obtenir resultats concloents, ja que la seva resistència a compressió no supera els límits establerts per normativa. En el moment de l'assaig, les mostres només tenien 3 setmanes de fraguat. Per utilitzar aquest morter s'hauria d'estudiar si la resistència a compressió és superior a 1 Mpa deixant que el procés de fraguat sigui l'adequat.

Amb els resultats obtinguts en el tanteig es va decidir que les peces de maó ceràmic massís eren adequats per ser les peces dels futurs assajos. Per al morter es va decidir que s'utilitzaria una morter de calç, el qual arribés a una resistència mínima superior als límits establerts per normativa, segons el fabricant.

La resistència del morter de la proveta d'obra de fàbrica de prova és molt més baix que l'utilitzat en les altres construccions realitzades, fent que els resultats de la prova no s'assimilin amb els de la campanya.



### 4.3. MATERIALS

Amb les dades que vam obtenir amb la proveta de prova, comentada en l'apartat 4.2, es va creure adequat utilitzar com a material de les peces maons massissos ceràmics i com a morter el morter de calç.

#### 4.3.1. PECES

Les peces utilitzades són maons ceràmics massissos amb unes mides comercials de 280x140x50mm, del fabricant "CERÁMICA ELIAS".

S'han realitzat assajos a compressió de les peces per comprovar algunes de seves característiques mecàniques.

##### a) Densitat

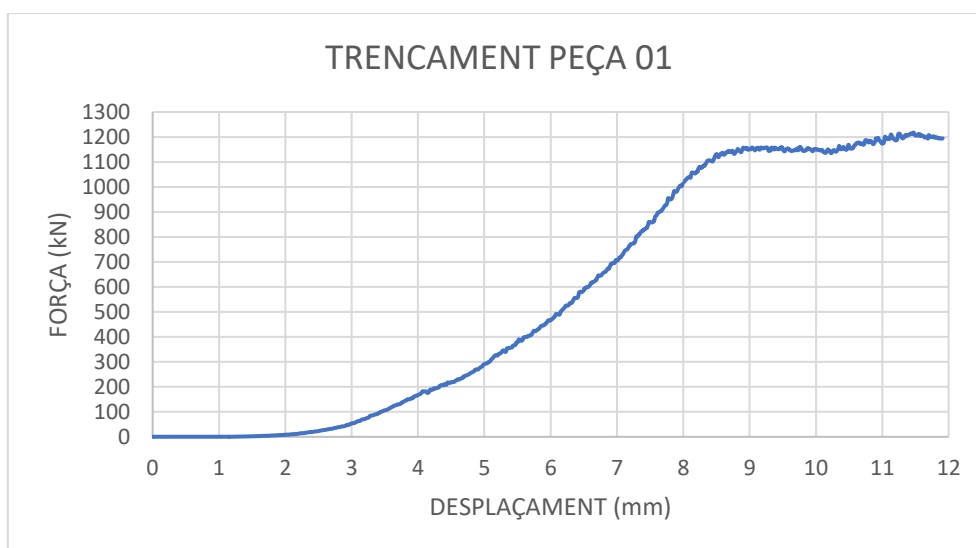
En l'apartat 2.2.1.2.a s'ha determinat que la densitat dels maons ceràmics massissos és de 2.300 Kg/m<sup>3</sup>.

##### b) Resistència a compressió

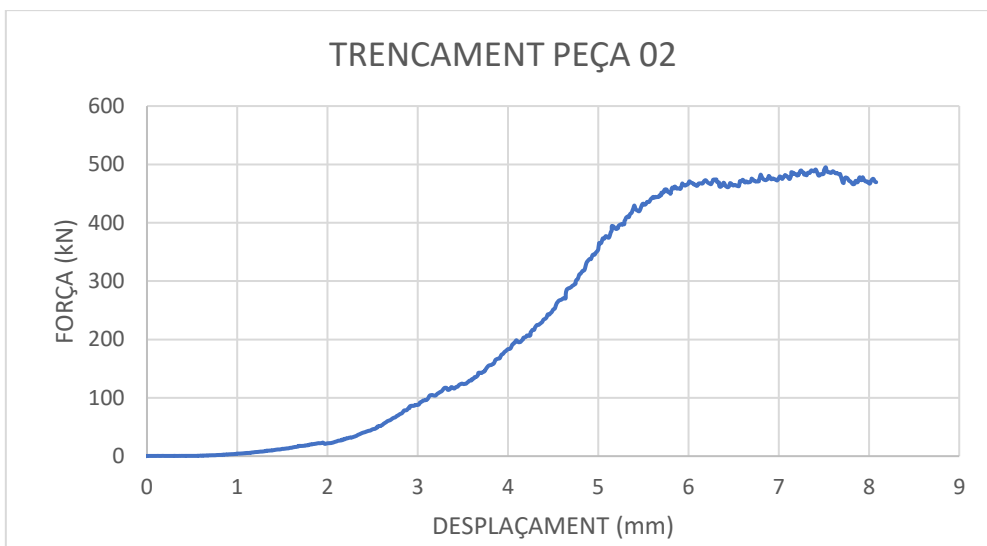
Per comprovar la resistència a compressió dels maons, s'han assajat tres mostres, 1 peça sencera i 2 mitges peces, amb unes mides de:

- Peça 01: 284x139 cm.
- Peça 02: 138x138 cm.
- Peça 03: 140x138 cm.

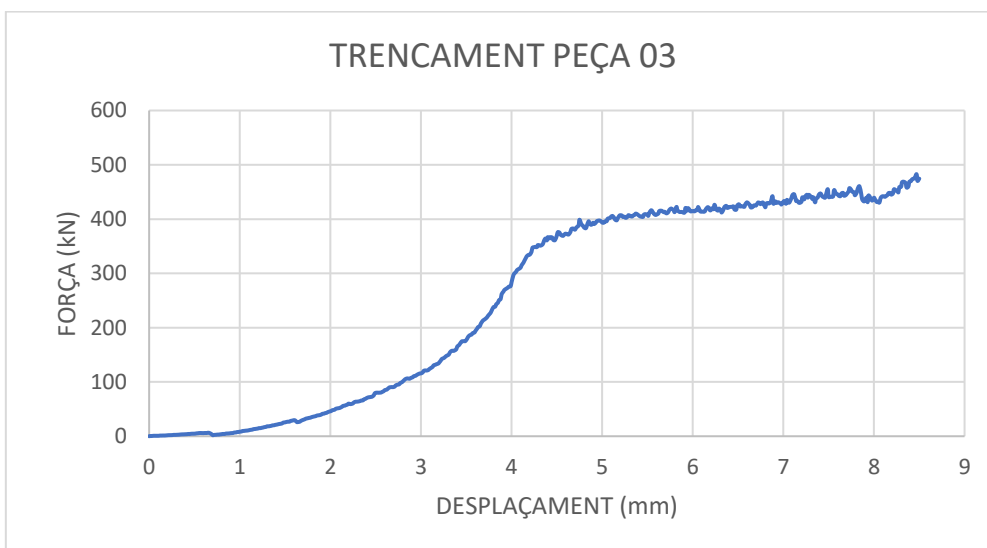
Assajant les peces, s'han obtinguts les següents gràfiques de Força-Desplaçament:



Gràfica 005. Trencament de la peça ceràmica 01.



Gràfica 006. Trencament de la peça ceràmica 02.



Gràfica 007. Trencament de la peça ceràmica 03.

Les tensions màximes obtingudes en cada mostra han estat les següents:

	Força	Llarg	Través	Tensions
PEÇA 01	1218,11 kN	28,4 cm	13,9 cm	30,86 MPa
PEÇA 02	495,21 kN	13,8 cm	13,8 cm	26,00 MPa
PEÇA 03	482,75 kN	14,0 cm	13,8 cm	24,99 MPa

Taula 011. Forces i tensions màximes aplicades en les peces ceràmiques.

Les peces no van ser refrentades abans d'assajar-les, i per tant els resultats obtinguts no són completament verídics. Tot i així aquests assajos s'han realitzat per tenir una noció aproximada de la resistència a compressió de les peces.

Per relacionar les tensions admissibles dels materials i obtenir un únic resultat de la peça, s'ha utilitzat la mitjana geomètrica en comptes de la mitjana aritmètica;

La mitjana aritmètica és la mitjana del conjunt dels valors, utilitzant la fórmula:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

La mitjana geomètrica és menys sensible que la mitjana aritmètica als valors extrems, i per tant aquests tindran menys efecte a l'hora del càlcul. Es calcula amb la següent fórmula:

$$\bar{x} = \left( \prod_{i=1}^n x_i \right)^{1/n}$$

Per tant, per a que els possibles valors extrems no afectin als resultats obtinguts, es farà un de la mitjana geomètrica. La mitjana geomètrica de les tensions admissibles de les peces és de 27,10MPa.

El criteri d'utilitzar la mitjana geomètrica en comptes de la mitjana aritmètica s'aplicarà en tots els valors obtinguts durant la campanya experimental.

### c) Mòdul d'elasticitat

Per calcular el mòdul d'elasticitat de les peces s'han utilitzat les dades obtingudes en l'assaig a compressió de les peces.

El mòdul d'elasticitat s'obté amb el quocient entre la tensió i la deformació que apareixen en la peça que es vol estimar. Per tant, la fórmula és:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L'}$$

on:

E	és el mòdul d'elasticitat.
$\sigma$	és la tensió exercida sobre l'àrea de la secció transversal de l'element.
$\varepsilon$	és la deformació unitària entesa com la relació entre el canvi de longitud respecte a la longitud inicial.

Per obtenir el mòdul d'elasticitat s'han utilitzat les dades de la peça 01, concretament el tram comprès entre els 4 i 8 mm. S'ha utilitzat aquest tram ja que és la zona on s'aproxima més que un augment de tensió a la peça representa un augment proporcional de la deformació. Quan la peça s'ha deformat 4,00 mm, l'esforç aplicat era de 167,4 kN (4,24 MPa), mentre que quan la peça s'ha deformat 5,00 mm, l'esforç aplicat era de 1012,9 kN (21,42 MPa). Per tant si la longitud inicial de la

peça és de 50mm i la canvi de longitud és de 4,00mm, el mòdul elàstic,  $E_b$ , obtingut és de 267,75MPa, com es pot comprovar en la taula 012:

	DESPLAÇAMENT	$\sigma$	$\epsilon$	E
	4,00 mm	4,24 MPa		
	8,00 mm	25,66 MPa		
DIFERENCIA	4,00 mm	21,42 MPa	0,08	267,75 MPa

Taula 012. Càlcul del mòdul d'elasticitat del maó ceràmic assajat.

Aquest valor no correspon al mòdul d'elasticitat de la ceràmica, ja que es molt baix. Per tant com a referència, s'utilitzarà el mòdul d'elasticitat de la "sílica fundida" de la taula 002 de l'apartat 2.2.1.2.b. com a dada en el model amb el programa ANSYS, el qual correspon a 73.000 Mpa.

#### d) Coeficient de Poisson

Com a referència, s'utilitzarà el coeficient de Poisson de la "sílica fundida" de la taula 002 de l'apartat 2.2.1.2.b. com a dada en el model amb el programa ANSYS, el qual correspon a 0,17.

#### e) Resistència a tracció

La resistència a tracció no s'ha assajat en aquest projecte, però és necessari obtenir un valor aproximat per introduir-lo al model amb ANSYS.

En l'apartat 2.2.1.2.c. s'ha esmentat que la resistència a tracció en materials ceràmics sol ser entre 0,30 i 0,10 vegades la resistència a compressió. Per tant, per a la modelització del mur d'obra de fàbrica, el valor de resistència a tracció serà 10 vegades menor a la resistència a compressió, 2,75 MPa.

A continuació es procedeix a mostrar gràficament els assajos de les peces realitzats:



Imatges 042 i 043. 042- Premsa utilitzada per assajar les peces ceràmiques.  
043- Col·locació de una peça ceràmica en la premsa.



**Imatges 044 i 045.** 044- Assaig de la peça 01 (01).  
045- Assaig de la peça 01 (02).



**Imatges 046 i 047.** 046- Estat final de la peça 01 (01).  
047- Estat final de la peça 01 (02).



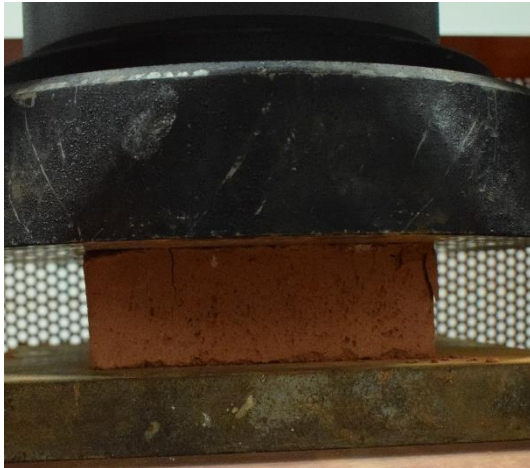
**Imatges 048 i 049.** 048-Estat final de la peça 01 (03).  
049- Estat final de la peça 01 (04).



**Imatges 050 i 051.** 050- Assaig de la peça 02.  
051- Estat final de la peça 02 (01).



**Imatge 052.** Estat final de la peça 02 (02).



**Imatges 053 i 054.** 053- Assaig de la peça 03.  
054- Estat final de la peça 03 (01).



**Imatges 055 i 056.** 055- Estat final de la peça 03 (02).  
056- Estat final de la peça 03 (03).

### 4.3.2. MORTER

El morter que s'utilitzarà per la construcció de les provetes i murs serà de calç. Per evitar que el morter tingui una resistència a compressió menor a als límits establerts pel CTE, s'utilitzarà un preparat de morter de calç, on el morter vindrà en sacs i la mescla d'arena i calç ja estigui preparada, i per tant només s'hagi d'afegir l'aigua indicada pel fabricant. Per fer la mescla del morter amb l'aigua s'utilitzarà la formigonera que hi ha en el laboratori.

El morter utilitzat és de la marca "Biocalce Muro", del fabricant "Kerakoll", i la classe resistent és M5.

Les juntes verticals i horitzontals que es realitzin tant en els murs com en les provetes de d'obra de fàbrica, tindran un gruix aproximat de 10mm.

S'han realitzat assajos a compressió de les mostres de morter per comprovar algunes de seves característiques mecàniques.

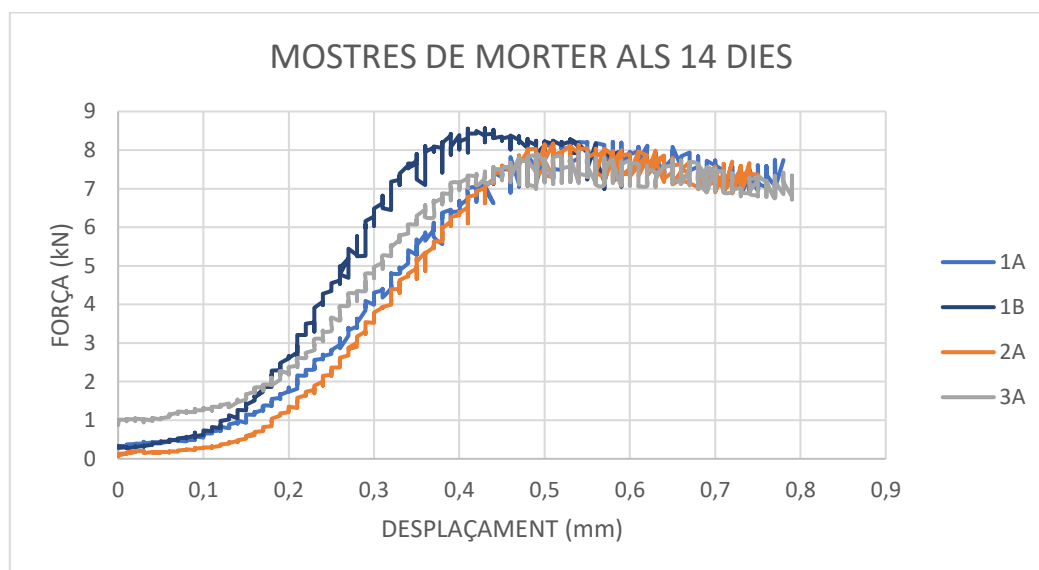
#### a) Densitat

En l'apartat 2.2.2.2.a. s'ha determinat que la densitat del morter de calç és de  $1.900\text{Kg/m}^3$ .

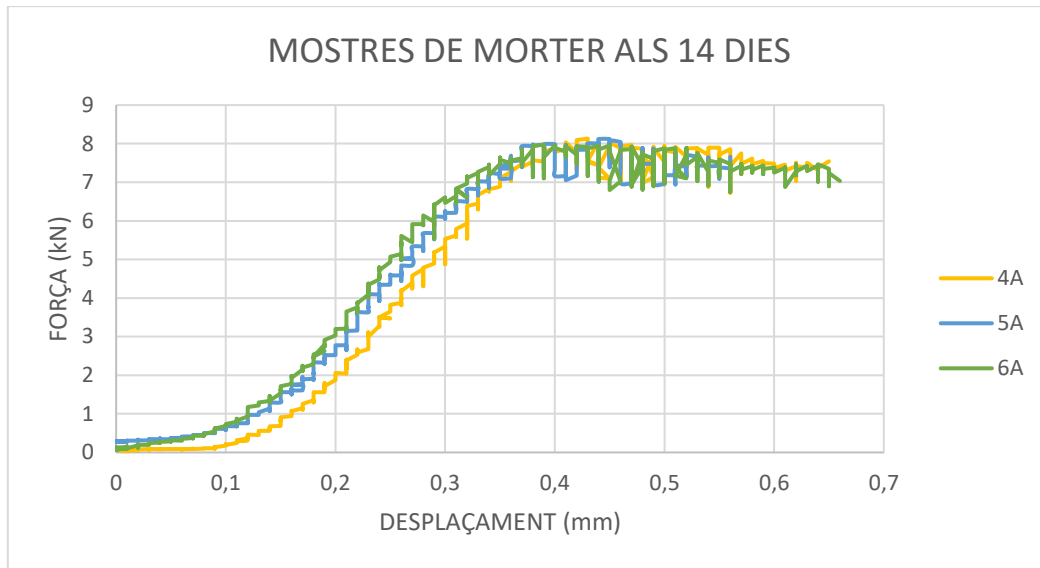
#### b) Resistència a compressió

Per comprovar la resistència a compressió del morter, s'ha realitzat un seguiment de la resistència a compressió que adquireix el morter segons els dies que aquest ha estat fraguant.

La superfície de contacte entre la premsa i les mostres de morter és de  $40 \times 40\text{mm}$ , per tant de  $1.600\text{mm}^2$ . Es va comprovar quina és la resistència que s'obté als 14, 21 i 27 dies:



Gràfica 008. Trencament de les mostres de morter a 14 dies (de la 1 a la 3)

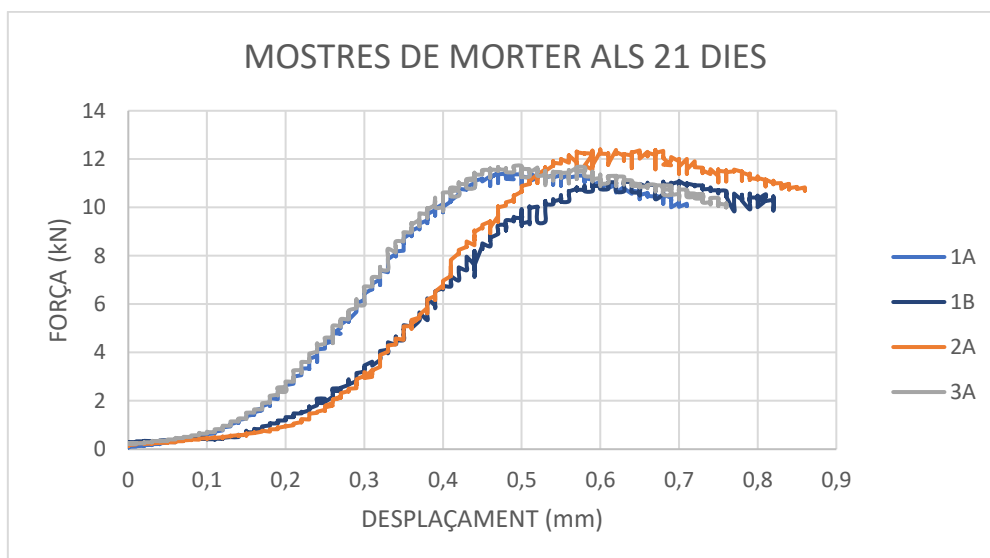


Gràfica 009. Trecament de les mostres de morter a 14 dies (de la 4 a la 6).

	Força	Tensions
1A	8,21 kN	5,13 MPa
1B	8,56 kN	5,35 MPa
2A	8,17 kN	5,11 MPa
3A	7,96 kN	4,97 MPa
4A	8,13 kN	5,08 MPa
5A	8,13 kN	5,08 MPa
6A	7,98 kN	4,98 MPa

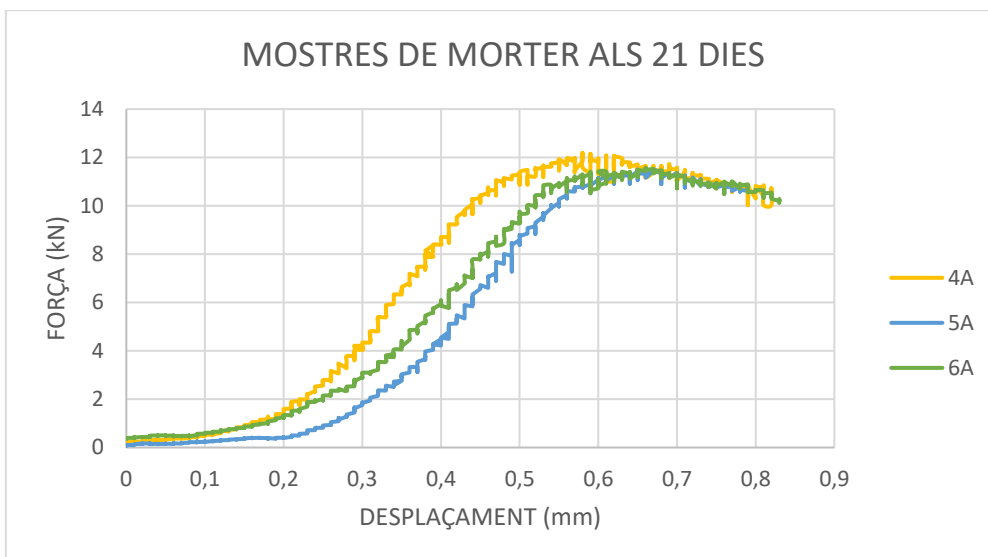
Taula 013. Forces i tensions màximes aplicades en les mostres de morter a 14 dies.

La mitjana geomètrica de la resistència a compressió del morter de calç una vegada han transcorregut 14 dies és 5,10 MPa.



Gràfica 010. Trecament de les mostres de morter a 21 dies (de la 1 a la 3).



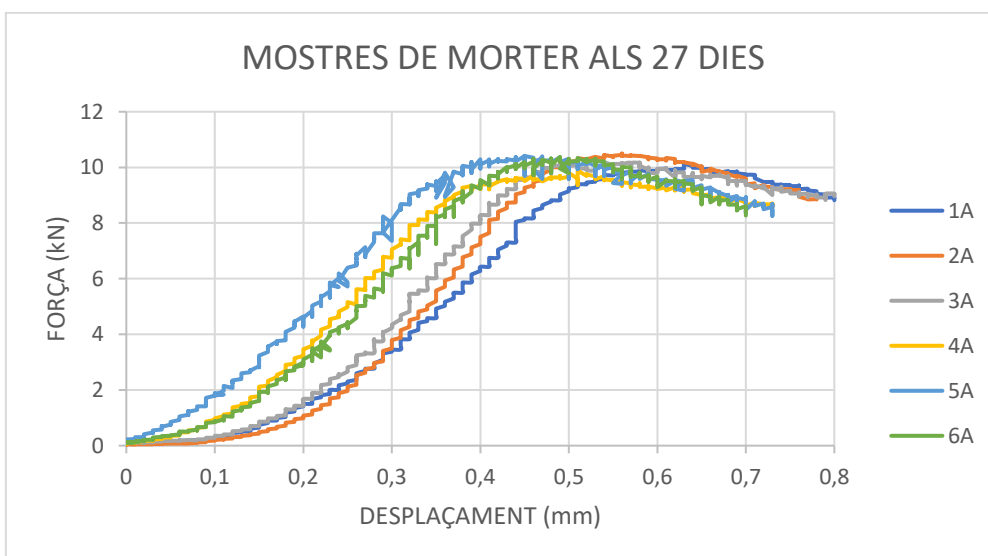


Gràfica 011. Trecament de les mostres de morter a 21 dies (de la 4 a la 6).

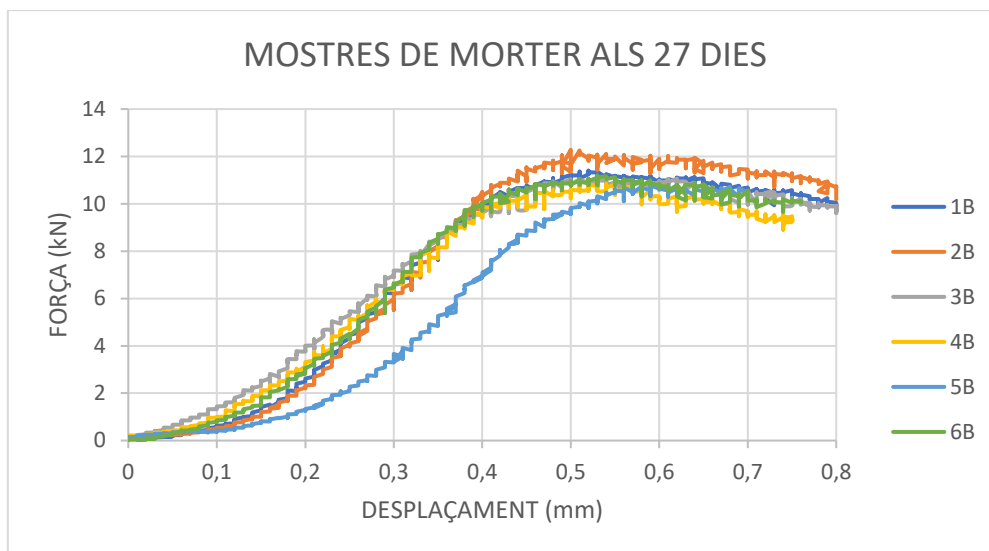
	Força	Tensions
1A	11,44 kN	7,15 MPa
1B	11,10 kN	6,93 MPa
2A	12,40 kN	7,75 MPa
3A	11,71 kN	7,32 MPa
4A	12,18 kN	7,62 MPa
5A	12,18 kN	7,62 MPa
6A	11,56 kN	7,22 MPa

Taula 014. Forces i tensions màximes aplicades en les mostres de morter a 21 dies.

La mitjana geomètrica de la resistència a compressió del morter de calç una vegada han transcorregut 21 dies és 7,37 MPa.



Gràfica 012. Trecament de les mostres A de morter a 27 dies.



**Gràfica 013.** Trencament de les mostres B de morter a 27 dies.

	Força	Tensions
1A	10,12 kN	6,33 MPa
2A	10,50 kN	6,56 MPa
3A	10,16 kN	6,35 MPa
4A	9,89 kN	6,18 MPa
5A	10,37 kN	6,48 MPa
6A	10,38 kN	6,49 MPa
1B	11,40 kN	7,12 MPa
2B	12,28 kN	7,68 MPa
3B	11,07 kN	6,92 MPa
4B	10,83 kN	6,77 MPa
5B	10,78 kN	6,74 MPa
6B	11,19 kN	7,00 MPa

**Taula 015.** Forces i tensions màximes aplicades en les mostres de morter a 27 dies.

La mitjana geomètrica de la resistència a compressió del morter de calç una vegada han transcorregut 27 dies és 6,71 MPa.

Sorprenentment, les mostres assajades als 21 dies tenen una resistència a compressió admissible major que les mostres assajades als 27 dies.

S'agafarà com a resistència a compressió la dels 21 dies, 7,37 MPa, a l'hora de fer el modelatge del mur d'obra de fàbrica, ja que els assajos es realitzaran aproximadament 21 dies després de les construccions.

### c) Mòdul d'elasticitat

Per obtenir el mòdul d'elasticitat del morter s'ha utilitzat les dades de la mostra 2A concretament el tram comprès entre els 0,25 i 0,50 mm. S'ha utilitzat aquest tram ja que és la zona on s'aproxima més que un augment de tensió a la peça representa un augment proporcional de la deformació. Quan la peça s'ha deformat 0,25mm, l'esforç aplicat era de 4,27 kN (2,67 MPa), mentre que quan la peça

s'ha deformat 5,00 mm, l'esforç aplicat era de 11,38 kN (7,11 MPa). Per tant si la longitud inicial de la peça és de 40mm i la canvi de longitud és de 0,25mm, el mòdul elàstic,  $E_m$ , obtingut és de 710,40 MPa, com es pot comprovar en la taula 016:

	DESPLAÇAMENT	$\sigma$	$\epsilon$	E
	0,25 mm	2,67 MPa		
	0,50 mm	7,11 MPa		
DIFERENCIA	0,25 mm	4,44 MPa	0,01 mm	710,40 MPa

**Taula 016.** Càlcul del mòdul d'elasticitat del morter de calç a utilitzar.

En l'apartat 2.2.2.2.a. s'havia comentat que en el Codi UIC-778/3 donaven com a valors orientatius que el mòdul d'elasticitat del morter de calç aèria és de 400-1.000 Mpa. Com s'ha comprovat el nostre morter està dins d'aquest rang.

#### **d) Coeficient de Poisson**

En l'apartat 2.2.2.2.b. s'ha comentat que el coeficient de Poisson en morter es sol agafar com a referència  $\mu_m = 0,20$ , per tant utilitzarem aquesta dada en el model amb el programa ANSYS.

#### **e) Resistència a tracció i tallant**

La resistència a tracció no s'ha assajat en aquest projecte, però és necessari obtenir un valor aproximat per introduir-lo al model amb ANSYS.

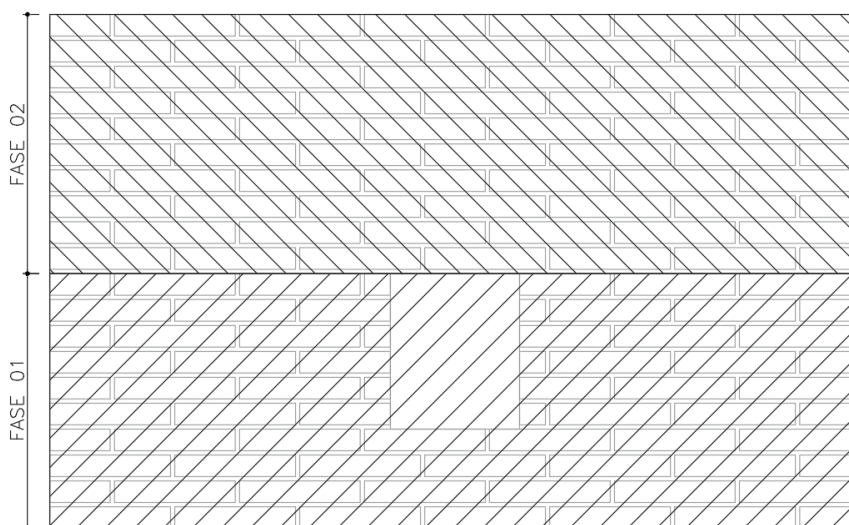
Per a la modelització del mur d'obra de fàbrica, el valor de resistència a tracció serà 10 vegades menor a la resistència a compressió. Per tant, la resistència a tracció serà de 0,75 MPa.

#### 4.4. CONSTRUCCIÓ DE PROVETES I MURS

Es va plantejar la construcció dels murs i les provetes de fàbrica de tal forma que a l'hora d'assajar cada element, els morters d'aquests tinguessin el mateix temps de fraguat, per tal de poder relacionar els resultats de forma més concisa.

La construcció dels murs és massa laboriosa com per fer-la en un sol dia. Per tant, el que es va optar és en dividir la construcció dels murs en 2 fases:

- El que es cerca en aquest projecte és l'estudi de les tensions que es transmeten en la zona del mur situada entre els perfils metàl·lics, tal i com es s'ha mostrat en la imatge 020 del apartat 4.1.2. Per tant, el temps que d'enduriment del que hi ha per sota d'aquesta zona no ens influeix de forma significativa.
- Per tant, primer es construirà la primera fase dels tres murs, les bases dels murs, definida en la imatge 057, de forma continuada.
- Un cop acabades les bases dels tres murs, es procedeix a la construcció de la segona fase dels murs i les provetes de fàbrica de forma alternada (segona fase mur 01, proveta 01, segona fase mur 02, proveta 02, segona fase mur 03, segona fase mur 03). En la taula 017 es pot veure la planificació de la construcció d'aquests elements.



**Imatge 057.** Indicació de les fases de construcció dels murs.

		Dilluns	Dimarts	Dimecres	Dijous	Divendres	Ds/Dm	
MAIG	Matí		1	2	3	4	5 6	
	Tarda							
	Matí	7	8	9	10	11	12 13	
	Tarda	Base Mur 01	Base Mur 01	Base Mur 02	Base Mur 02			
	Matí	14	15	16	17	18	19 20	
	Tarda		Base Mur 03					
	Matí	21	22	23	24	25	26 27	
	Tarda		Base Mur 03					
	Matí	28	29	30	31	1	2 3	
	Tarda							
	JUNY	Matí	4	5	6	7	8	9 10
		Tarda						
Matí		11	12	13	14	15	16 17	
Tarda		Fi Mur 1						
Matí		18	19	20	21	22	23 24	
Tarda		Paret 01	Fi Mur 2	Paret 02	Fi Mur 3			
Matí		25	26	27	28	29	30 1	
Tarda		Paret 03						

Taula 017. Calendari amb les construccions realitzades.

Seguidament, es procedeix a mostrar de forma gràfica la construcció dels murs i les provetes els dies mostrats en la taula 017:

a) **Construcció Base Mur 01**



Imatge 058. Construcció de la base del mur 01, fase 1 (01).



Imatge 059. Construcció de la base del mur 01, fase 1 (02).

b) **Construcció Base Mur 02**



**Imatge 060.** Construcció de la base del mur 02, fase 1 (01).



**Imatge 061.** Construcció de la base del mur 02, fase 1 (02) [esquerra], al costat de la base del mur 01 [dreta].



**Imatge 062.** Construcció de la base del mur 02, fase 1 (03).



**Imatge 063.** Construcció de la base del mur 02, fase 1 (04).

c) Construcció Base Mur 03



**Imatges 064 i 065.** 064 - Construcció de la base del mur 03, fase 1 (01).  
065- Demostració de la realització de les provetes de morter.



**Imatge 066.** Zona de treball a l'hora de construir la base del mur 03, fase 01 [mur posterior], al costat del mur 01 [mur davanter].



**Imatge 067.** Construcció de la base del mur 03, fase 1 (02).



**Imatges 068 i 069.** 068- Comprovació de l'anivellació del mur a l'hora de col·locar les peces.  
069- Utilització de la formigonera per elaborar el morter de calç.



**Imatge 070.** Construcció de la base del mur 03, fase 1 (03).



**Imatges 071 i 072.** 071- Construcció de la base del mur 03, fase 1 (04).  
072- Construcció de la base del mur 03, fase 1 (05).



**d) Construcció Mur 01**



**Imatges 073 i 074.** 073- Construcció del mur 01, fase 2 (01).  
074- Construcció de la base del mur 01, fase 2 (02).

**e) Construcció Proveta 01**



**Imatge 075.** Construcció de la proveta 01 (01).



**Imatges 076 i 077.** 076- Construcció de la proveta 01 (02).  
077- Construcció de la proveta 01 (03).

f) **Construcció Mur 02**



**Imatges 078 i 079.** 078- Construcció del mur 02, fase 2 (01).  
079- Construcció de la base del mur 02, fase 2 (02).

g) **Construcció de Proveta 02**



**Imatge 080.** Construcció de la proveta 02 [proveta davantera], al costat de la proveta 01 [proveta posterior] .



**Imatge 081.** Construcció de la proveta 02.

**h) Construcció Mur 03**



**Imatges 082 i 083.** 082- Construcció del mur 03, fase 2 (01).  
083- Construcció de la base del mur 03, fase 2 (02).



**Imatge 084.** Construcció acabada del mur 02 [davanter], mur 01 [centre] i mur 03 [posterior].

**i) Construcció de Proveta 03**



**Imatge 085.** Construcció de la proveta 03.

#### 4.5. MODELITZACIÓ AMB ANSYS

Les característiques elegides per als materials necessàries per crear el model amb el programa ANSYS, exposats en els apartats 4.3.1. i 4.3.2., son les següents :

- **Ceràmica**

- Densitat: 2.300 Kg/m<sup>3</sup>.
- Resistència a compressió: 27,10 MPa.
- Resistència a tracció: 2,75 MPa.
- Mòdul de Poisson: 0,17.
- Mòdul d'elasticitat: 73.000 MPa.

- **Morter**

- Densitat: 1.900 Kg/m<sup>3</sup>
- Resistència a compressió: 7,37 MPa.
- Resistència a tracció: 0,75 MPa.
- Mòdul de Poisson: 0,20.
- Mòdul d'elasticitat: 710,40 MPa.

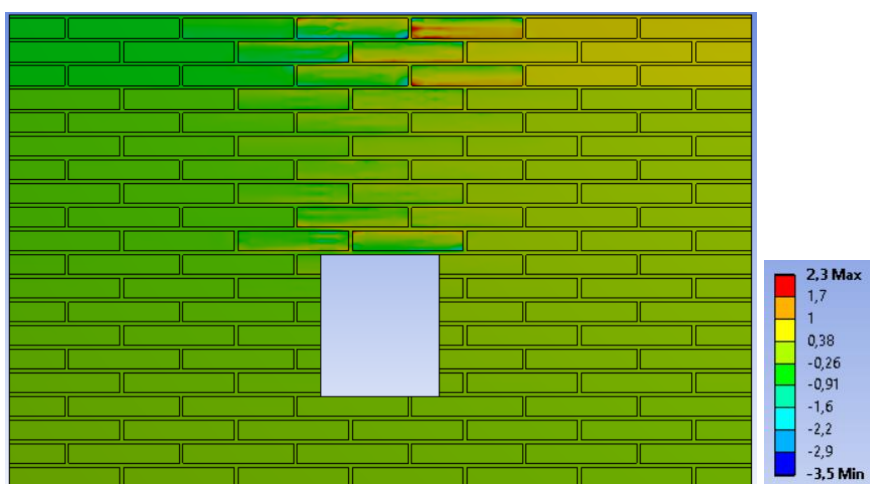
Es procedeix a mostrar els resultats obtinguts amb Ansys

**a) Deformacions**

Els resultats de la deformació es poden obtenir com a deformació total o deformació direccional. Ambdues s'utilitzen per obtenir desplaçaments de tensions. La principal diferència és que la deformació direccional calcula les deformacions en els plans X, Y i Z d'un sistema donat, i la deformació total dona una arrel quadrada de la suma del quadrat de la direcció x, la direcció y i la direcció z.

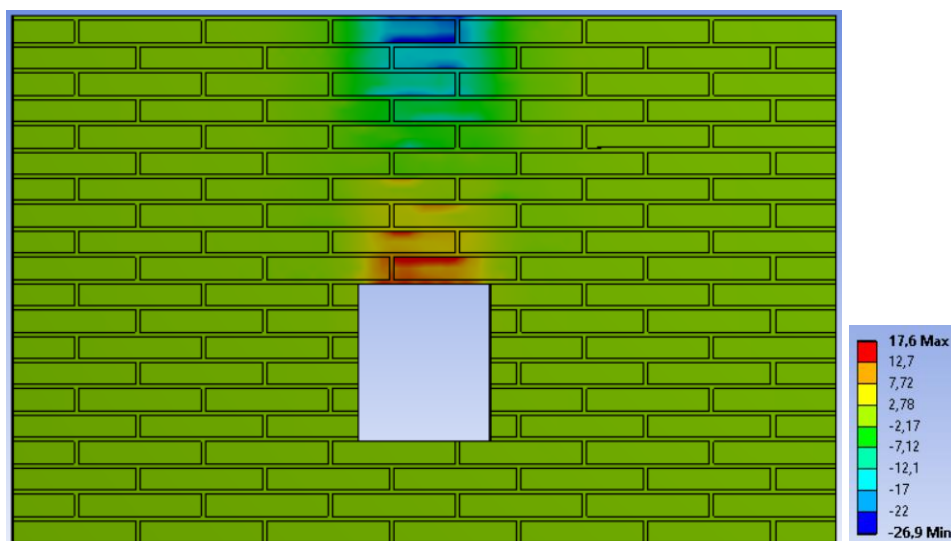
**a.1) Deformació direccional**

En la imatge 086, es pot observar les deformacions produïdes en el mur respecte l'eix x, l'eix horitzontal. El desplaçament horitzontal dels elements és poc si es compara amb el desplaçaments respecte l'eix vertical, arribant a desplaçar-se fins a 2,30 mm.



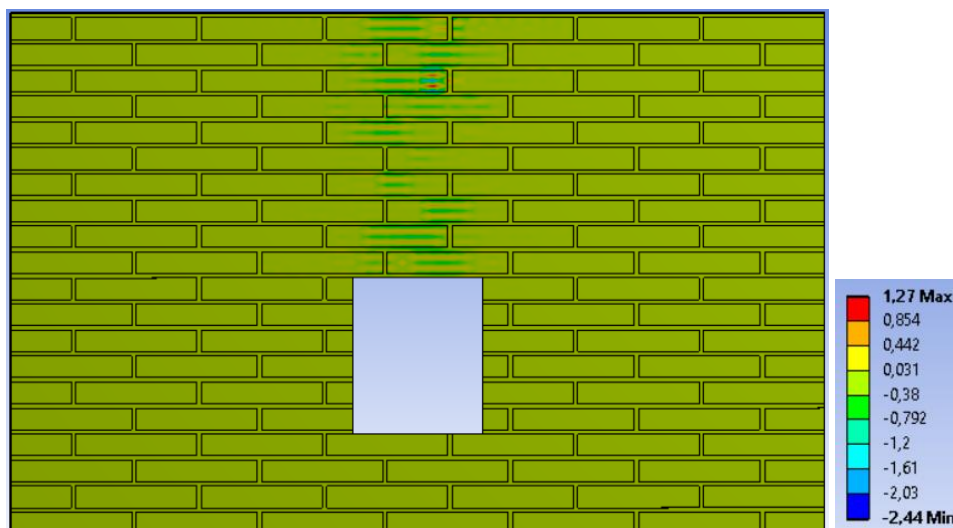
**Imatge 086.** Deformacions direccional en el sentit de l'eix x generades en el model, en mm.

En la imatge 087, es pot observar les deformacions produïdes en el mur respecte l'eix y, l'eix vertical. Aquest eix és la direcció a la que més afecten les direccions de les tensions, ja que la força s'aplica en aquest sentit. Com es pot observar, la part superior del mur arriba a baixar fins a 17,60 mm.



**Imatge 087.** Deformacions direccional en el sentit de l'eix y generades en el model, en mm.

En la imatge 088, es pot observar les deformacions produïdes en el mur respecte l'eix z, l'eix transversal. Aquest eix és la direcció a la que menys afecten les direccions de les tensions, arribant com a màxim a una deformació de 1,27mm. Aquestes deformacions es produeixen per la constant elàstica, coeficient de Poisson, on al comprimir els materials verticalment, aquests es traccionen en les altres direccions.

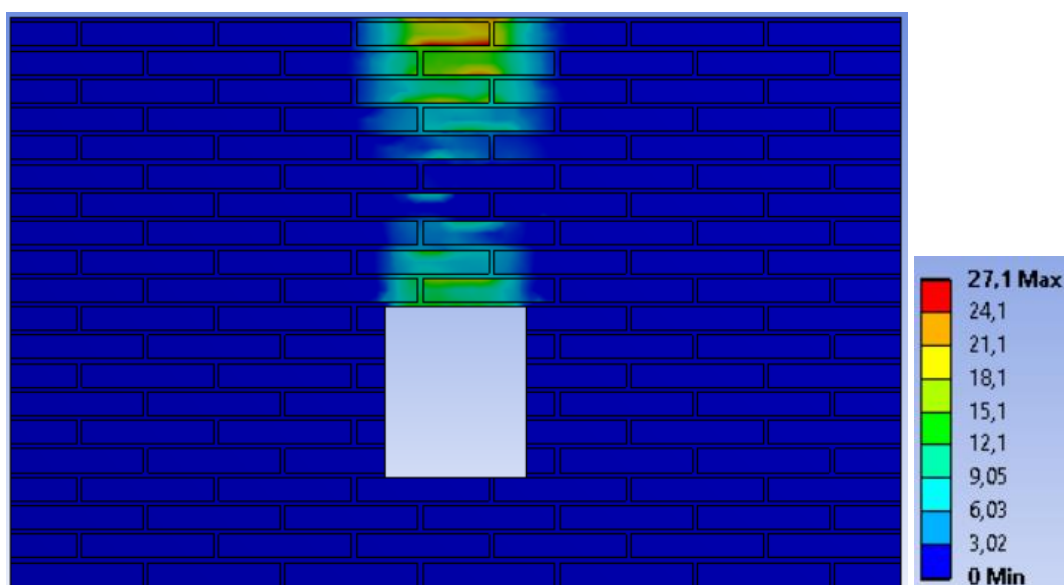


**Imatge 088.** Deformacions direccional en el sentit de l'eix z generades en el model, en mm.

### a.2) Deformació total

Com es pot veure en la Imatge 089, la zona on es deforma del mur és en les peces de les 3-4 filades més pròximes d'on es transmet la força. Les unitats de la llegenda són mil·límetres.

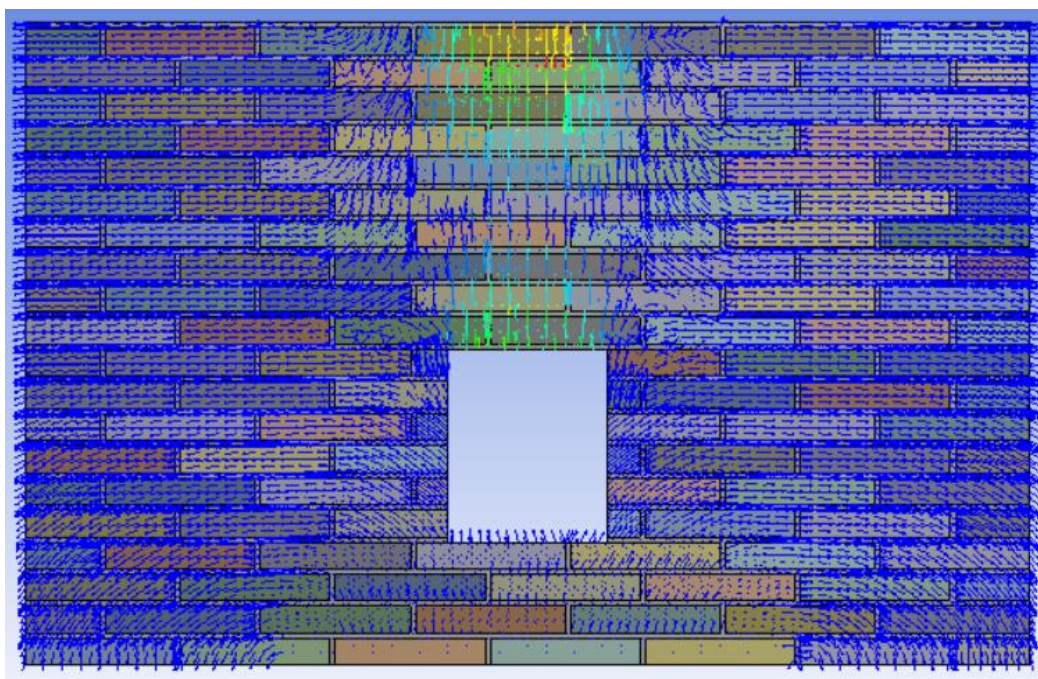
La zona superior queda marcada com la que més deformació pateix el mur, i en concret la unió de la peça superior amb el llit de moreter, arribant fins a 27,10mm.



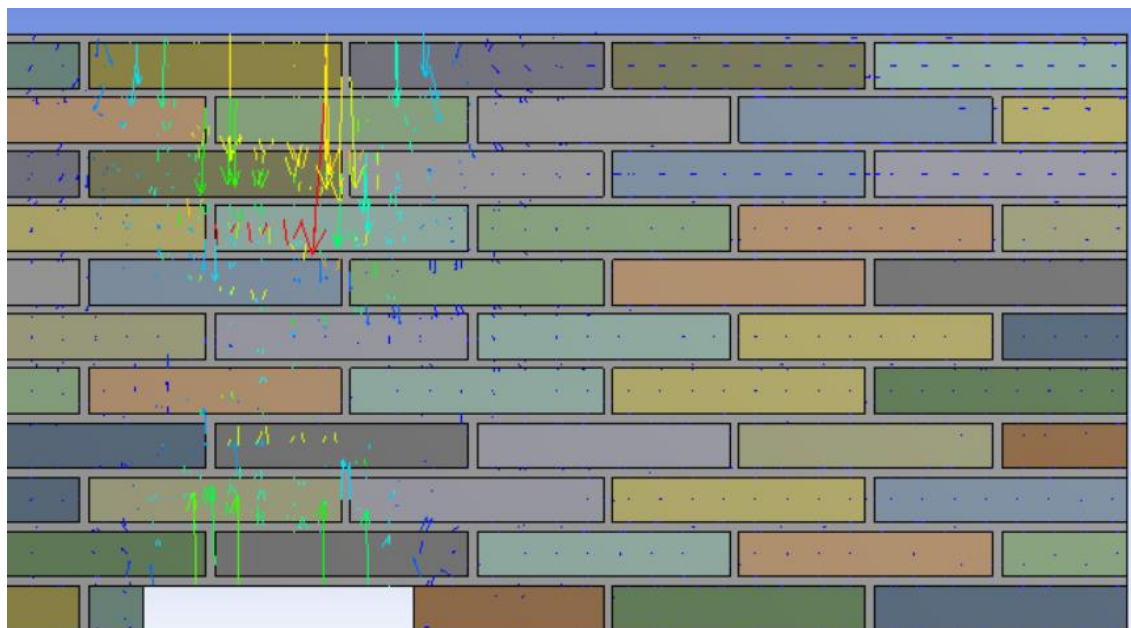
**Imatge 089.** Deformacions totals generades en el model, en mm .

En les imatges 090, 091 i 092, es poden veure les distribucions de les tensions al llarg del mur. Les imatges 091 i 092 estan enfocades en la zona on s'estudiarà amb rosetes extensomètriques el mur 03, explicat en l'apartat 5.6.3.

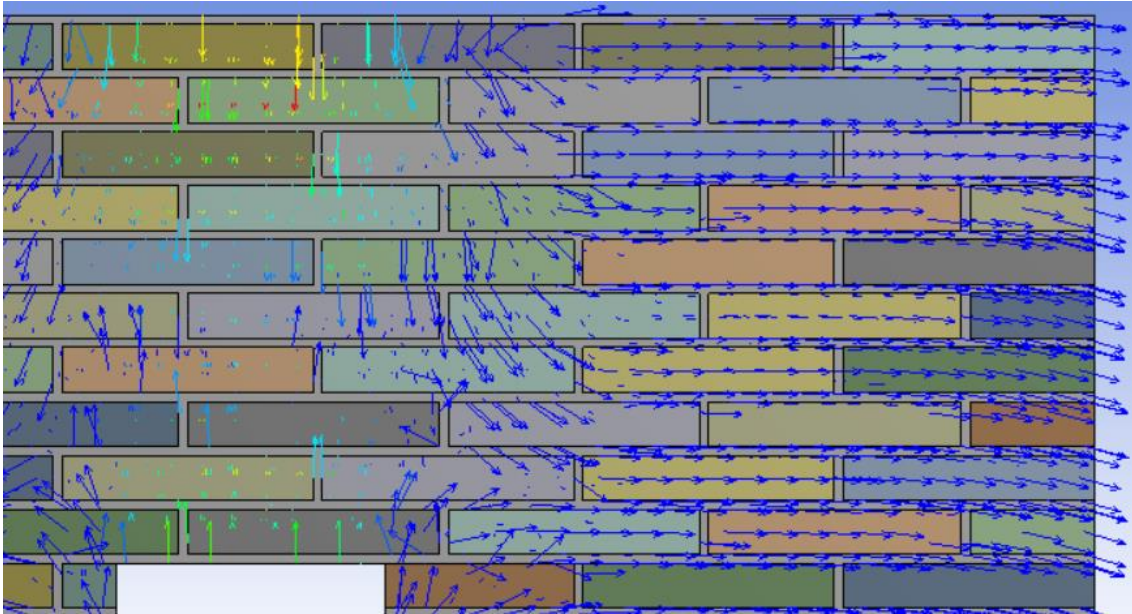
Les fletxes de direcció en la imatge 091, estan escalades segons la deformació patida del mur, mentre que les totes les fletxes de direcció de la imatge 092 són iguals, per observar millor aquestes direccions.



**Imatge 090.** Distribució de les deformacions generades en el model, en mm .



**Imatge 091.** Detall de la distribució de les deformacions generades en el model, en mm, a escala .



**Imatge 092.** Detall de la distribució de les deformacions generades en el model, en mm.

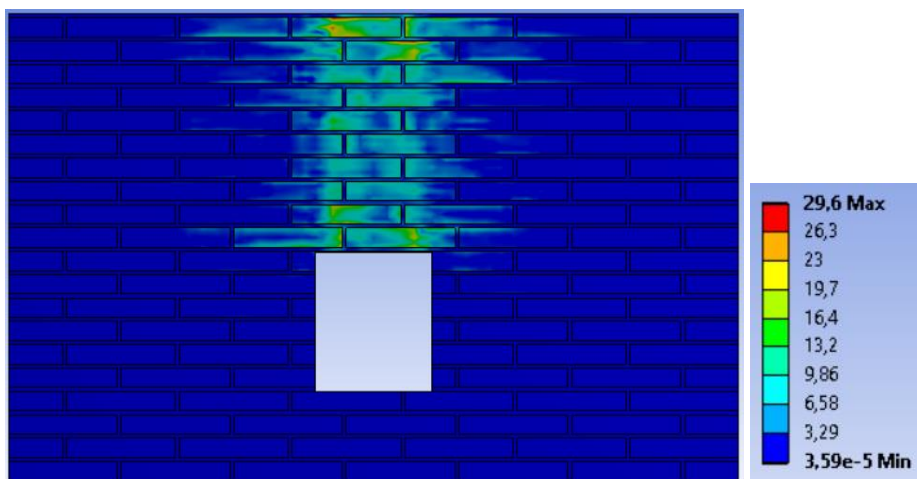
Com es pot observar, les distribucions de les deformacions es generen sobretot en la zona compresa entre els punts on s'apliquen les càrregues, sent pràcticament vertical. Quant més ens allunyem d'aquesta zona, les deformacions tendeixen a distribuir-se de forma horitzontal, i sent aquestes mínimes comparades amb les que es produeixen en el centre.

### b) Tensió equivalent

La tensió equivalent (també anomenada Tensió de Von Mises) permet que qualsevol estat de tensió tridimensional sigui representat com un únic valor tridimensional. La teoria exposa que un material comença a cedir en una ubicació quan la tensió de von Mises és igual al límit de tensió.

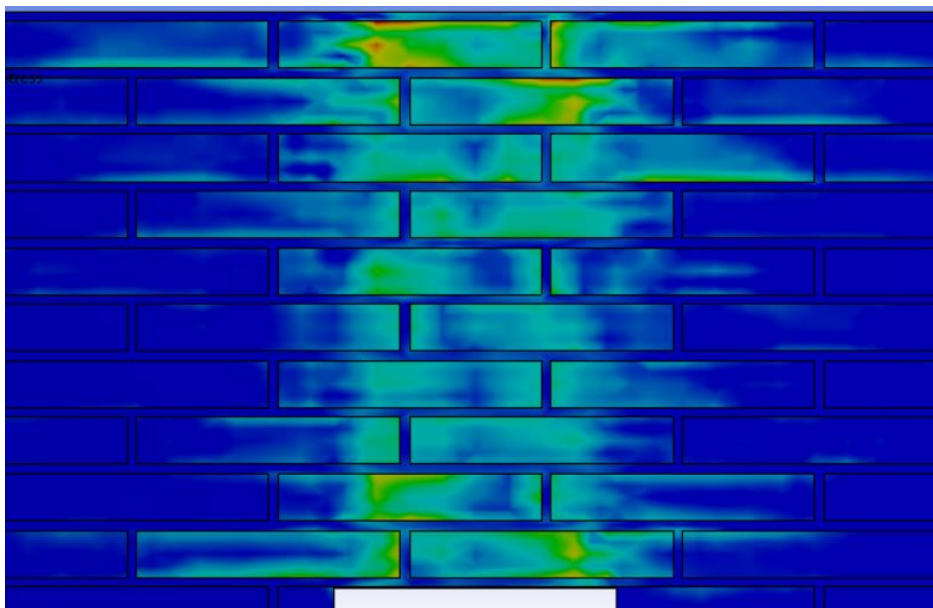
La tensió equivalent es relaciona amb les tensions principals de l'equació:

$$\sigma_e = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2}$$



**Imatge 093.** Tensió equivalent en els elements del model, en MPa.





**Imatge 094.** Detall de la zona on es concentra la tensió equivalent en els elements del model, en MPa.

Com es pot veure en la imatge, les tensions de Von Misses es concentren principalment en el centre de la zona d'estudi i sobretot en les peces properes a la zona d'aplicació de les càrregues. En aquesta zona la tensió equivalent és majoritàriament entre 6,58 i 19,7 MPa, arribant fins a 29,60 MPa en algunes zones puntuals de les peces.

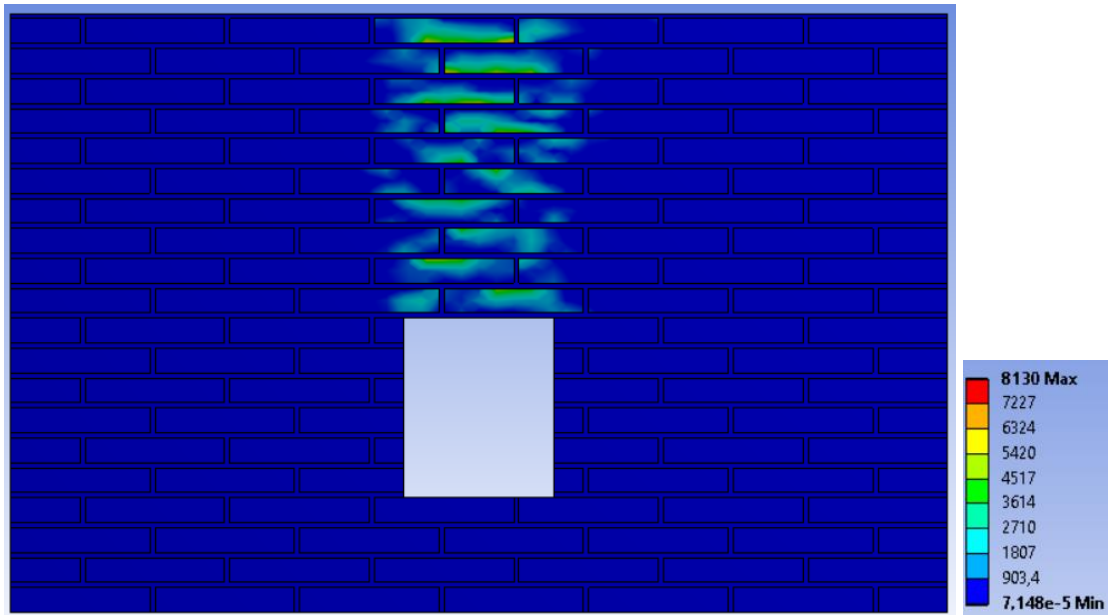
### **c) Criteri de falla**

Els criteris de falla donen informació de quin és l'inici de dany que es produeix en els elements, ajudant a determinar quanta més càrrega pot gestionar el material.

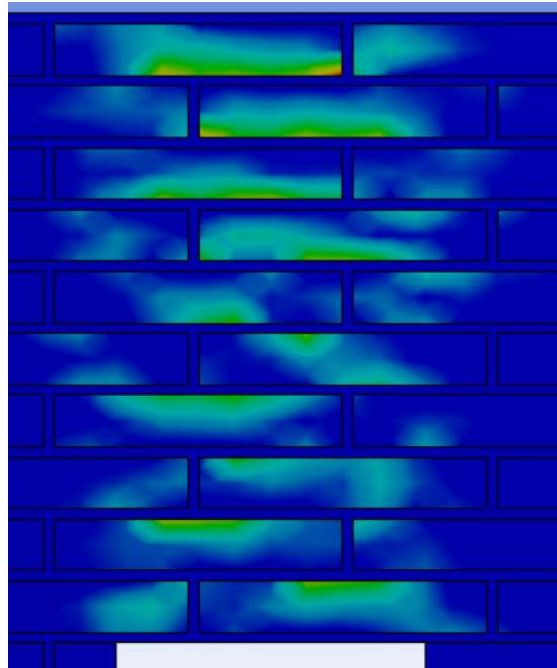
#### **c.1) Criteri de falla de compressió de la matriu**

Els resultats de Criteri de falla de compressió de matriu informen de quines zones no aguanten la resistència a compressió que s'aplica i, per tant, quines zones quedaran danyades.

Els valors que proporciona el programa són unitats adimensionals, i números positius. Un valor de 0 indica que no hi falla, mentre que 1 és una falla completa. Un valor superior a 1 indica que el material ha fallat completament. Com més gran sigui aquest nombre, més gran serà la càrrega per sobre dels límits prescrits.



**Imatge 095.** Criteri de falla de compressió de la matriu.



**Imatge 096.** Detall de la zona on es concentra la falla de compressió de la matriu.

Com es poden veure en les imatges 095 i 096, pràcticament tota la zona d'estudi falla a compressió superant el límit per a que es produeixi la falla completa. Com podem observar, Les zones on es produeixen les falles en la unió de les peces amb el morter, en la cara oposada d'on s'exerceix la compressió:

- En les 5 filades superiors, les càrregues que s'apliquen a les peces es exercida pel pla superior i aquestes fallen en la cara del pla inferior.
- En les 5 filades inferiors, les càrregues que s'apliquen a les peces es exercida pel pla inferior i aquestes fallen en la cara del pla superior.

Sembla que quan s'apliquen les càrregues, les deformacions del mur es formen cap al centre de la zona d'estudi, quedant les peces en un estat a flexotracció, on la cara exterior de les peces, referent al centre de la zona de l'estudi queda comprimida i la cara interior traccionada. La falla en les peces es produeix en les zones que queden traccionades.

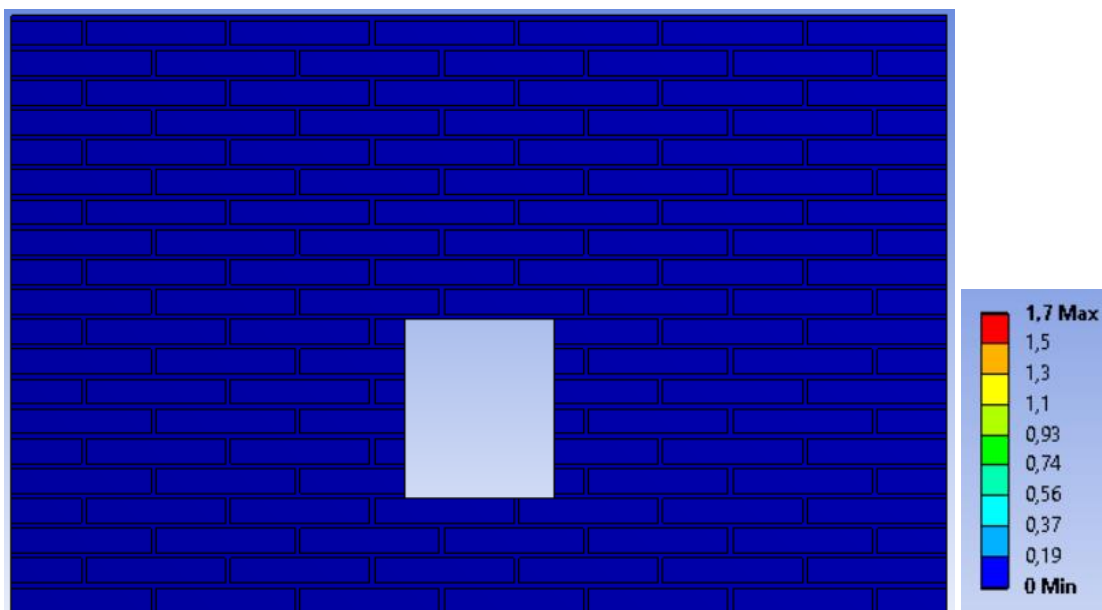
### c.2) Estat del dany

Les variables que ens proporciona una idea d'on es troba el dany en els elements i la seva possible direcció de propagació.

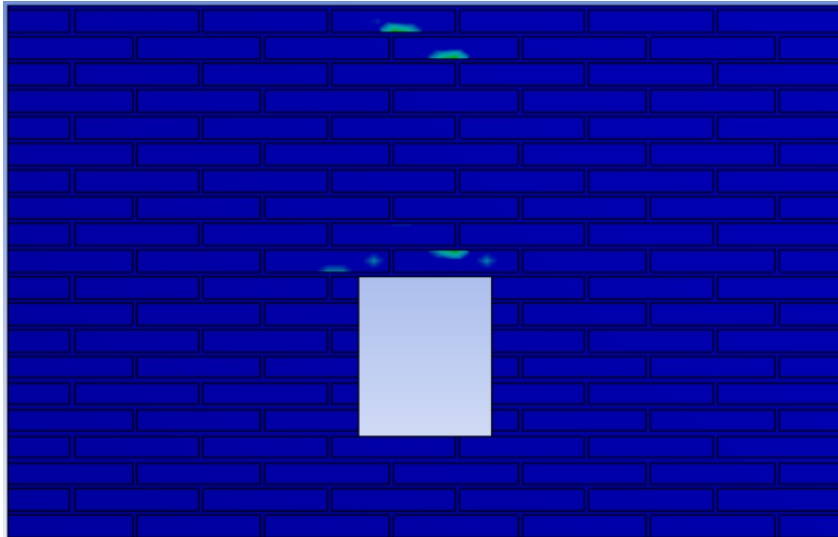
Els valors que proporciona el programa son unitats adimensionals, i números positius. Els valors que indica la llegenda van del 0 al 2, on:

- 0 indica que no hi ha danys en els elements
- 1 indica que els elements estan parcialment danyats.
- 2 indica que els elements estan completament danyats.

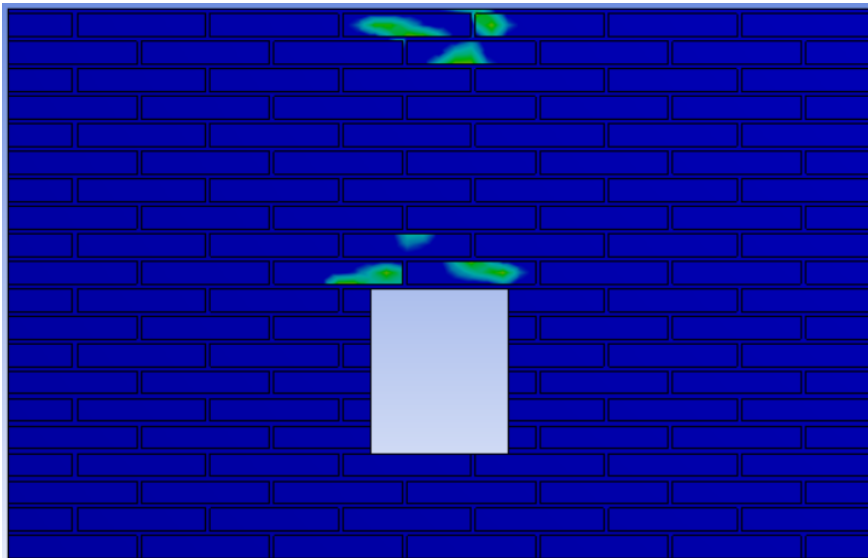
A continuació es pot veure la progressió de l'estat del dany aplicat en el mur a mesura que s'augmenten les forces aplicades



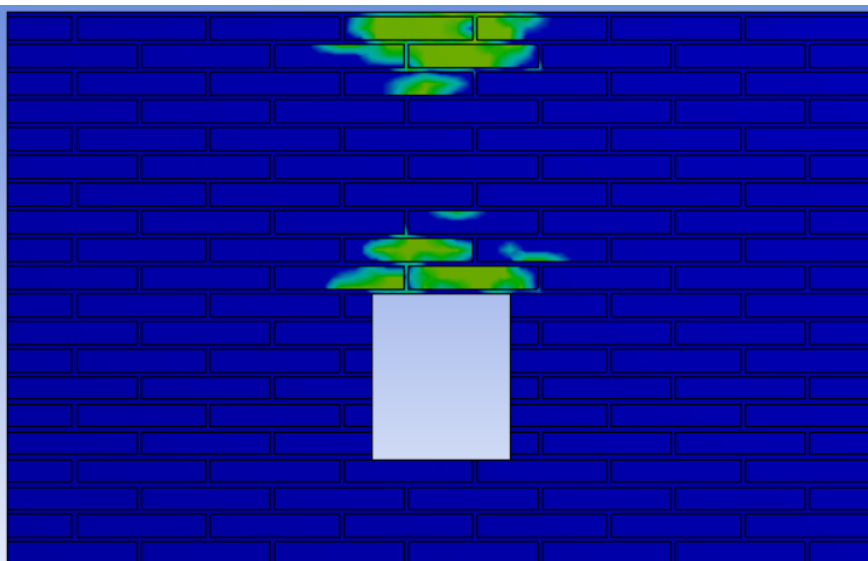
**Imatge 097.** Dany total en el model.



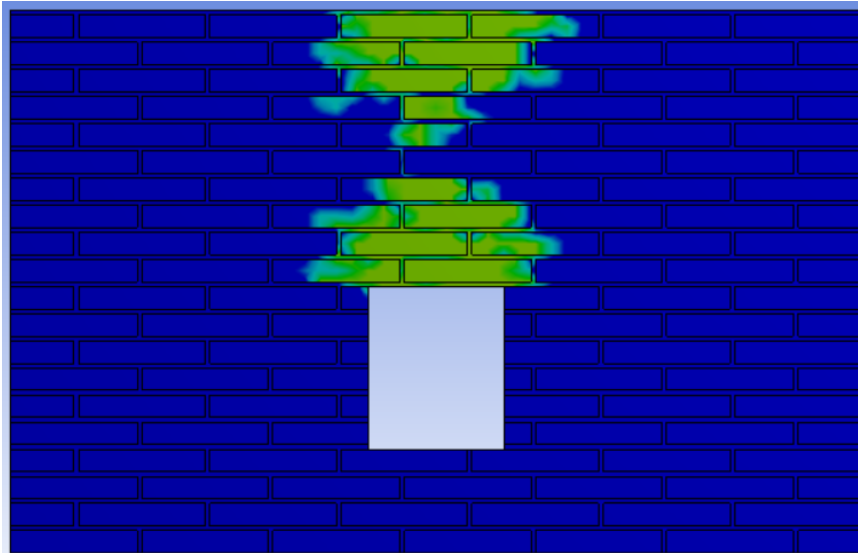
**Imatge 098.** Estat del dany quan s'apliquen 27 kN.



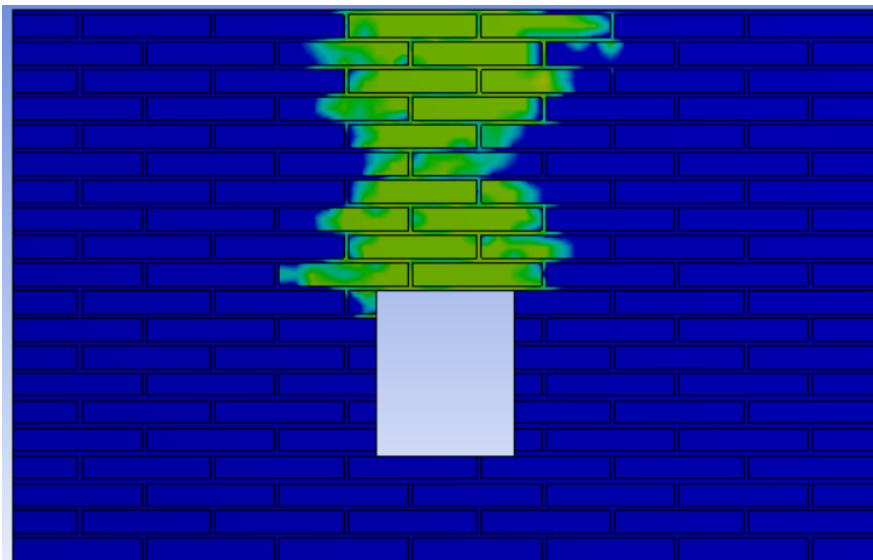
**Imatge 099.** Estat del dany quan s'apliquen 37 kN.



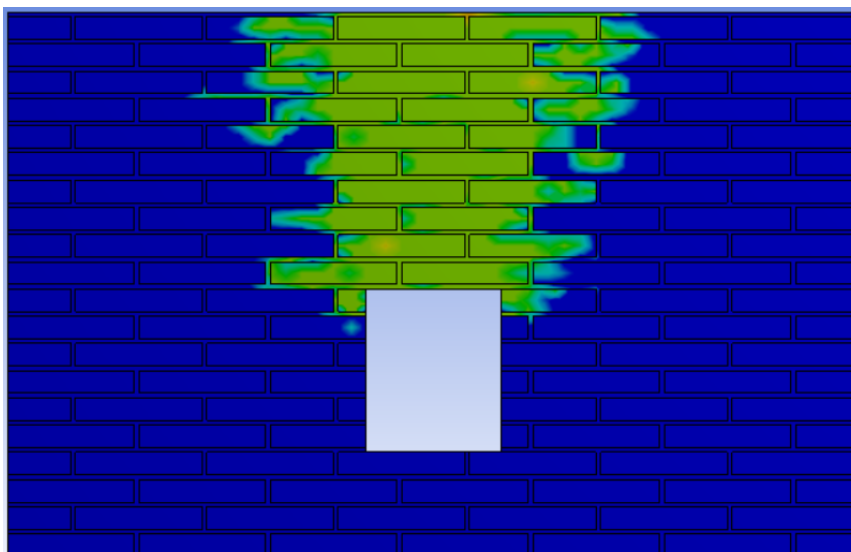
**Imatge 100.** Estat del dany quan s'apliquen 47 kN.



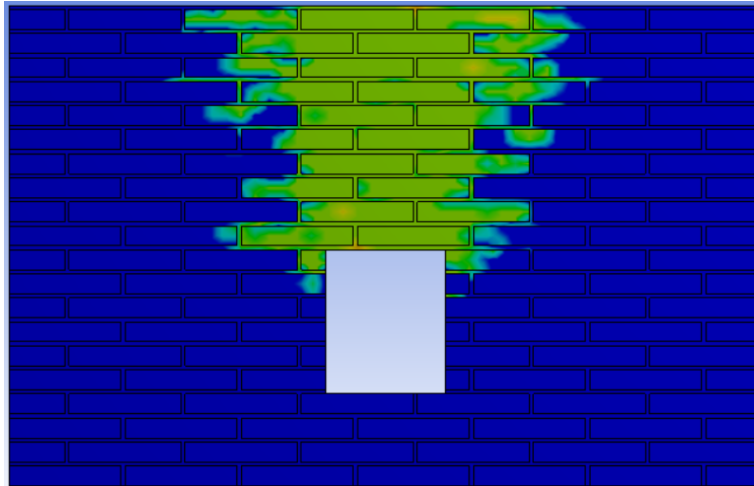
**Imatge 101.** Estat del dany quan s'apliquen 64 kN.



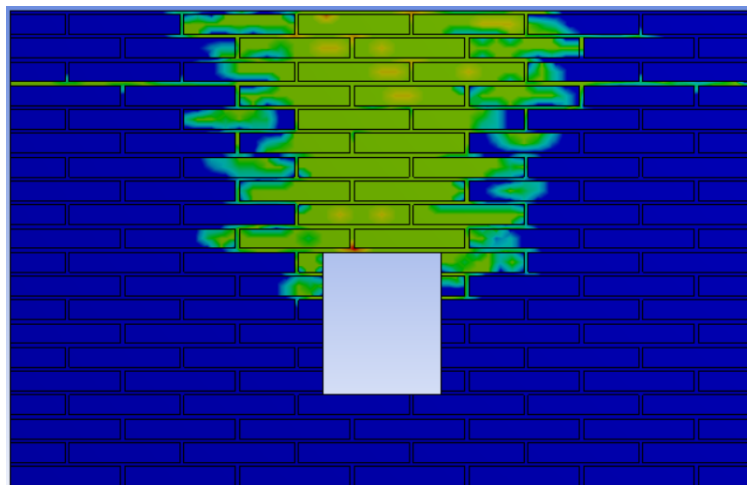
**Imatge 102.** Estat del dany quan s'apliquen 74 kN.



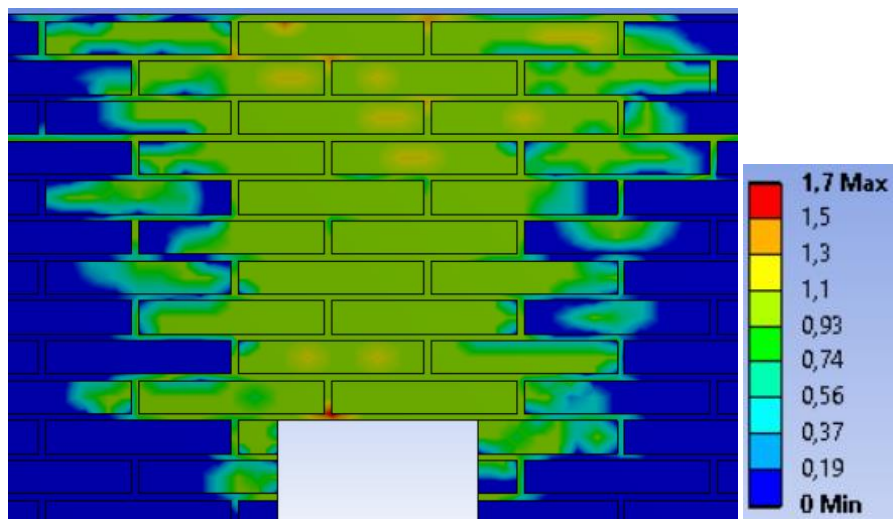
**Imatge 103.** Estat del dany quan s'apliquen 92 kN.



**Imatge 104.** Estat final del dany, quan s'apliquen 119kN.



**Imatge 105.** Estat final del dany, quan s'apliquen 174 kN.



**Imatge 106.** Detall de l'estat final del dany aplicat al mur.

En les imatges es pot comprovar que la zona d'estudi queda danyada per les tensions sotmeses. Segons la llegenda, quasi tota la zona queda al voltant del valor 1, per tant, tots els elements de la zona queden parcialment danyats. Inclús, arriba a haver zones puntuals de les peces i morter amb valors de fins al voltant 1,70, en que ens indica que queden quasi completament danyats .

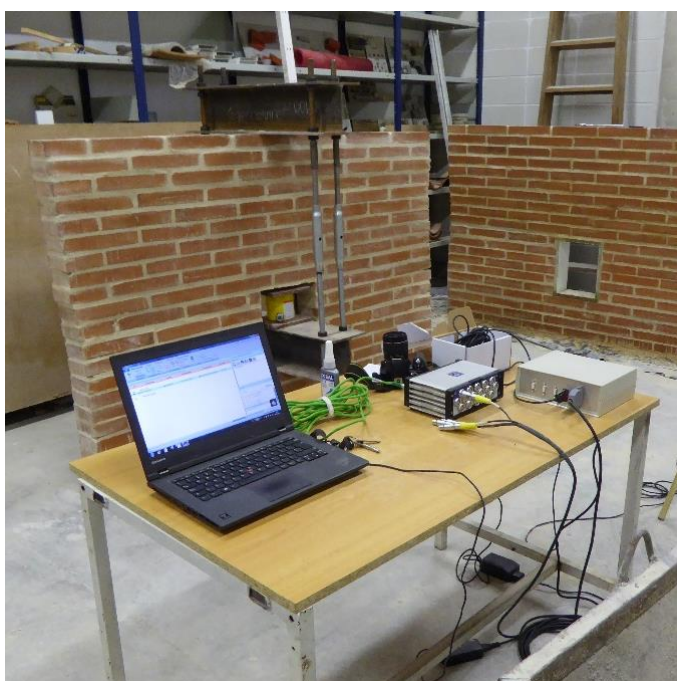
## 4.6. INSTRUMENTACIÓ

A continuació es procedeix a explicar la instrumentació utilitzada en cada mur per realitzar els seus assajos:

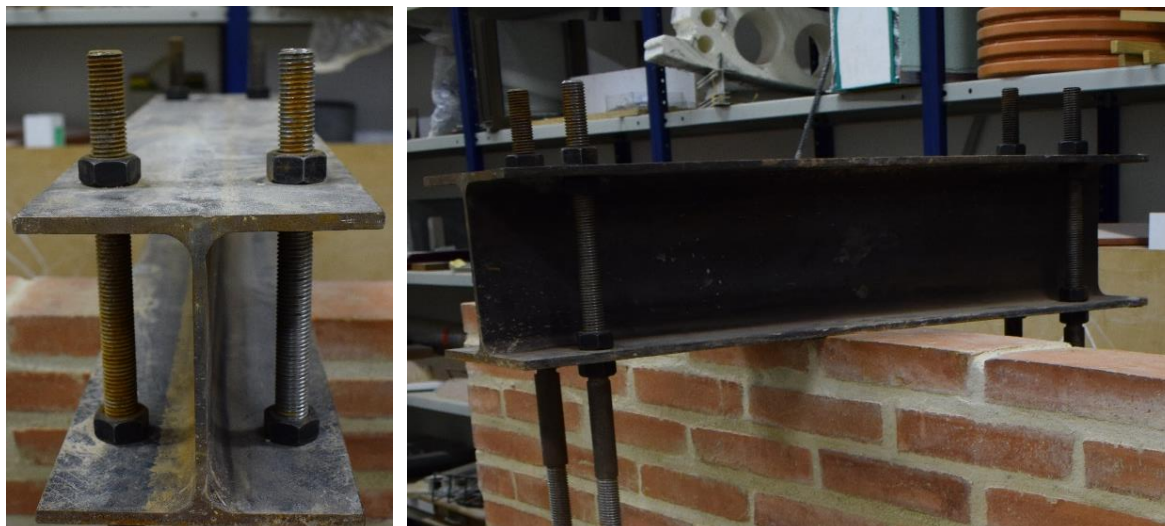
### a) Mur 01

En el trencament del mur 01 només es va examinar quina es la força necessària a aplicar per trencar el mur. A continuació s'explica quins components s'han utilitzat i quins passos s'han seguit per comprovar la seva resistència:

- Es va col·locar una HEB-200 en la part inferior, i una HEB-200 en la part superior.
- Els dos perfil queden connectats mitjançant barres d'acer, les quals queden cargolades als perfils com es pot veure en la imatge 109. El perfil inferior no està en contacte amb la base del buit, per evitar transmetre tensions fora de la zona d'estudi, explicada en l'apartat 4.1.2. amb la imatge 020, i obtenir uns resultats erronis.
- Sobre el perfil inferior es recolza un pistó, amb una àrea de  $62,10 \text{ cm}^2$ , el qual serà el que emeti les forces al mur.
- Entre el pistó i el mur s'ha col·locat una platina metàl·lica de  $20 \times 20 \text{ cm}$ . Per tant, en la part superior del mur hi haurà una zona de contacte de  $20 \times 14 \text{ cm}$  i en el buit una altra zona de contacte de  $20 \times 14 \text{ cm}$ , per on es transmetran les càrregues al mur.



**Imatges 107 i 108.** 107- Equip utilitzat per instrumentar el mur 01.  
108- Col·locació dels elements en el mur 01.



**Imatges 109 i 110.** 109- Detall biga recolzada sobre el mur 01 (01).  
110- Detall biga recolzada sobre el mur 01 (02).

### **b) Mur 02**

En el trencament del mur 02 es va examinar quina es la força necessària a aplicar per trencar el mur i a més, el desplaçament de la fàbrica tant en el sentit vertical com en el transversal:

- Per estimar les tensions admissibles de la fàbrica es va utilitzar el mètode explicat en l'apartat 4.6.a) Mur 01.
- Per comprovar el desplaçament de la fàbrica es van utilitzar transductors de desplaçament; Un transductor de desplaçament és un transductor elèctric usat per a mesurar la posició lineal de l'objecte mesurat, i per tant, el seu desplaçament al llarg d'un sol eix. La senyal de sortida del sensor de desplaçament lineal és el mesurament de la distància que un objecte s'ha desplaçat en unitats de mil·límetres.
- Per comprovar el desplaçament vertical es va col·locar un transductor de desplaçament en la zona superior del mur, en sentit vertical, com es pot veure en la imatge 112. Aquest transductor està desplaçat 18,50 cm del centre de la zona d'aplicació de les forces, ja que amb el perfil HEB-200 no es podia col·locar més centrat.
- Per comprovar el desplaçament transversal es va col·locar un transductor de desplaçament en el centre de la zona d'estudi de tensions explicada en l'apartat 4.1.2 amb la imatge 020.





**Imatges 111 i 112.** 111- Col·locació dels elements en el mur 02.  
112- Detall del transductor de desplaçament vertical.

### Mur 03

El mur 03 va ser l'element més estudiat de la companyia; S'ha examinat quina és la força necessària per trencar el mur, el desplaçament de l'obra de fàbrica tant en el sentit vertical com en el transversal, i a més, la distribució de les tensions en el mur:

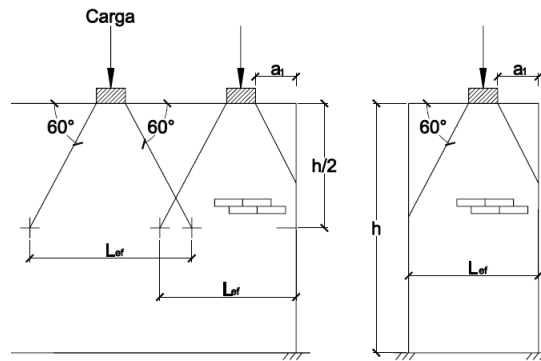
- Per estimar les tensions admissibles de la fàbrica es va utilitzar el mètode explicat en l'apartat 4.6.a) Mur 01.
- Per comprovar el desplaçament de la fàbrica s'ha utilitzat el mateix mètode que l'explicat en l'apartat 4.6.b) Mur 02. El transductor de desplaçament vertical va quedar desplaçat 14,50 cm del centre de la zona d'aplicació de les forces.
- Per estudiar la distribució de les tensions en el mur d'obra de fàbrica, es van utilitzar galgues i rosetes extensiomètriques:

- o Una galga extensiomètrica és un sensor que mesura la deformació i pressió, i es basa en l'efecte piezoresistiu, que és la propietat que tenen certs materials de canviar el valor nominal de la seva resistència quan se'ls sotmet a certs esforços i es deformen en direcció dels eixos mecànics. Un esforç que deforma la galga produirà una variació en la seva resistència elèctrica. Aquesta variació es produeix pel canvi de la seva longitud.

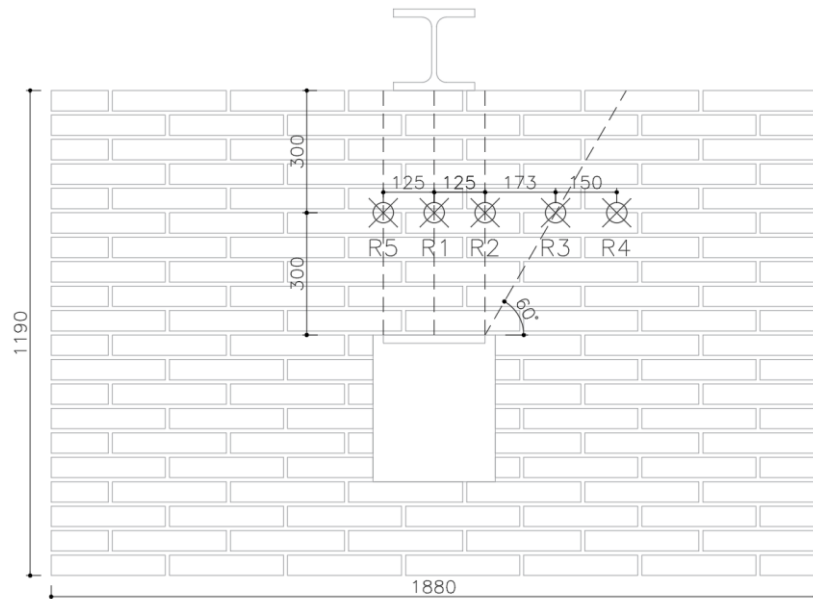
La galga extensiomètrica fa una lectura directa de les deformacions longitudinals en un cert punt del material que s'està analitzant. La unitat que el representa és el èpsilon ( $\epsilon$ ), que és adimensional i expressa el canvi de la longitud sobre la longitud inicial.

Les galgues extensomètriques estan formades per una única làmina metàl·lica i per tant només son capaces de mesurar les deformacions en una direcció. En el nostre cas, la direcció en que estan col·locades és la vertical, ja que és en el sentit que s'aplicaran les forces al mur

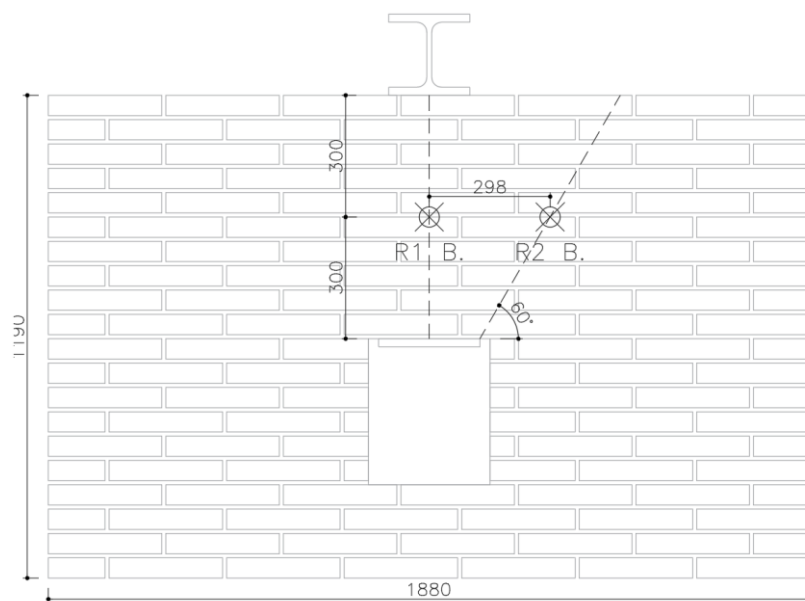
- La roseta extensomètrica també es un sensor que té la mateixa funció que les galgues, però aquestes estan formades per tres làmines metàl·liques en comptes de una, i per tant és capaç de fer una lectura de les deformacions produïdes en el punt estudiat i a més ens aporta informació de quin és el sentit de la distribució de les tensions. Les làmines metàl·liques exteriors estan girades  $45^{\circ}$  respecte la làmina interior, formant un angle de  $90^{\circ}$  entre les dues, com es pot veure en la imatge 117.
- S'han utilitzat 5 rosetes extensomètriques en la cara davantera del mur, tal com es pot veure en la imatge 114. Respecte el sentit vertical, les rosetes s'han col·locat en el centre de zona del mur. Com just en el centre hi ha una junta horitzontal, les rosetes s'han col·locat a baix d'aquesta. Respecte el sentit vertical, s'ha seguit la següent estratègia per a col·locar-les:
  - Roseta R1; s'ha col·locat en el centre d'on s'exercirà la força per part dels perfils metàl·lics.
  - Rosetes R2 i R5; s'han col·locat en els extrems de la platina d'on s'exercirà la força en la part inferior.
  - Roseta R3; s'ha col·locat seguint un angle de  $60^{\circ}$  respecte el pla horitzontal des de l'extrem de la platina de contacte fins al centre de la zona d'estudi descrit en la imatge 114. Aquesta roseta s'ha col·locat d'aquesta manera ja que segons l'apartat 2.4.3., el CTE exposa que en els casos on existeix una càrrega concentrada, les tensions d'aquesta es reparteixen al mur de fàbrica en un angle de  $60^{\circ}$ , com es pot observar en la imatge 113.
  - Roseta R4; s'ha col·locat a 150mm de la roseta R3 per comprovar si les tensions es distribueixen més enllà dels  $60^{\circ}$  esmentats en el CTE
- S'han utilitzat 2 galgues extensomètriques en la cara posterior del mur, tal com es pot veure en la imatge 115. S'han col·locat les 2 galgues, R1 Back i R3 Back, en la mateixa posició que les rosetes R1 i R3.



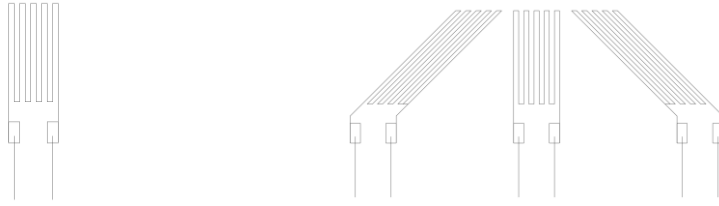
- **Imatge 113.** Exemple de repartiment de càrregues concentrades al mur.



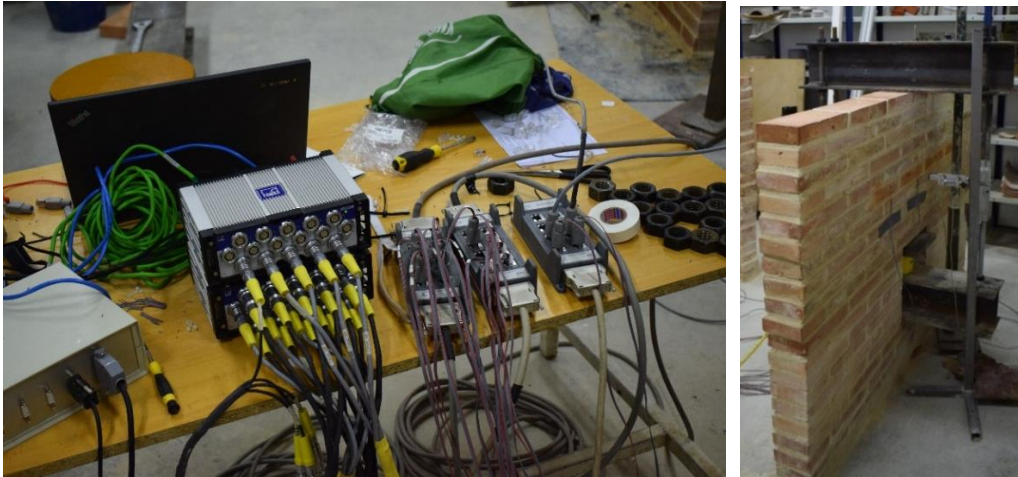
**Imatge 114.** Esquema de la col·locació de les rosetes extensiomètriques.



**Imatge 115.** Esquema de la Col·locació de les galgues extensiomètriques.



**Imatges 116 i 117.** 116- Esquema de una galga extensiomètrica.  
117- Esquema de una roseta extensiomètrica.



**Imatges 118 i 119.** 118- Equip utilitzat per instrumentar el mur 03.  
119-Col·locació dels elements en el mur 02 (01).



**Imatge 120.** Col·locació dels elements en el mur 02 (02).



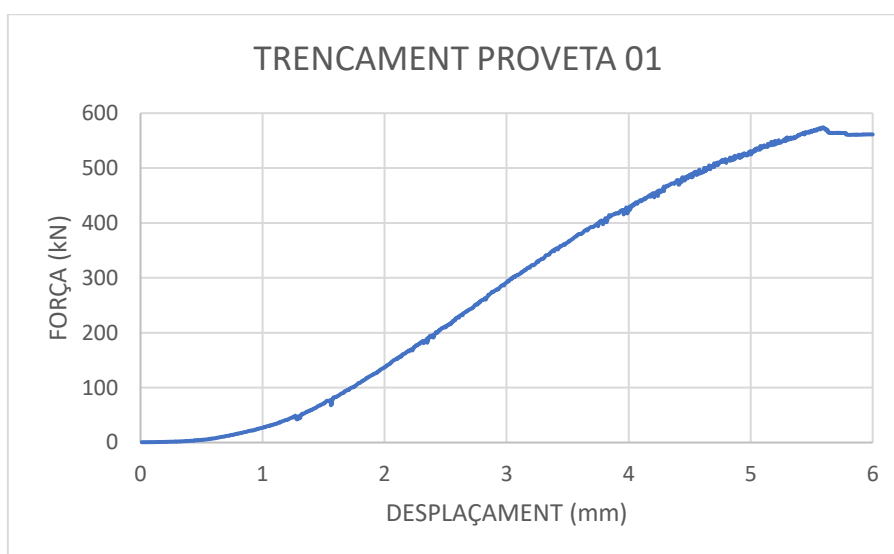
**Imatge 121.** Col·locació de les galgues extensiomètriques al mur 03.

## 5. RESULTATS

Es procedeix a mostrar els resultats obtinguts en el assajos realitzats a les tres provetes d'obra de fàbrica i als tres murs.

### 5.1. PROVETA D'OBRA DE FÀBRICA 01

Els valors obtinguts en el trencament de proveta d'obra de fàbrica es poden veure en la Gràfica 014, on es relaciona el desplaçament obtingut en la fàbrica segons la força que se li aplica.



**Gràfica 014.** Trencament de la proveta 01.

Les mides de la proveta són de 580x590x140, com s'ha exposat en l'apartat 4.1.1. Per assajar la proveta s'ha utilitzat un perfil metàl·lic IPE-200, on la base d'aquest perfil és de 100mm. Per tant la superfície de contacte entre la premsa i la proveta és:

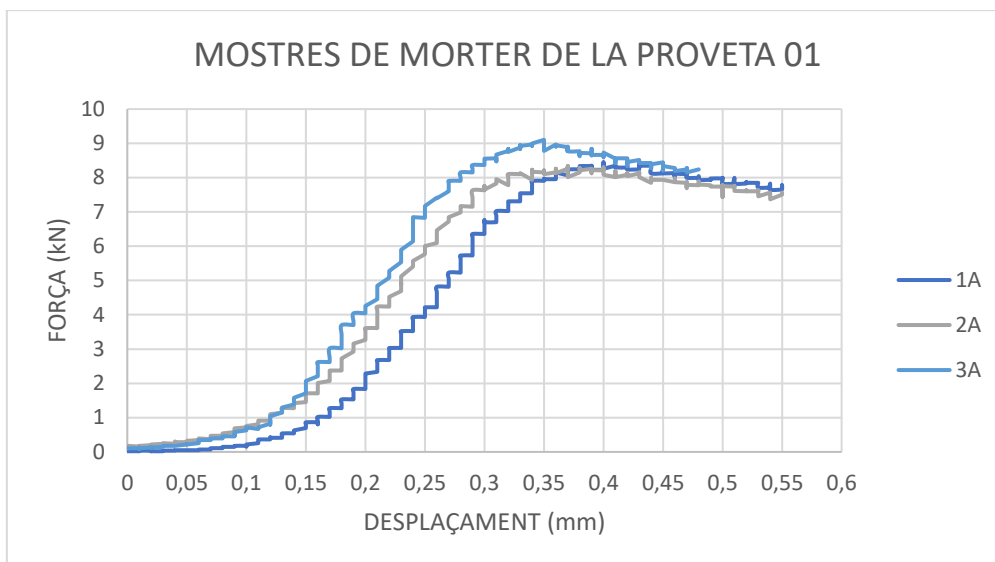
$$S = 580 \cdot 100 = 58.000\text{mm}^2$$

La força màxima aplicada a la proveta han estat 574,19kN. Por consegüent, la tensió admissible de la proveta d'obra de fàbrica 01 és de 9,90 MPa.

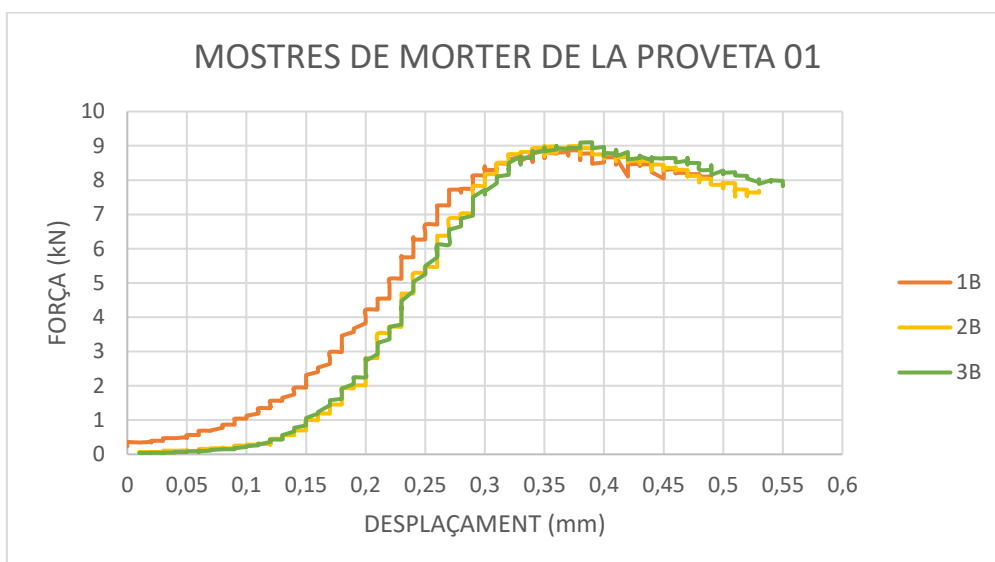
	<b>Força</b>	<b>Tensions</b>
Proveta 01	574,19 kN	9,90 MPa

**Taula 018.** Forces i tensions màximes aplicades a la proveta d'obra de fàbrica 01.

S'han assajat 6 mostres del morter utilitzat per la construcció de la proveta d'obra de fàbrica 01, i les dades obtingudes es poden observar en les gràfiques 015 i 016.



Gràfica 015. Trencament de les mostres A del morter de la proveta 01.



Gràfica 016. Trencament de les mostres B del morter de la proveta 01.

La superfície de contacte entre la premsa i les mostres era de 40x40mm, 160mm<sup>2</sup>.

La força màxima aplicada en cada mostra de morter i la seva tensió admissible es pot observar en la taula 019.

màxima	Força	Tensions
1A	8,45 kN	5,28 MPa
2A	8,34 kN	5,21 MPa
3A	9,10 kN	5,69 MPa
1B	8,86 kN	5,54 MPa
2B	9,00 kN	5,62 MPa
3B	9,10 kN	5,69 MPa

Taula 019. Forces i tensions màximes aplicades a les provetes de morter de la proveta 01.

La mitjana geomètrica de les tensions admissibles del morter utilitzat en la proveta d'obra de fàbrica 01 és 5,50 MPa.

A continuació s'exposa la documentació gràfica del trencament de la proveta 01 i el seguiment de les esquerdes que es van originant al llarg de l'assaig:



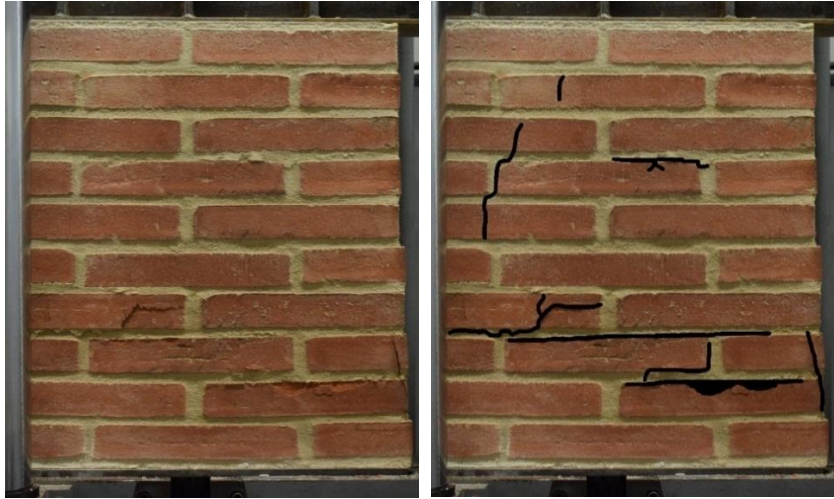
**Imatge 122.** Col·locació de la proveta d'obra de fàbrica 01 en la premsa.



**Imatges 123 i 124.** 123- Seguiment de les esquerdes que proveta d'obra de fàbrica 01 (01).  
124- Remarcat de les esquerdes que sorgeixen a la proveta d'obra de fàbrica (01).



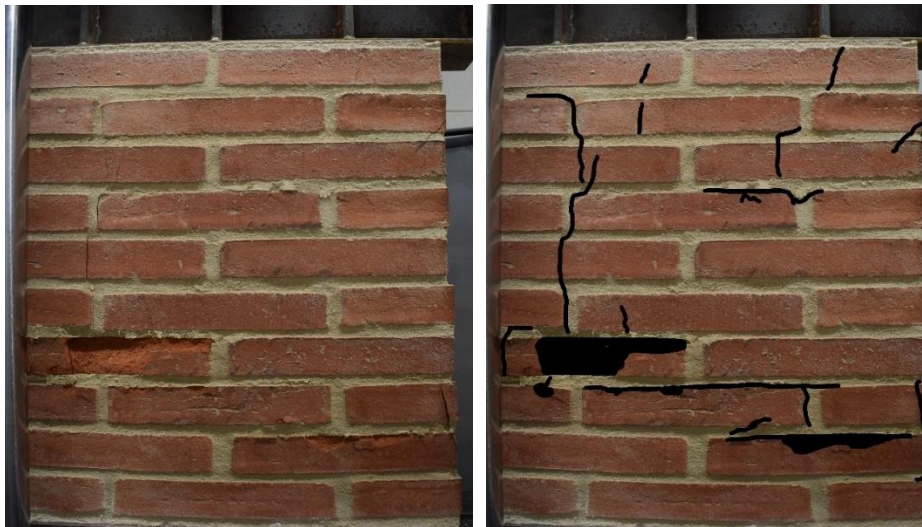
**Imatges 125, 126 i 127.** 125- Seguiment de les esquerdes que sorgeixen a la proveta d'obra de fàbrica 01 (02).  
126- Remarcat de les esquerdes que sorgeixen a la proveta d'obra de fàbrica 01 (02).  
127- Seguiment de les esquerdes que sorgeixen a la proveta d'obra de fàbrica 01, cantell (01).



**Imatges 128 i 129.** 128- Seguiment de les esquerdes que sorgeixen a la proveta d'obra de fàbrica 01 (03).  
129- Remarcat de les esquerdes que sorgeixen a la proveta d'obra de fàbrica 01 (03).



**Imatges 130, 131 i 132.** 130- Seguiment de les esquerdes que sorgeixen a la proveta d'obra de fàbrica 01, cantell (02).  
131- Seguiment de les esquerdes que sorgeixen a la proveta d'obra de fàbrica 01, cantell (03).  
132- Detall de les esquerdes de la cantonada de la proveta d'obra de fàbrica 01.



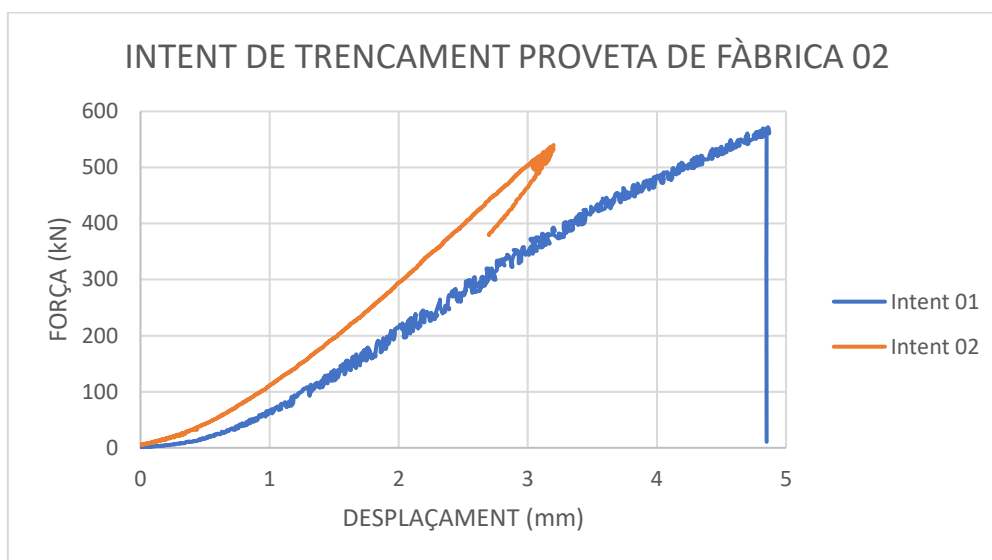
**Imatges 133 i 134.** 133- Seguiment de les esquerdes que sorgeixen a la proveta d'obra de fàbrica 01 (04).  
134- Remarcat de les esquerdes que sorgeixen a la proveta d'obra de fàbrica 01 (04).



## 5.2. PROVETA D'OBRA DE FÀBRICA 02

Per a l'assaig de la proveta d'obra de fàbrica 02 es va tenir l'inconvenient que la força que pot aplicar la premsa de la qual es disposa, no es suficient per arribar al punt de trencament. La premsa pot exercir una força màxima de 60 tonelades (588 kN).

En la gràfica 017 i la taula 020 es poden veure els valors obtinguts en dos intents que es van realitzar d'assajar la proveta d'obra de fàbrica 02, sense arribar a trencar-la.



**Gràfica 017.** Intent de trencament de la proveta d'obra de fàbrica 02.

Les mides de la proveta són de 580x590x140, com s'ha exposat en l'apartat 4.1.1. Per assajar la proveta s'ha utilitzat un perfil metàl·lic IPE-200, on la base d'aquest perfil és de 100mm. Per tant la superfície de contacte entre la premsa i la proveta és:

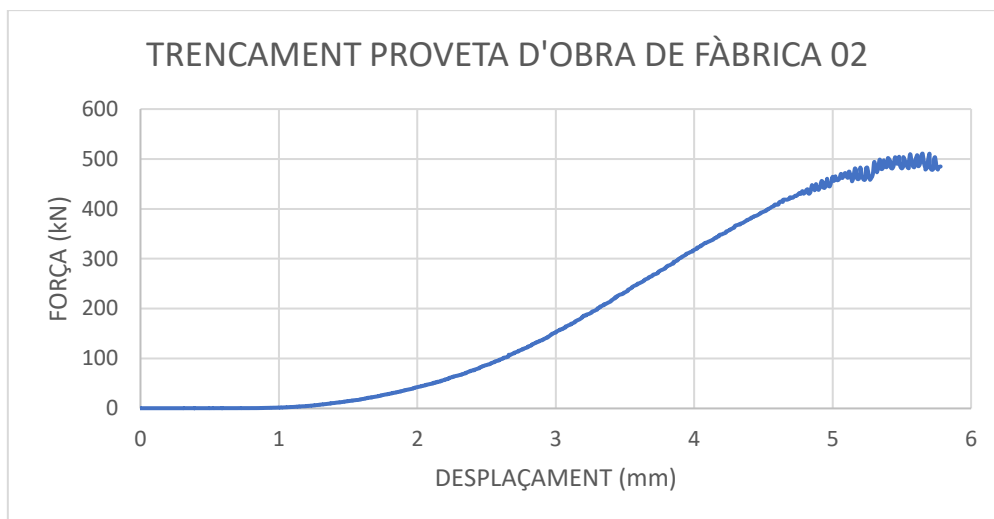
$$S = 580 \cdot 100 = 58.000\text{mm}^2$$

	Força	Tensions
INTENT 01	571,70 kN	9,53 MPa
INTENT 02	540,01 kN	9,00 MPa

**Taula 020.** Forces i tensions màximes aplicades a la proveta d'obra de fàbrica 02, sense trencar-la.

Es va procedir a tallar la proveta 02, per reduir la base de la proveta, d'aquesta forma es redueix la superfície de contacte i s'augmenten les tensions aplicades, tal com es pot veure en les imatges 135, 136 i 137.

Els valors obtinguts en el trencament de la proveta 02 es poden veure en la Gràfica 018 on es relaciona el desplaçament obtingut en la fàbrica segons la força que se li aplica.



**Gràfica 018.** Trencament de la proveta d'obra de fàbrica 02.

Les mides de la proveta són de 580x590x140, com s'ha exposat en l'apartat 4.1.1. Al fer el tall al llarg de la proveta, aquest passa de 580 a 425mm. Per assajar la proveta s'ha utilitzat un perfil metàl·lic IPE-200, on la base d'aquest perfil és de 100mm. Per tant la superfície de contacte entre la premsa i la proveta és:

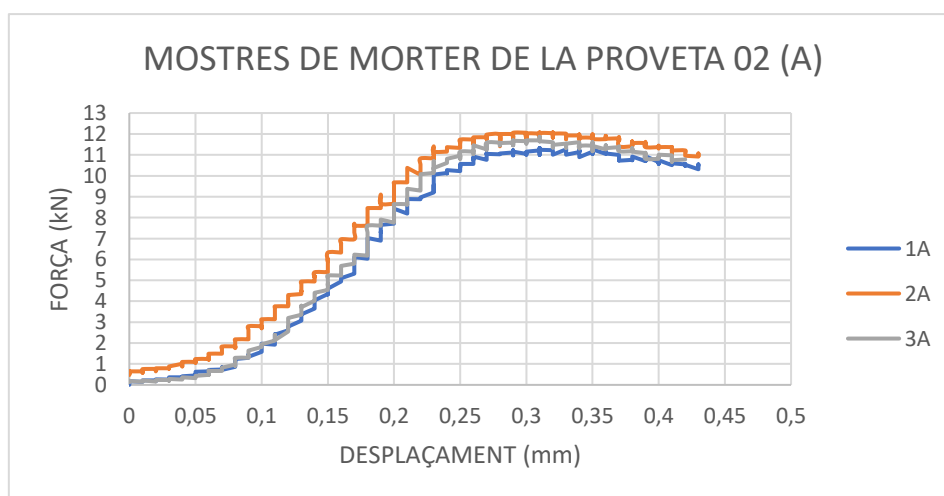
$$S = 425 \cdot 100 = 42.500mm^2$$

La força màxima aplicada a la proveta d'obra de fàbrica 02 han estat 510,55kN. Por consegüent, la tensió admissible de la proveta és de 12,01 MPa.

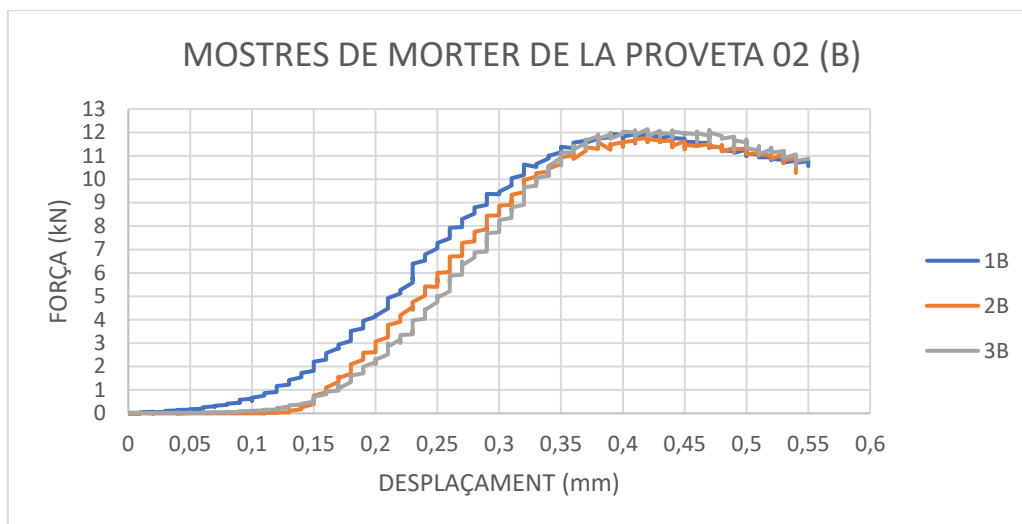
	Força	Tensions
PROVETA 02	510,55 kN	12,01 MPa

**Taula 021.** Força i tensió màximes aplicades la proveta d'obra de fàbrica 02.

S'han assajat 6 mostres del morter utilitzat per la construcció de la proveta d'obra de fàbrica 02, i les dades obtingudes es poden observar en les gràfiques 019 i 020.



**Gràfica 019.** Trencament de les mostres A del morter de la proveta d'obra de fàbrica 02.



**Gràfica 020.** Trencament de les mostres B del morter de la proveta d'obra de fàbrica 02.

La superfície de contacte entre la premsa i les mostres era de 40x40mm, 160mm<sup>2</sup>.

La força màxima aplicada en cada mostra de morter i la seva tensió admissible es pot observar en la taula 022.

	<b>Força</b>	<b>Tensions</b>
1A	11,33 kN	7,08 MPa
2A	12,08 kN	7,55 MPa
3A	11,86 kN	7,41 MPa
1B	11,95 kN	7,47 MPa
2B	11,76 kN	7,35 MPa
3B	12,14 kN	7,59 MPa

**Taula 022.** Forces i tensions màximes aplicades a les mostres de morter de la proveta d'obra de fàbrica 02.

La mitjana geomètrica de les tensions admissibles del morter utilitzat en la proveta d'obra de fàbrica 02 és 7,41 MPa.

A continuació s'exposa la documentació gràfica del tall realitzat en la proveta d'obra de fàbrica 02, el trencament d'aquesta i el seguiment de les esquerdes que es van originant al llarg de l'assaig:



**Imatges 135 i 136.** 135- Tall de la proveta d'obra de fàbrica 02 (01).  
136- Tall de la proveta d'obra de fàbrica 02 (02).



**Imatges 137.** Tall de la proveta d'obra de fàbrica 02 (03).



**Imatges 138 i 139.** 138- Col·locació de la proveta d'obra de fàbrica 02 en la premsa (01).  
139- Col·locació de la proveta d'obra de fàbrica 02 en la premsa (02).



**Imatges 140 i 141.** 140- Seguiment de les esquerdes que sorgeixen a la proveta d'obra de fàbrica 02.  
141- Remarcat de les esquerdes que sorgeixen a la proveta d'obra de fàbrica 02.



**Imatges 142, 143, 144 i 145.** 142- Seguiment de les esquerdes a la cantonada dreta de la proveta 02.  
143- Remarcat de les esquerdes a la cantonada dreta de la proveta 02.  
144- Seguiment de les esquerdes a la cantonada esquerra de la proveta 02.  
145- Remarcat de les esquerdes a la cantonada esquerra de la proveta 02.



**Imatges 146 i 147.** 146- Estat final de la proveta 02.  
147- Remarcat de les esquerdes aparegudes en la proveta 02 ja assajada.



**Imatges 148 i 149.** 148- Estat final de la proveta 02 en la cantonada dreta.  
149- Estat final de la proveta 02 en la cantonada esquerra.

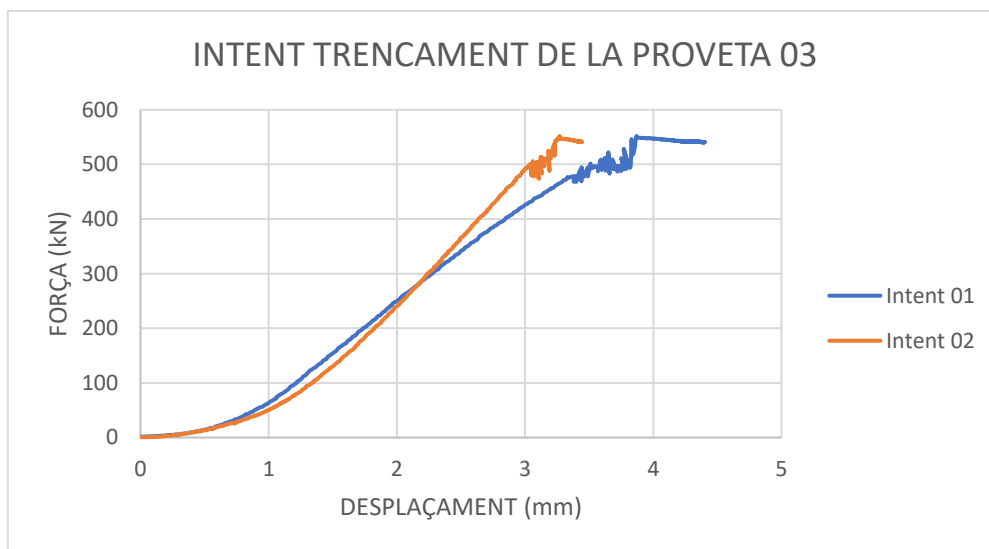


**Imatges 150 i 151.** 150- Estat final de la proveta 02 en la para posterior.  
151- Remarcat de les esquerdes aparegudes en la proveta 02 en la cara posterior ja assajada.

### 5.3. PROVETA D'OBRA DE FÀBRICA 03

Per a l'assaig de la proveta d'obra de fàbrica 03 també es va tenir l'inconvenient que la força que pot aplicar la premsa que disposem no va ser suficient per trencar-la.

En la gràfica 021 i la taula 023 es poden veure els valors obtinguts en dos intents que es van realitzar d'assajar la proveta, sense arribar a trencar-la.



**Gràfica 021.** Intent de trencament de la proveta d'obra de fàbrica 03.

Les mides de la proveta són de 580x590x140, com s'ha exposat en l'apartat 4.1.1. Per assajar la proveta s'ha utilitzat un perfil metàl·lic IPE-200, on la base d'aquest perfil és de 100mm. Per tant la superfície de contacte entre la premsa i la proveta és:

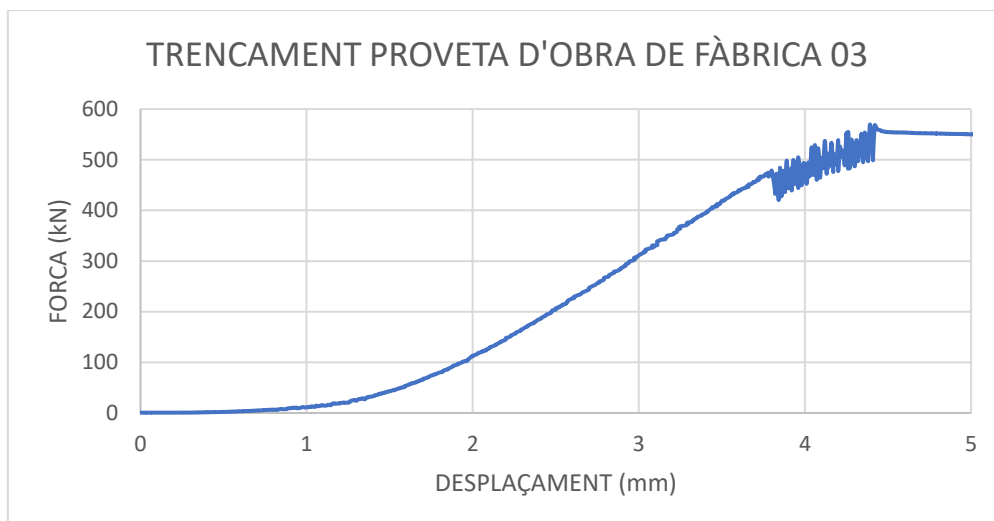
$$S = 580 \cdot 100 = 58.000mm^2$$

	Força	Tensions
INTENT 01	552,10 kN	9,20 MPa
INTENT 02	552,01 kN	9,20 MPa

**Taula 023.** Forces i tensions màximes aplicades a la proveta d'obra de fàbrica 03, sense trencar-la.

Es va procedir a tallar la proveta 03, per reduir el llarg i d'aquesta forma reduir la superfície de contacte i poder augmentar les tensions aplicades, tal com es pot veure en les imatges 135, 136 i 137.

Els valors obtinguts en el trencament de la proveta 03 es poden veure en la gràfica 022 on es relaciona el desplaçament obtingut en la fàbrica segons la força que se li aplica.



**Gràfica 022.** Intent de trencament de la proveta d'obra de fàbrica 03.

Les mides de la proveta són de 580x590x140, com s'ha exposat en l'apartat 4.1.1. Al fer el tall al llarg de la proveta, aquest passa de 582 a 440mm. Per assajar la proveta s'ha utilitzat un perfil metàl·lic IPE-200, on la base d'aquest perfil és de 100mm. Per tant la superfície de contacte entre la premsa i la proveta és:

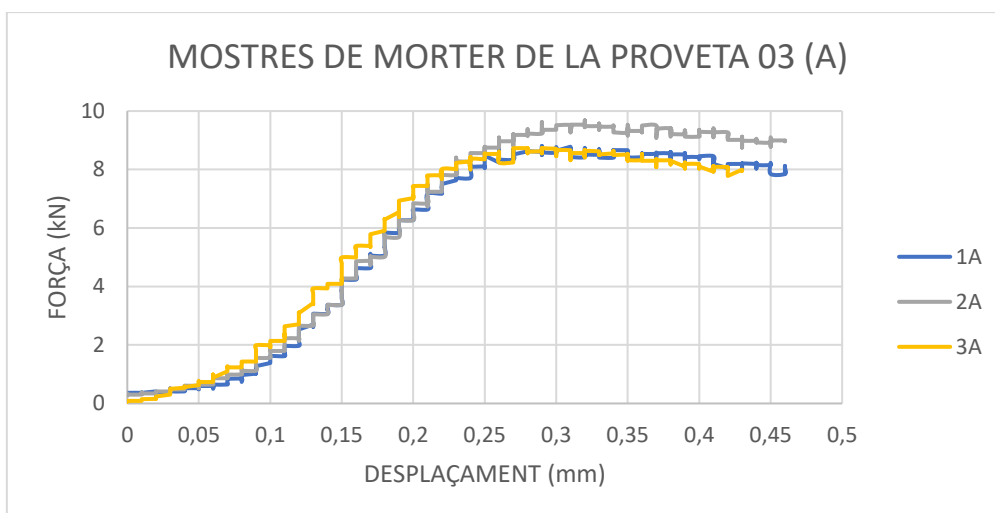
$$S = 440 \cdot 100 = 44.000\text{mm}^2$$

La força màxima aplicada a la proveta de proveta han estat 567,94 kN. Por consegüent, la tensió admissible de la proveta d'obra de fàbrica 03 és de 12,91 MPa.

	Força	Tensions
PROVETA 03	567,94 kN	12,91 MPa

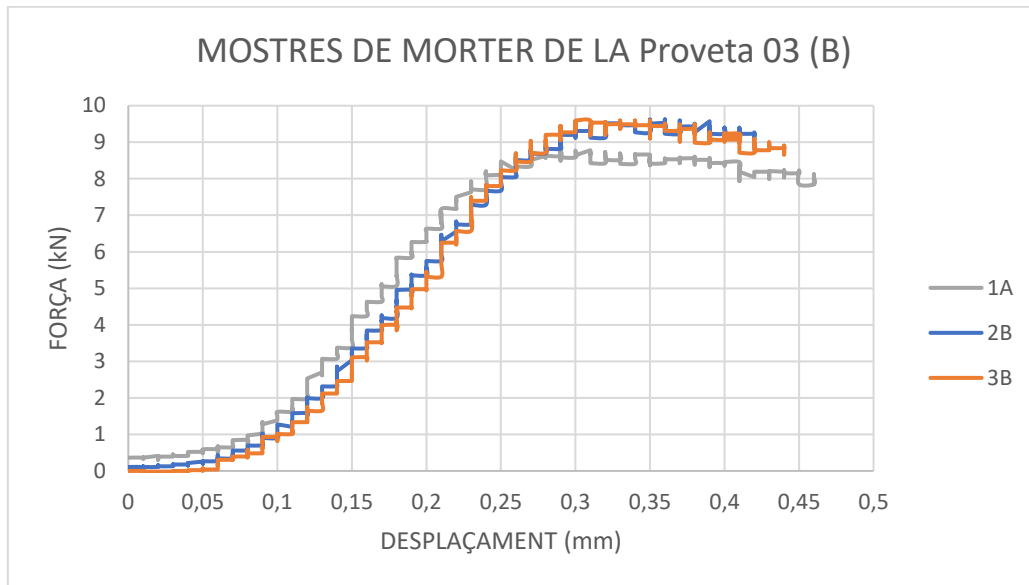
**Taula 024.** Forces i tensions màximes aplicades a la proveta d'obra de fàbrica 03, sense trencar-la.

S'han assajat 6 mostres del morter utilitzat per la construcció de la proveta 03, i les dades obtingudes es poden observar en les gràfiques 023 i 024.



**Gràfica 023.** Trencament de les mostres A del morter de la proveta 03.





**Gràfica 024.** Trencament de les mostres B del morter de la proveta 03.

La superfície de contacte entre la premsa i les mostres era de 40x40mm, 160mm<sup>2</sup>.

La força màxima aplicada en cada mostra de morter i la seva tensió admissible es pot observar en la taula 025.

	Força	Tensions
1A	8,80 kN	5,50 MPa
2A	9,68 kN	6,05 MPa
3A	8,73 kN	5,46 MPa
1B	8,80 kN	5,50 MPa
2B	9,62 kN	6,01 MPa
3B	9,59 kN	6,00 MPa

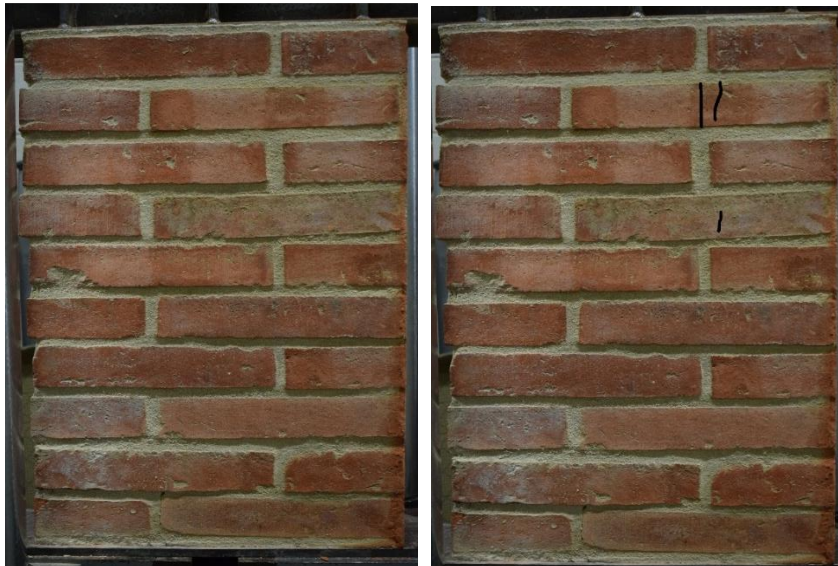
**Taula 025.** Forces i tensions màximes aplicades a les mostres de morter de la proveta 03.

La mitjana geomètrica de les tensions admissibles del morter utilitzat en la proveta 03 és 5,75 MPa.

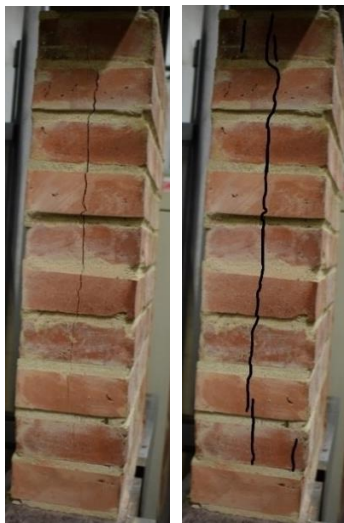
A continuació s'exposa la documentació gràfica del trencament de la proveta d'obra de fàbrica 03 i el seguiment de les esquerdes que es van originant al llarg de l'assaig:



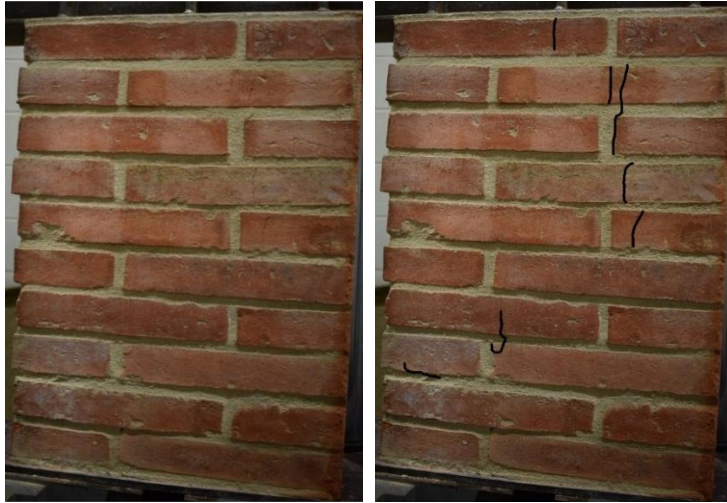
**Imatges 152 i 153.** 152- Col·locació de la proveta d'obra de fàbrica 03 en la premsa (01).  
153- Col·locació de la proveta d'obra de fàbrica 03 en la premsa (02).



**Imatges 154 i 155.** 154- Seguiment de les esquerdes que sorgeixen a la proveta d'obra de fàbrica 03 (01).  
155- Remarcament de les esquerdes que sorgeixen a la proveta d'obra de fàbrica 03 (01).



**Imatges 156 i 157.** 156- Seguiment de les esquerdes a la cantonada esquerra de la proveta 03.  
157- Remarcament de les esquerdes a la cantonada esquerra de la proveta 03.



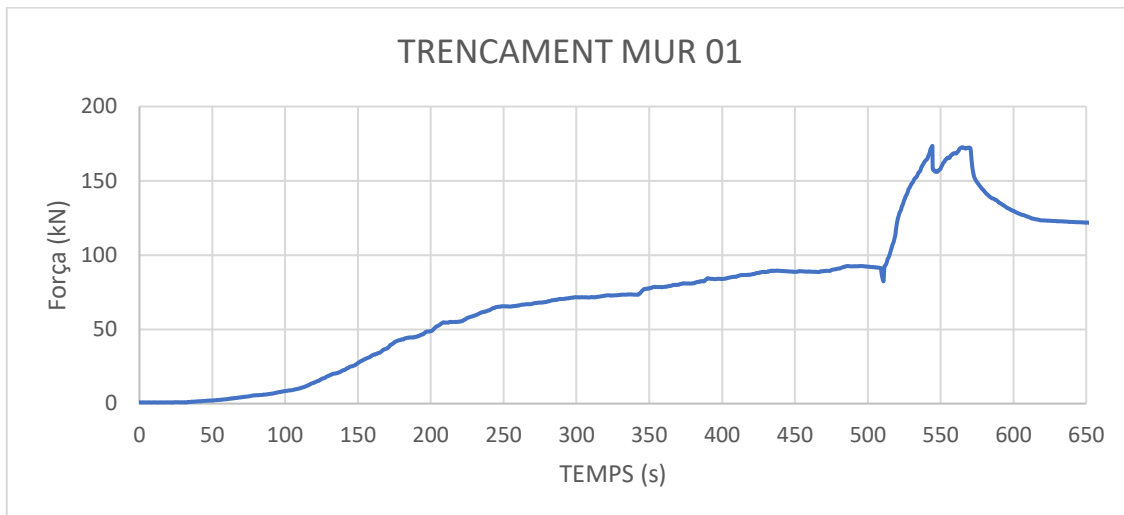
**Imatges 158 i 159.** 158- Seguiment de les esquerdes que sorgeixen a la proveta d'obra de fàbrica 03 (02).  
159- Remarcats de les esquerdes que sorgeixen a la proveta d'obra de fàbrica 03 (02).



**Imatges 160 i 161.** 160- Estat final de la proveta d'obra de fàbrica 03 en la cantonada esquerra.  
161- Estat final de la proveta d'obra de fàbrica 03.

### 5.4. MUR 01

Els valors obtinguts en el trencament del mur 01 es poden veure en la gràfica 025 on es relaciona la càrrega aplicada al llarg dels segons que dura l'assaig.



Gràfica 025. Trencament del mur 01.

Per fer l'assaig es va col·locar una platina metàl·lica de 200x200mm entre el pistó i el mur, per transmetre les carregues pertinents. Si el gruix del mur és de 140mm, la superfície de contacte inferior per on es transmeten les tensions és de:

$$S_i = 200 \cdot 140 = 28.000mm^2$$

En la part superior del mur es va col·locar un perfil metàl·lic HEB-200, el qual té una base de 200mm, en el sentit transversal de la cara del mur. Si el gruix de la proveta és de 140mm, la superfície de contacte inferior per on es transmeten les tensions és de:

$$S_s = 200 \cdot 140 = 28.000mm^2$$

La força màxima aplicada en el mur han estat 173,50 kN. La tensió admissible en els recolzaments inferior i superior es pot veure en la Taula 026.

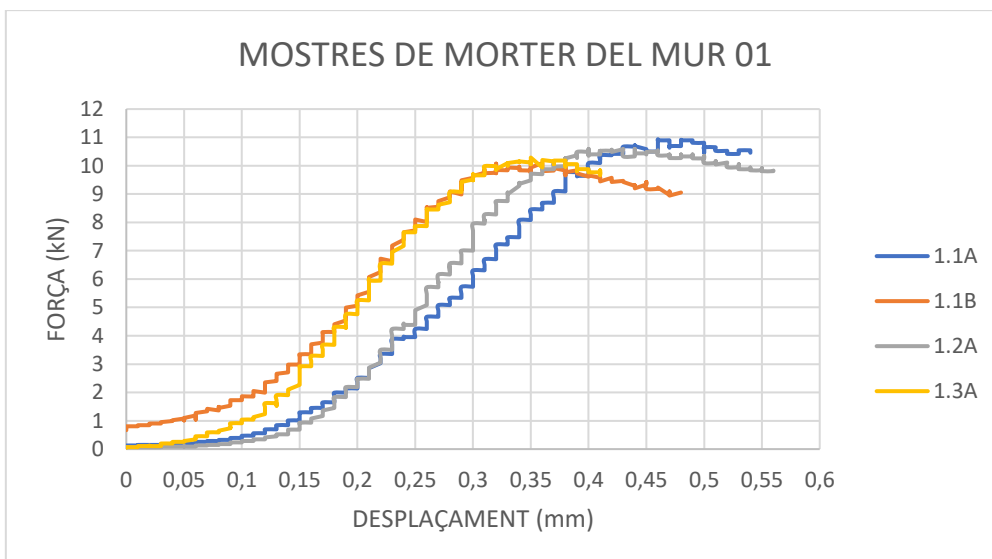
MUR 01	FORÇA
	173,50 kN

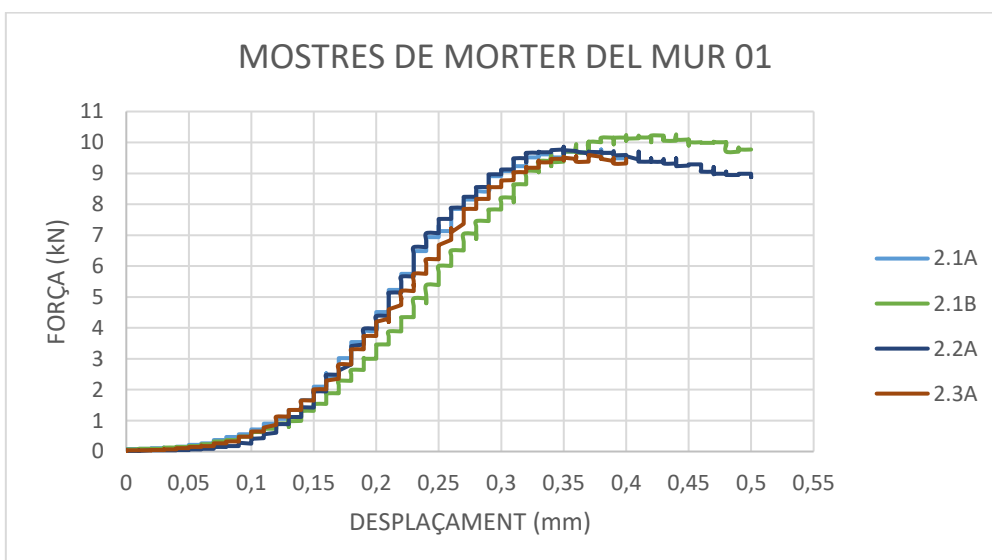
	TENSIONS
$\sigma$ superior	6,20 MPa
$\sigma$ inferior	6,20 MPa

Taula 026. Forces i tensions màximes aplicades en el mur 01.

La Fase 2 del mur 01 es va construir en 2 torns, i de cada torn s'han assajat 4 mostres del morter diferents, per obtenir la seva resistència a compressió. Les dades obtingudes es poden observar en les gràfiques 026 i 027.



Gràfica 026. Trencament de les mostres de morter del mur 01, en la primera part de la fase 2.



Gràfica 027. Trencament de les mostres de morter del mur 01, en la segona part de la fase 2.

La superfície de contacte entre la premsa i les mostres era de 40x40mm, 160mm<sup>2</sup>.

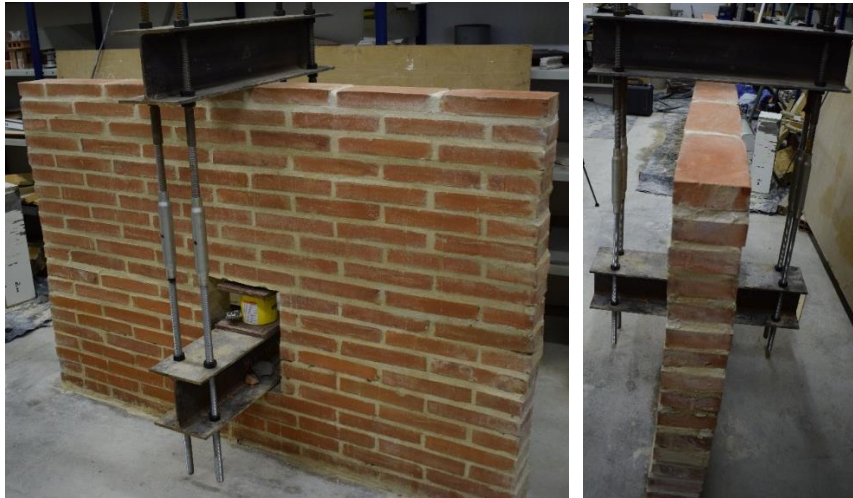
La força màxima aplicada en cada mostra de morter i la seva tensió admissible es pot observar en la taula 027.

	Força	Força	Tensions
1.1A	1,115 t	10,94 kN	6,84 MPa
1.1B	1,029 t	10,09 kN	6,31 MPa
1.2A	1,080 t	10,59 kN	6,62 MPa
1.3A	1,049 t	10,29 kN	6,43 MPa
2.1A	1,000 t	9,81 kN	6,13 MPa
2.1B	1,046 t	10,26 kN	6,41 MPa
2.2A	1,005 t	9,86 kN	6,16 MPa
2.3A	0,978 t	9,59 kN	6,00 MPa

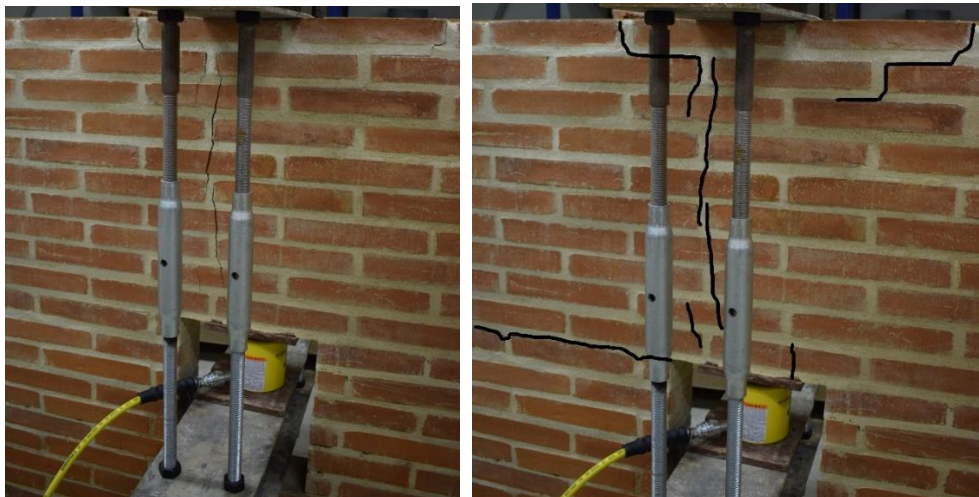
Taula 027. Forces i tensions màximes aplicades a les mostres de morter del mur 01.

La mitjana geomètrica de les tensions admissibles del morter utilitzat en el mur 01 és 6,36 MPa.

S'exposa la documentació gràfica del trencament del mur 01 i el seguiment de les esquerdes que es van originant al llarg de l'assaig:



**Imatges 162 i 163.** 162- Col·locació dels elements en el mur 01.  
163- Detall en perfil del mur 01.



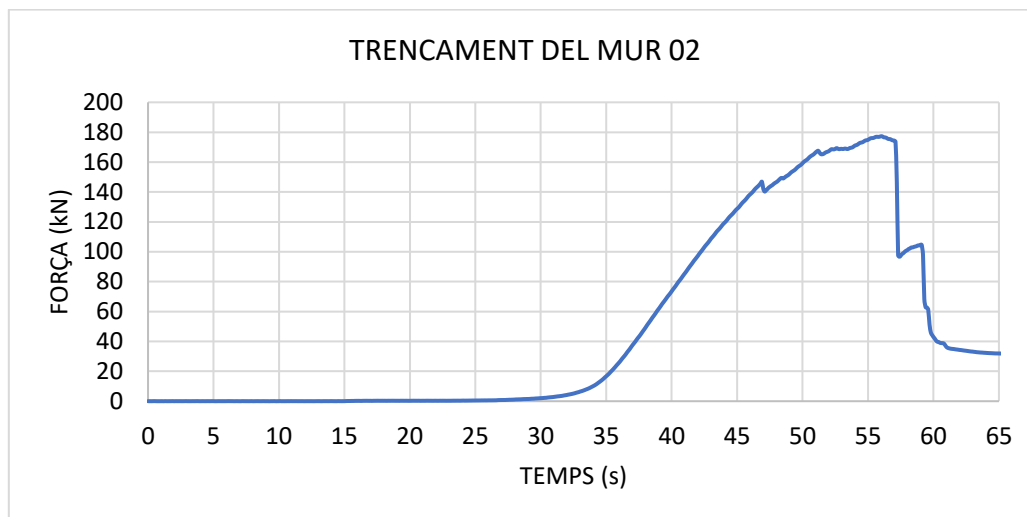
**Imatges 164 i 165.** 164- Seguiment de les esquerdes que sorgeixen en el mur 01.  
165- Remarcat de les esquerdes que sorgeixen el mur 01.



**Imatges 166 i 167.** 166- Detall de les esquerdes en el mur 01.  
167- Detall de les esquerdes en la cara posterior del mur 01.

### 5.5. MUR 02

Els valors obtinguts en el trencament del mur 02 es poden veure en la gràfica 028 on es relaciona la càrrega aplicada al llarg dels segons que dura l'assaig.



Gràfica 028. Trencament del mur 02.

Es pot observar en la gràfica que durant els segons 0 i 27, el mur de fàbrica no entra en càrrega, que durant aquest període la platina que transmet les tensions encara no està en contacte completament amb el mur i s'està assentant per adaptar-se a la superfície d'aquest.

A partir del segon 27 es comença a exercir una força sobre el mur la qual va augmentant a través del temps. En el segon 47, hi ha una petita baixada de la força aplicada passant de 147 a 140 kN, probablement per l'inici de les esquerdes. Després d'aquesta baixada, el mur torna a augmentar les tensions, arribant a una força màxima de 177kN en el segon 57. Seguidament apareix una baixada de la força aplicada provocada per l'aparició d'esquerdes, com es pot veure en la imatge 174, passant de 174 a 97 kN. En aquest punt, les tensions augmenten lleugerament. L'assaig es dona com acabat en el segon 59, ja que com es poden veure en les imatges, el mur va acabar completament danyat.

Per fer l'assaig es va col·locar una platina metàl·lica de 250x250mm entre el pistó i el mur, per transmetre les carregues pertinents. Si el gruix del mur és de 140mm, la superfície de contacte inferior per on es transmeten les tensions és de:

$$S_i = 250 \cdot 140 = 35.000mm^2$$

En la part superior del mur es va col·locar un perfil metàl·lic HEB-200, el qual té una base de 200mm, en el sentit transversal de la cara del mur. Si el gruix del mur és de 140mm, la superfície de contacte inferior per on es transmeten les tensions és de:

$$S_s = 200 \cdot 140 = 28.000mm^2$$

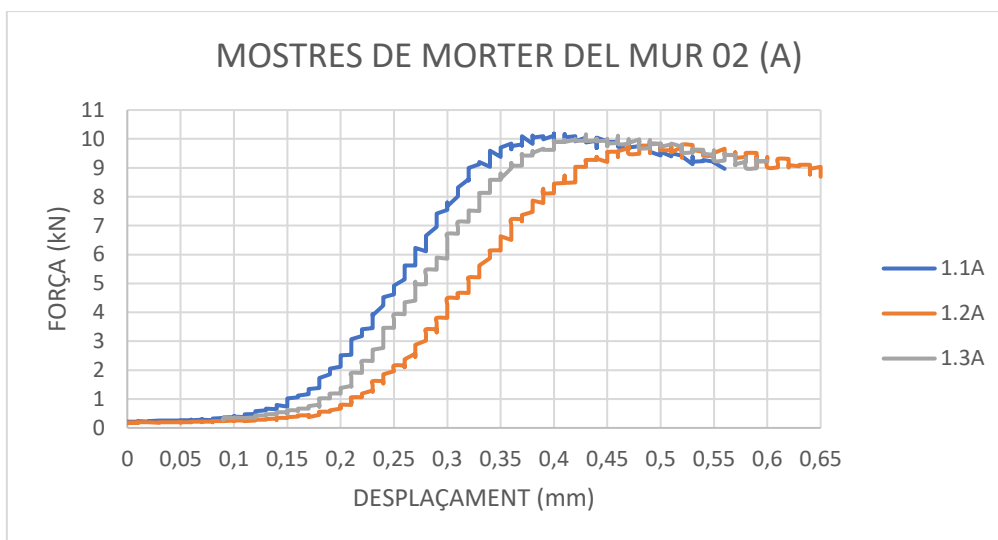
La força màxima aplicada en el mur han estat 173,50 kN. La tensió admissible en els recolzaments inferior i superior es pot veure en la Taula 028.

MUR 02	FORÇA
	177,30 kN

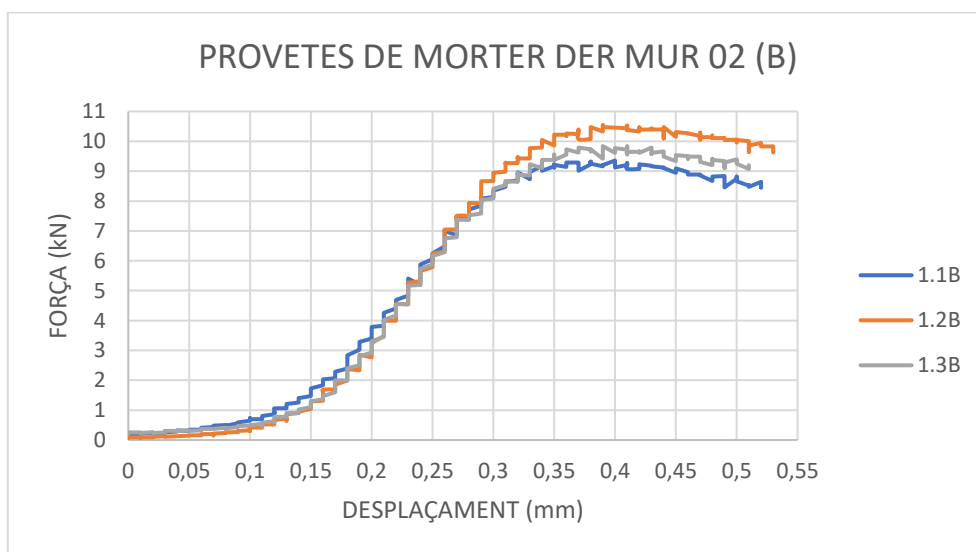
	TENSIONS
$\sigma$ superior	6,33 MPa
$\sigma$ inferior	5,07 MPa

Taula 028. Forces i tensions màximes aplicades en el mur 02.

La Fase 2 del mur 02 es va construir en 2 torns, i de cada torn s'han assajat 6 mostres del morter diferents, per obtenir la seva resistència a compressió. Les dades obtingudes es poden observar en les gràfiques 029, 030, 031, 032.

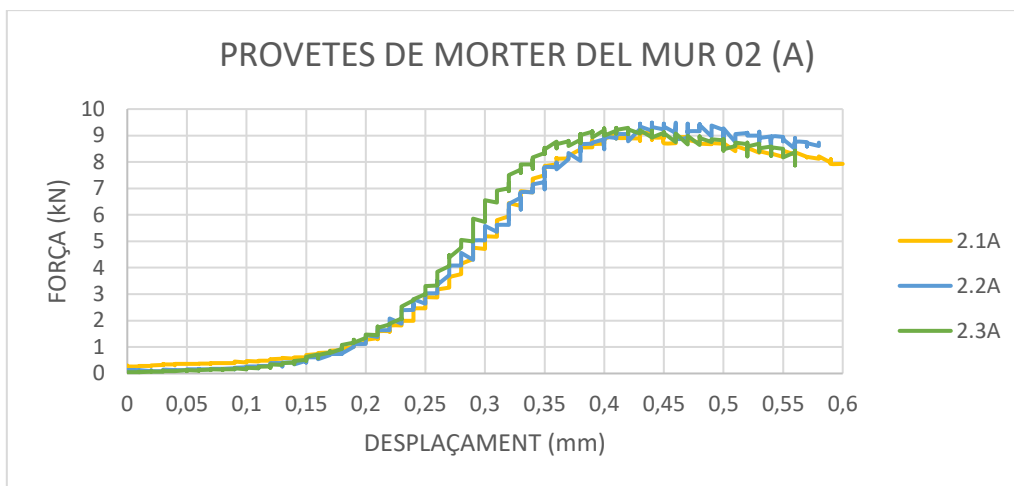


Gràfica 029. Trencament mostres A del morter del mur 02, en la primera part de la fase 2.

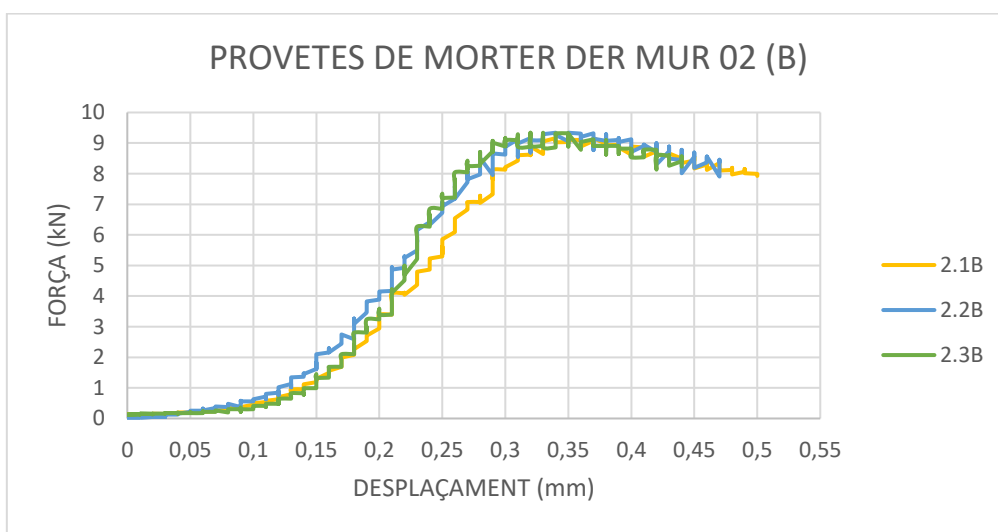


Gràfica 030. Trencament mostres B del morter del mur 02, en la primera part de la fase 2.





**Gràfica 031.** Trecament mostres A del morter del mur 02, en la segona part de la fase 2.



**Gràfica 032.** Trecament mostres B del morter del mur 02, en la segona part de la fase 2.

La superfície de contacte entre la premsa i les mostres era de 40x40mm, 160mm<sup>2</sup>.

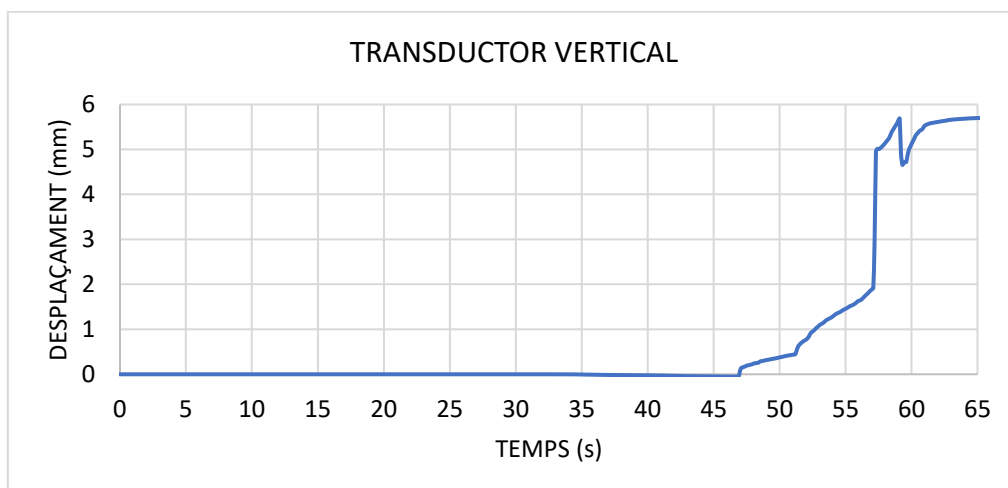
La força màxima aplicada en cada mostra de morter i la seva tensió admissible es pot observar en la taula 029.

	Força	Tensions
1.1A	10,18 kN	6,36 MPa
1.2A	9,83 kN	6,14 MPa
1.3A	10,16 kN	6,35 MPa
1.1B	9,36 kN	5,85 MPa
1.2B	10,55 kN	6,59 MPa
1.3B	9,84 kN	6,15 MPa
2.1A	9,09 kN	5,68 MPa
2.2A	9,49 kN	5,93 MPa
2.3A	9,29 kN	5,81 MPa
2.1B	9,21 kN	5,76 MPa
2.2B	9,34 kN	5,84 MPa
2.3B	9,34 kN	5,84 MPa

**Taula 029.** Forces i tensions màximes aplicades a les mostres de morter del mur 02.

La mitjana geomètrica de les tensions admissibles del morter de calç utilitzat en el mur 02 és 6,02MPa.

## 5.5.1. TRANSDUCTORS DE DESPLAÇAMENT

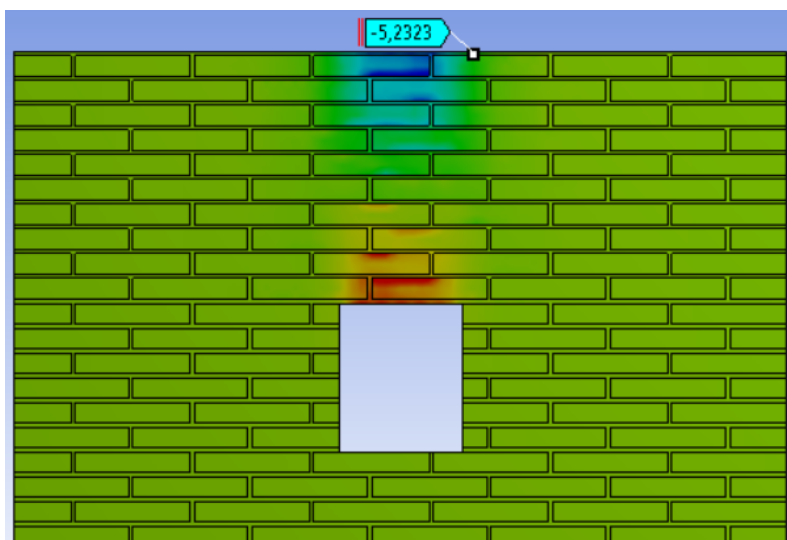


**Gràfica 033.** Desplaçament del transductor de desplaçament vertical en el mur 02.

El transductor de desplaçament vertical es va col·locar a 85mm separat del perfil HEB-200, ja que no va ser possible apropar-lo més, com es pot veure en la imatge 170.

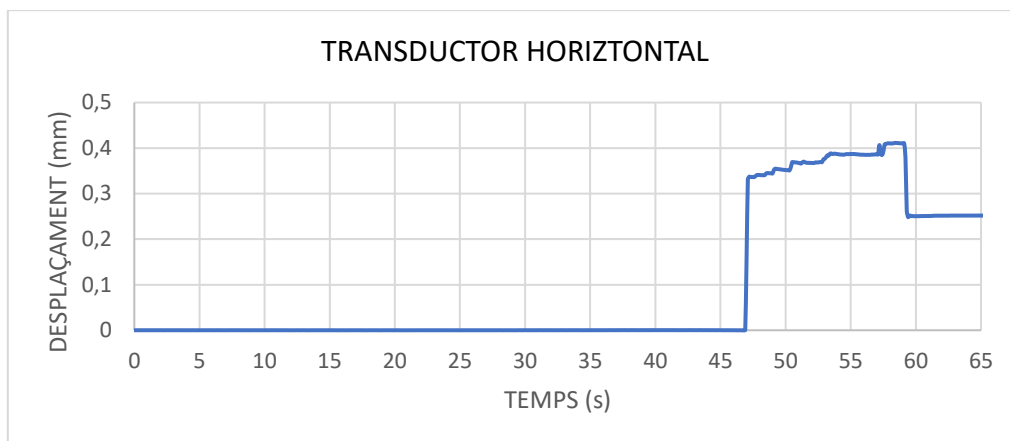
Segons la gràfica 033, el punt estudiat comença a comprimir-se en el segon 47, coincidint amb una petita baixada de les càrregues aplicades. La peça es va comprimint fins al segon 57, on es comprimint-se de 1,90 a 5,00 mm. Aquesta compressió es deu a les esquerdes que apareixen en el mur. El desplaçament va augmentant fins a 5,65 mm en el segon 59, moment que es va donar per finalitzat l'assaig.

Mirant els resultats obtinguts amb el model realitzat amb ANSYS, en la solució obtinguda amb la deformació direccional respecte l'eix Y, de l'apartat 4.5.a.1., es pot veure que baixa 5,23 mm.



**Imatge 168.** Deformació del mur en el punt on es va col·locar el transductor de desplaçament en sentit vertical.

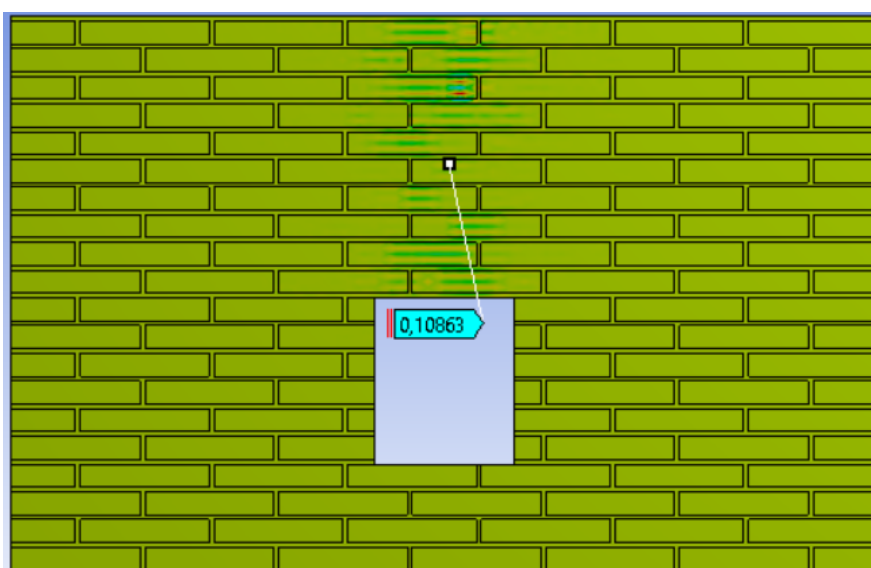
Com es pot observar, les dades obtingudes en l'assaig i amb el model numèric son similars.



**Gràfica 034.** Desplaçament del transductor de desplaçament horitzontal en el mur 02.

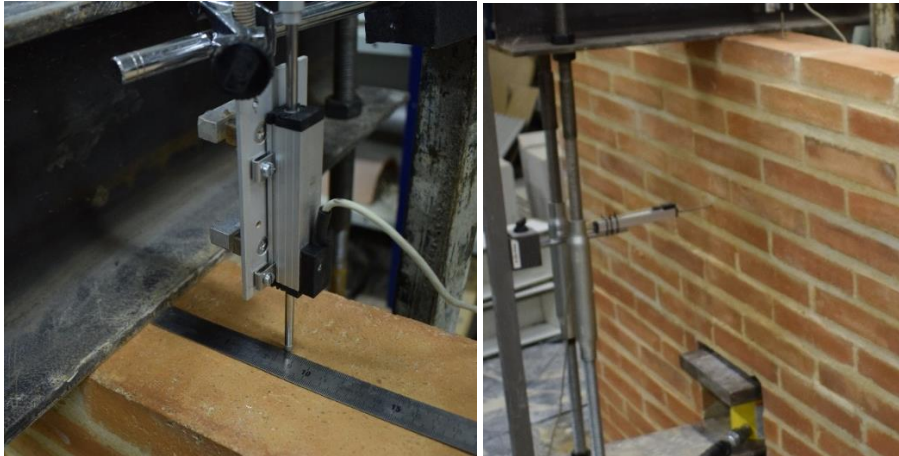
El transductor de desplaçament horitzontal es va col·locar en el centre del mur per comprovat quant era capaç d'estirar-se el mur i el seu coeficient de Poisson. En la **gràfica 034**, es pot veure que el punt estudiat no es mou fins al segon 47, on puja de sobte fins als que el mur s'eixampla fins 0,33mm. En aquest segon es quan la càrrega aplicada baixa i es possible que s'inicien les primeres esquerdes. Es pot veure que el desplaçament del mur arriba fins a 0,41mm en el segon 58.

Mirant els resultats obtinguts amb el model realitzat amb ANSYS, la solució obtinguda amb la deformació direccional respecte l'eix Z, de l'apartat 4.5.a.1, es pot veure que baixa 0,11mm.



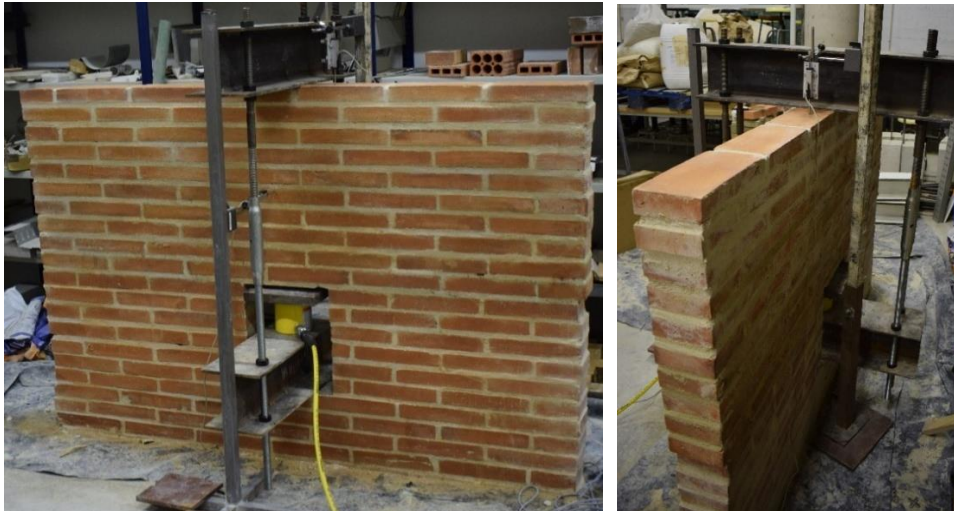
**Imatge 169.** Deformació del mur en el punt on es va col·locar el transductor de desplaçament en sentit vertical.

Com es pot observar, les dades obtingudes en l'assaig i amb el model numèric no són similars, sent en el model numèric 4 vegades menor. Com es pot observar en la imatge 174, va aparèixer una esquerda just al costat d'on es recolzava el transductor, i es possible que amb l'esquerda aquest punt es desplaçés més del compte.



**Imatges 170 i 171.** 170- Situació del transductor de desplaçament vertical en el mur 02.  
171- Situació del transductor de desplaçament horitzontal en el mur 02.

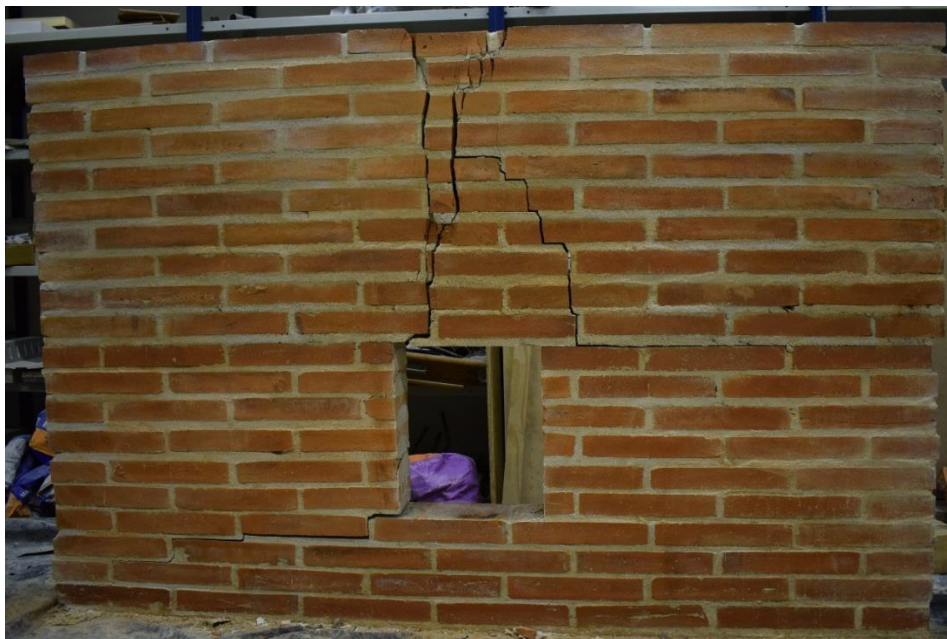
S'exposa la documentació gràfica del trencament del mur 02 i el seguiment de les esquerdes que es van originant al llarg de l'assaig:



**Imatges 172 i 173.** 172- Col·locació dels elements en el mur 02.  
173- Detall en zona posterior del mur 02.



**Imatges 174 i 175.** 174- Seguiment de les esquerdes que sorgeixen en el mur 02.  
175- Remarcat de les esquerdes que sorgeixen el mur 02.s



**Imatge 176.** Estat final del mur 02.



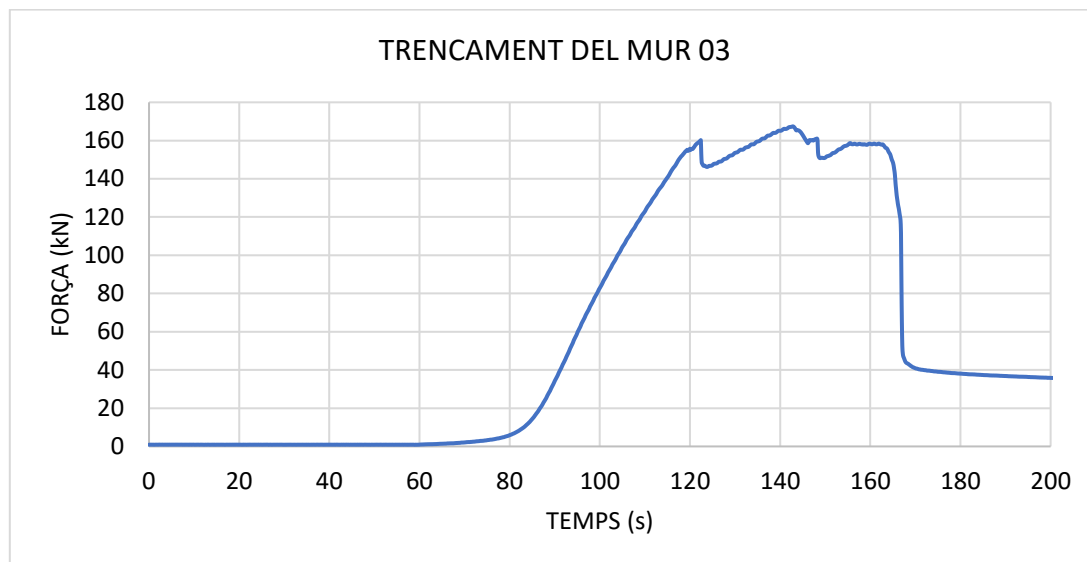
**Imatge 177.** Detall de les esquerdes el mur 02.



**Imatge 178.** Detall de les esquerdes en la cara posterior del mur 02.

### 5.6. MUR 03

Els valors obtinguts en el trencament del mur 03 es poden veure en la gràfica 035 on es relaciona la càrrega aplicada al llarg dels segons que dura l'assaig.



**Gràfica 035.** Trencament del mur 03.

Es pot observar en la gràfica que durant els segons 0 i 70, el mur de fàbrica no entra en càrrega, ja que durant aquest període la platina que li transmet les tensions encara no està completament en contacte amb el mur i s'està assentant per adaptar-se a la superfície d'aquest.

A partir del segon 70 es comença a exercir una força sobre el mur la qual va augmentant a través del temps. En el segon 122, hi ha una baixada de la força que plica aplicada passant de 160 a 146 kN, deguda a l'aparició d'una esquerda vertical a la zona esquerra de la zona d'estudi del mur com es pot veure en la imatge 207. Després d'aquesta baixada, el mur torna a augmentar les tensions, arribant a una força màxima de 167 kN en el segon 144. Seguidament torna a haver una baixa de la força aplicada, deguda a l'inici d'una esquerda vertical a la zona dreta de la zona d'estudi com es pot veure en la imatge 211, fins als 150 kN. Les tensions pugen lleugerament fins a una força estable de 159 kN, moment en el que comencen a sorgir vàries esquerdes en la zona de recolzament del perfil HEB-200 superior, com es pot veure en la imatge 213. L'assaig es dona per acabat en el segon 165, ja que com es poden veure en les imatges, el mur va acabar completament danyat.

Per fer l'assaig es va col·locar una platina metàl·lica de 250x250mm entre el pistó i el mur per transmetre les carregues pertinents. Si el gruix de la paret és de 140mm, la superfície de contacte inferior per on es transmeten les tensions és de:

$$S_i = 250 \cdot 140 = 35.000 \text{mm}^2$$

## CAPÍTOL 5: RESULTATS

En la part superior del mur es va col·locar un perfil metàl·lic HEB-200, el qual té una base de 200mm, en el sentit transversal de la cara del mur. Si el gruix de la paret és de 140mm, la superfície de contacte inferior per on es transmeten les tensions és de:

$$S_s = 200 \cdot 140 = 28.000\text{mm}^2$$

La força màxima aplicada en el mur han estat 167,39 kN. La tensió aplicada en els recolzaments inferior i superior es pot veure en la Taula 030.

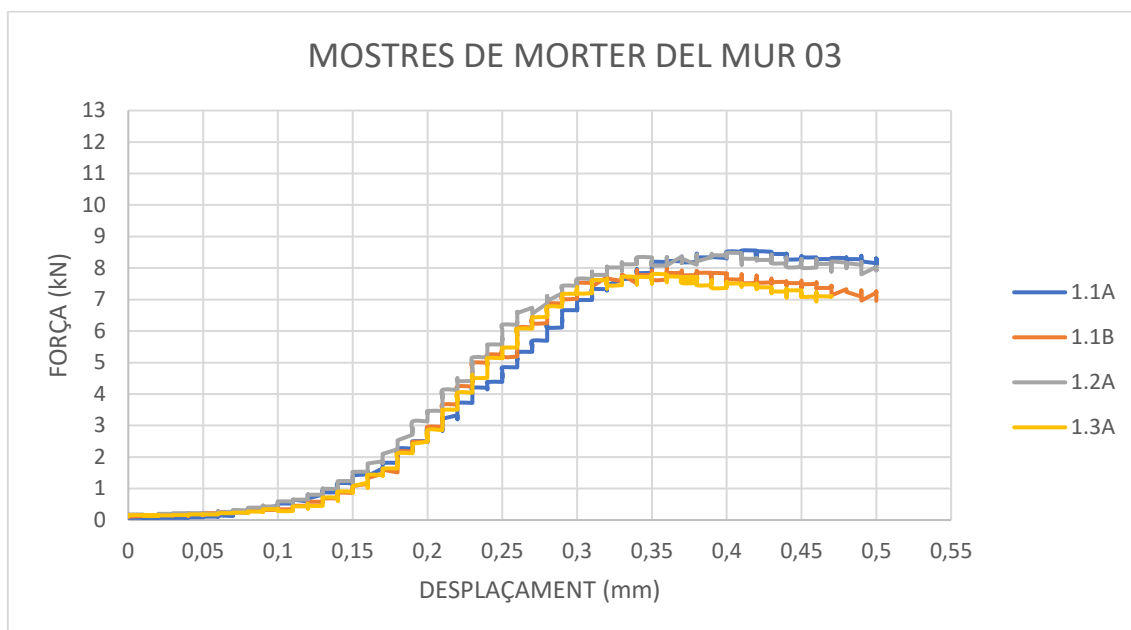
MUR 03	FORÇA
	167,39 kN

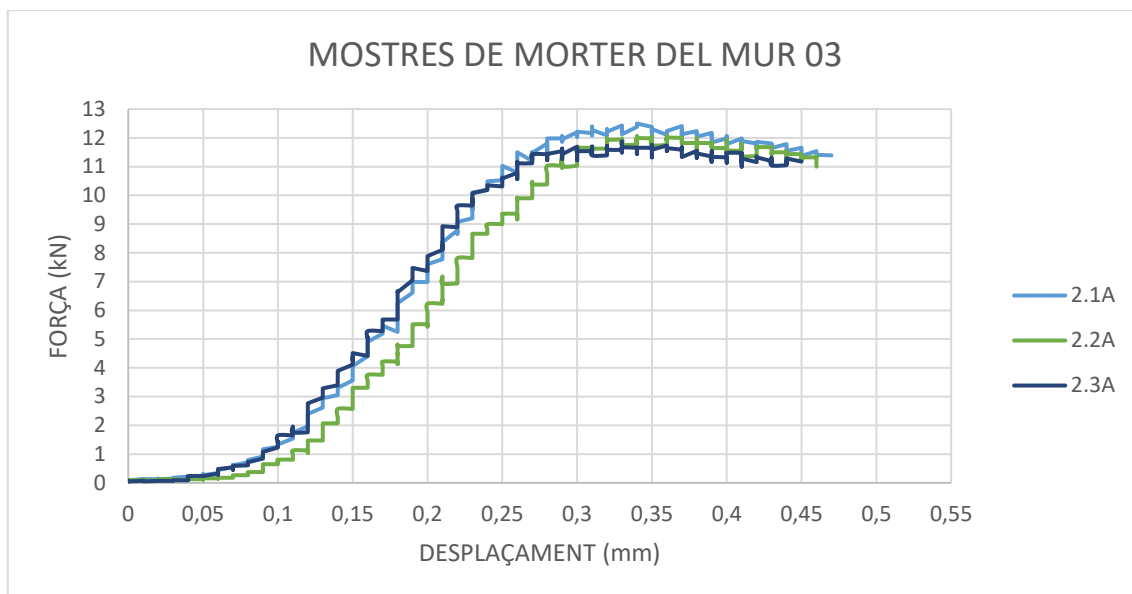
	TENSIONS
$\sigma$ superior	5,98 MPa
$\sigma$ inferior	4,78 MPa

**Taula 030.** Força i tensions màximes aplicades al mur 03.

La Fase 2 del mur 03 es va construir en 2 torns, i en el primer torn s'han assajat 4 mostres del morter diferents i en el segon torn 3, per obtenir la seva resistència a compressió. Les dades obtingudes es poden observar en les gràfiques 036 i 037.



**Gràfica 036.** Trecament de les mostres de morter del mur 03, en la primera part de la fase 2.



Gràfica 037. Trencament de les mostres de morter del mur 01, en la segona part de la fase 2.

La superfície de contacte entre la premsa i les mostres era de 40x40mm, 160mm<sup>2</sup>.

La força màxima aplicada en cada mostra de morter i la seva tensió admissible es pot observar en la taula 031.

màxima	Força	Tensions
1.1A	8,55 kN	5,35 MPa
1.1B	8,00 kN	5,00 MPa
1.2A	8,48 kN	5,30 MPa
1.3A	7,80 kN	4,87 MPa
2.1A	12,50 kN	7,81 MPa
2.2A	12,06 kN	7,54 MPa
2.3A	11,87 kN	7,42 MPa

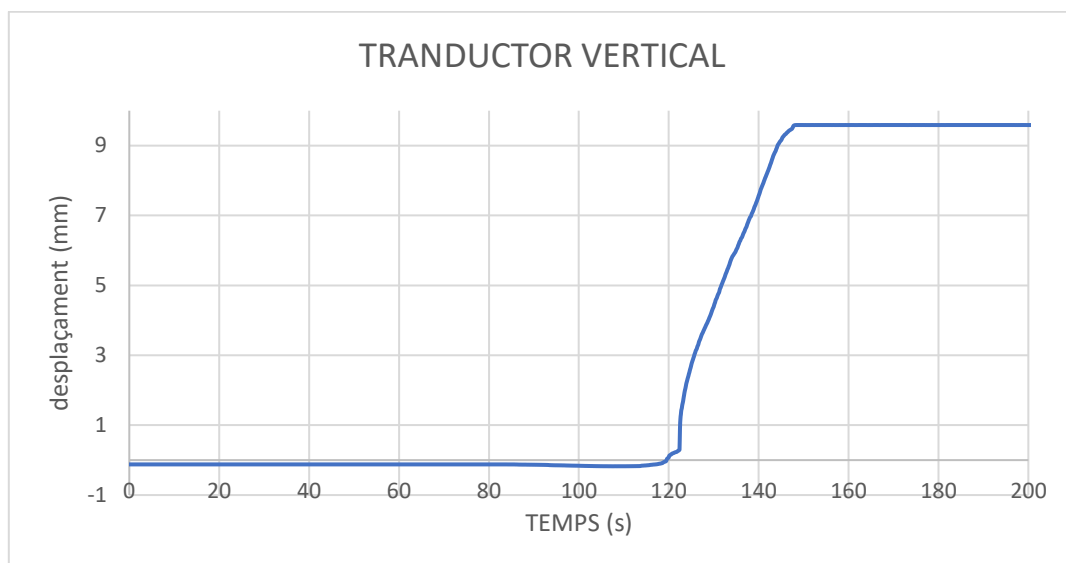
Taula 031. Forces i tensions màximes aplicades a les mostres de morter del mur 02.

En aquest cas es pot veure que la resistència a compressió del morter en el primer torn i el segon varien de forma important, havent fins i tot una diferència de casi 3 Mpa entre el valor més petit i el més gran.

La mitjana geomètrica de les tensions admissibles del morter de calç utilitzat en el mur 03 és 6,06 MPa.



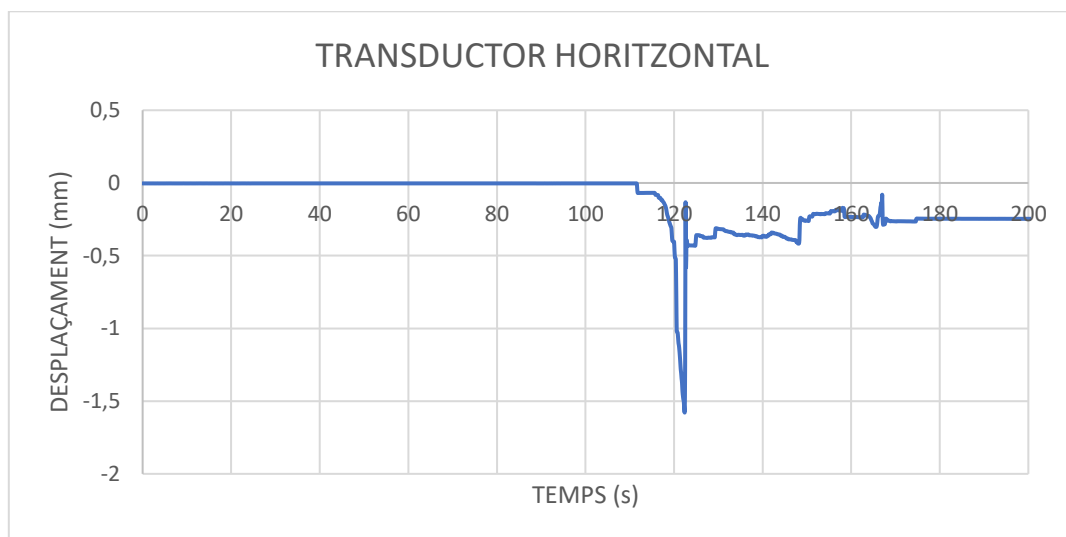
## 5.6.1. TRANSDUCTORS DE DESPLAÇAMENT



**Gràfica 038.** Desplaçament del transductor de desplaçament vertical en el mur 03.

El transductor de desplaçament vertical es va col·locar a 45mm separat del perfil HEB-200, ja que no va ser possible apropar-lo més, com es pot veure en la imatge 180.

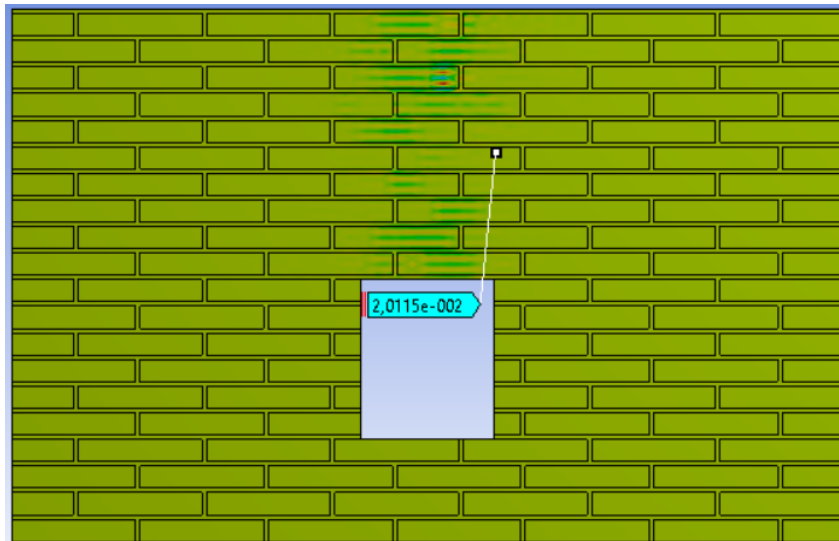
Les dades obtingudes en d'aquest transductor de desplaçament no són vàlides, ja que la peça on es recolzava es va aixecar del seu lloc durant el procés d'assaig, a partir del segon 122, tal com es pot veure en la imatge 182, fent que els resultats quedin alterats.



**Gràfica 039.** Desplaçament del transductor de desplaçament horitzontal en el mur 03.

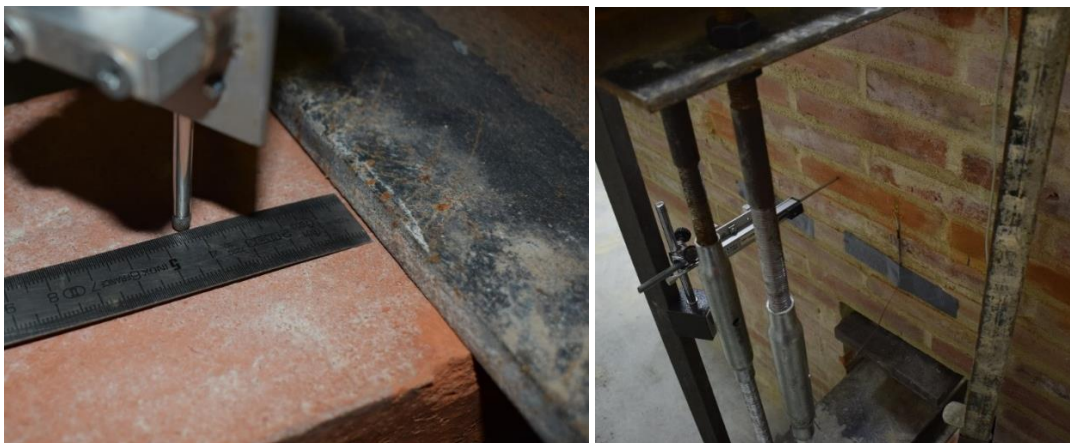
El transductor de desplaçament horitzontal es va col·locar a en el centre del mur, desplaçat 15cm cap a la dreta. En la **gràfica 039**, es pot veure que el punt estudiat no es desplaça fins al segon 112. El desplaçament augmenta considerablement fins al segon 122, arribant a 1,58 mm, on baixa de cop fins a 0,13mm. És en aquest moment on s'origina l'esquerda vertical de la esquerra. En el segon 148 s'origina una altre pic, encara que no és tan gran com el primer.

Mirant els resultats obtinguts amb el model realitzat amb ANSYS, la solució obtinguda amb la deformació direccional respecte l'eix Z, de l'apartat 4.5.a.1, es pot veure que baixa 0,025mm.



**Imatge 179.** Deformació del mur en el punt on es va col·locar el transductor de desplaçament en sentit vertical.

Les dades obtingudes en l'assaig i amb el model numèric no són similars havent una gran diferència entre les dues.



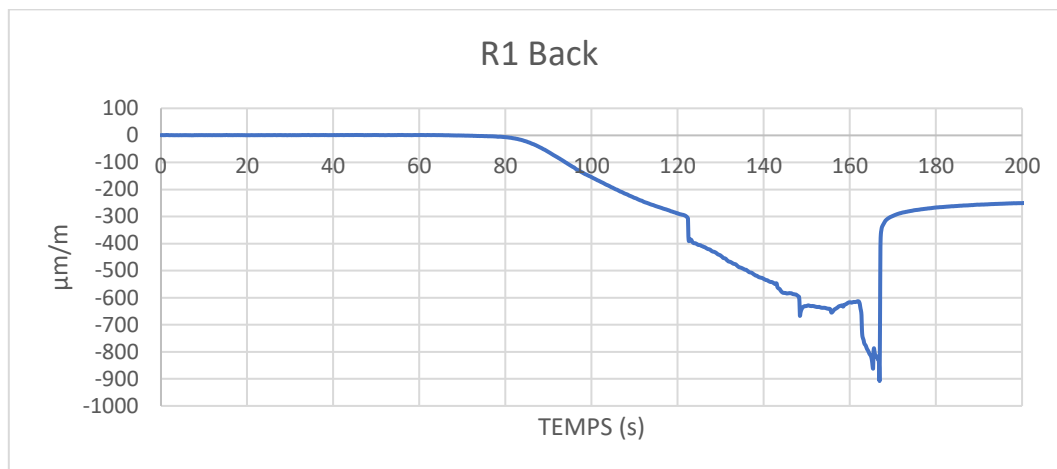
**Imatges 180 i 181.** 180- Situació del transductor de desplaçament vertical en el mur 03.  
181- Situació del transductor de desplaçament horitzontal en el mur 03.



**Imatge 182.** Aixecament de la peça que es procedia a estudiar amb el transductor de desplaçament vertical.

## 5.6.2. GALGUES EXTENSOMÈTRIQUES

### a) Galga extensomètrica R1 Back



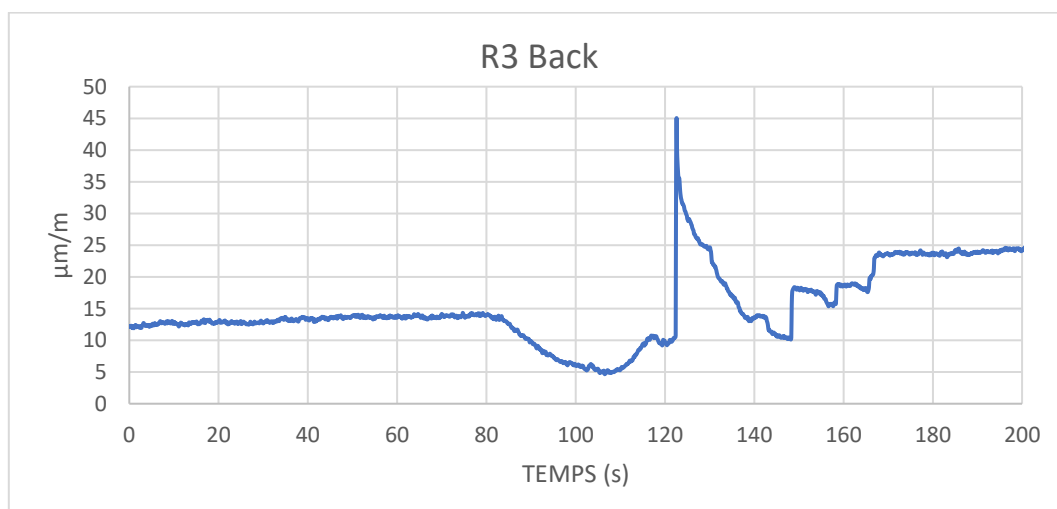
Gràfica 040. Valors de deformació de la galga R1 Back en el mur 03, al llarg del temps.

En la gràfica 040, es pot observar que la galga R1 back comença a adquirir una compressió a partir del segon 80, moment en el qual el mur comença a adquirir tensions.

En el segon 122, la deformació baixa abruptament de -300 a -389  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Aquest segon és en el moment on s'origina una esquerda vertical a la part esquerra de la zona d'estudi.

La deformació unitària continua baixant de forma lineal fins al segon 144, moment que s'aplica la força màxima al mur, i on comencen aparèixer petits pics d'augment i disminució de la deformació unitària, produïts l'aparició de l'esquerda vertical a la part dreta. En el segon 162 comença a augmentar la deformació unitària de forma brusca fins al segon 165, durant aquest període es quan més esquerdes apareixen en la zona de recolzament del perfil metàl·lic superior. En el segon 165 es van retirar les tensions del mur ja que l'assaig es va donar per finalitzat.

### b) Galga extensiomètrica R3 Back



Gràfica 041. Valors de deformació de la galga R3 Back en el mur 03, al llarg del temps.

En la gràfica de les dades galga R3 back es pot veure que aquestes han estat alterades ja que no comencen de la deformació unitària 0, sinó que aquesta està traccionada a l'inici de l'assaig 13  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

En el segon 80 la galga es comença a comprimir fins al segon 106 arribant a 4,65  $\mu\text{m}/\text{m}$  (tracció), moment en el que es torna a estirar fins al segon 122, on la galga es tracciona bruscament fins als 45  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Aquest segon coincideix amb la baixada de força aplicada en el mur i amb l'aparició de l'esquerda vertical esquerra explicada anteriorment.

A partir d'aquest moment la galga es torna a comprimir fins al segon 144, on apareix l'esquerda vertical dreta, moment on es comencen a manifestar pics en la gràfica d'augment i disminució de la deformació unitària fins al segon 165, quan es dona per finalitzat l'assaig.

Amb les galgues extensomètriques R1 back i R3 back, es pot veure que en l'assaig del mur 03 hi ha 3 moments que afecten a la distribució de les tensions en el mur:

- Segon 122:
  - o La galga R1 back baixa la deformació unitària, de sobte de -300 a -389  $\mu\text{m}/\text{m}$ .
  - o La galga R3 back pateix una tracció brusca de 10 a 45  $\mu\text{m}/\text{m}$ .
  - o En la imatge 207, es pot comprovar que la primera esquerda important al mur apareix a la esquerra de la zona d'estudi, just en aquest moment. Això significa que les tensions es van concentrar en la zona del centre (zona situada R1 back) i la zona de l'esquerda, fent aparèixer aquesta esquerda, mentre que la zona de la dreta (zona situada R3 back) que tracciona tracciona.
- Segon 144:
  - o La galga R1 back apareix in pic de compressió en la deformació unitària.
  - o La galga R3 back també pateix un compressió en la deformació unitària.
  - o Aquesta situació probablement es deguda a l'inici d'una segona esquerda vertical, situada a la dreta del mur, entre les rosetes extensomètriques R2 i R3. Les tensions es concentren en aquesta zona, fent augmentar les deformacions unitàries, fins que apareix l'esquerda i es distribueixen més en el centre
- Del segon 144 al 165:
  - o La galga R1 back pateix un lleuger augment de la deformació unitària a compressió, fins que al segon 164 es comprimeix de forma brusca.
  - o La galga R3 back es va traccionant de forma desigual, formant pics de tracció.
  - o Aquesta situació es deguda a que un cop ha aparegut la segona esquerda vertical, les tensions es redistribueixen cap al centre de la zona d'estudi, augmentant les deformacions de la galga R1 back.

### 5.6.3. ROSETES EXTENSOMÈTRIQVES

Una roseta de deformacions és una unió de tres galgues extensomètriques utilitzades per mesurar l'estat de deformacions d'un material en el pla, amb les quals es pot mesurar la deformació normal en  $x$  ( $\varepsilon_x$ ), la deformació normal en  $y$  ( $\varepsilon_y$ ) i la deformació tallant en el pla ( $\gamma_{xy}$ ). Cada galga només pot mesurar una deformació normal en la direcció amb la que està inclinada.

Per nomenar a cadascuna de les galgues s'usen les primeres lletres de l'abecedari, començant per la roseta horitzontal i seguint en sentit antihorari. Els valors de deformació que s'obté en la roseta són per  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_b$  i  $\varepsilon_c$ , i amb les següents equacions es poden obtenir els valors de  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  i  $\gamma_{xy}$ .

$$\varepsilon_a = \varepsilon_x \cdot \cos^2\theta_a + \varepsilon_y \cdot \sin^2\theta_a + \gamma_{xy} \cdot \sin\theta_a \cdot \cos\theta_a$$

$$\varepsilon_b = \varepsilon_x \cdot \cos^2\theta_b + \varepsilon_y \cdot \sin^2\theta_b + \gamma_{xy} \cdot \sin\theta_b \cdot \cos\theta_b$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_x \cdot \cos^2\theta_c + \varepsilon_y \cdot \sin^2\theta_c + \gamma_{xy} \cdot \sin\theta_c \cdot \cos\theta_c$$

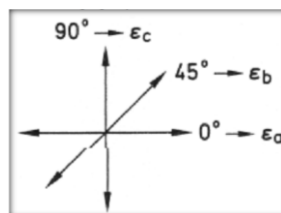
En el mercat existeixen varis tipus de rosetes extensomètriques, amb diverses combinacions d'inclinacions de les galgues que les componen. En aquest projecte s'han utilitzat una de les més utilitzades, la roseta rectangular.

Una roseta es diu que és rectangular quan les seves galgues estan inclinades amb una diferència de  $45^\circ$  entre si, de manera que una roseta es trobarà en posició horitzontal, una a posició vertical i una altra a un angle de  $45^\circ$ , com es pot veure en la imatge 183. Amb aquest arranjament de galgues, les deformacions es simplifiquen, passant a ser les següents:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_a$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_c$$

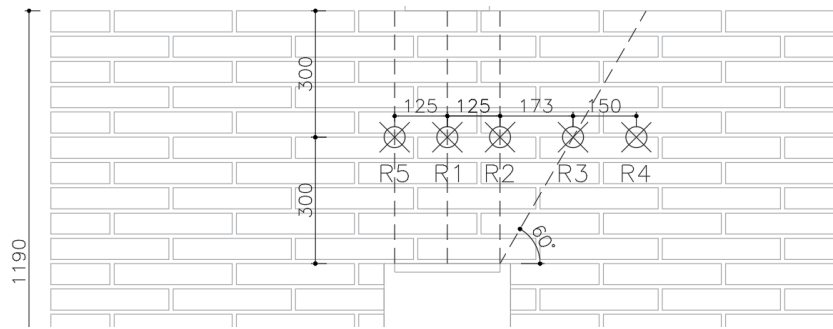
$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)$$



**Imatge 183.** Direccions de la Roseta extensomètrica amb direcció  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$ .

Aquestes rosetes es col·loquen al mur de forma que la galga en direcció  $\varepsilon_b$  sigui la del sentit vertical. La galga  $\varepsilon_a$  està inclinada  $45^\circ$  respecte  $\varepsilon_b$  en sentit horari, i la galga  $\varepsilon_c$  està inclinada  $45^\circ$  respecte  $\varepsilon_b$  en sentit antihorari.

La situació de cada roseta extensomètrica s'ha explicat en l'apartat 4.6.c., i es poden tornar a observar en la imatge 184.



**Imatge 184.** Situació de les rosetes extensomètriques.

Es poden obtenir els valors de les deformacions unitàries principals amb els valors obtinguts de les rosetes, resultant de les equacions:

$$\varepsilon_1 = (\varepsilon_a + \varepsilon_c)/2 + 1/2 [(\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2 + (2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c))^2]^{1/2}$$

$$\varepsilon_2 = (\varepsilon_a + \varepsilon_c)/2 - 1/2 [(\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2 + (2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c))^2]^{1/2}$$

Considerant que el material és elàstic i isòtrop, els esforços principals es poden obtenir de les equacions:

$$\sigma_1 = [E/(1 - \mu^2)] \cdot (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2)$$

$$\sigma_2 = [E/(1 - \mu^2)] \cdot (\mu\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$$

On:

- $\sigma_1$  Esforç principal amb el major valor.
- $\sigma_2$  Esforç principal amb el menor valor.
- $\varepsilon_1$  Deformació unitària principal del major valor.
- $\varepsilon_2$  Deformació unitària principal del menor valor.
- E Mòdul d'elasticitat del material.
- $\mu$  Coeficient de Poisson.

Es poden determinar les direccions dels eixos dels esforços principals a partir de l'equació:

$$\tan 2\phi = [(2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c))/(\varepsilon_a - \varepsilon_c)]$$

Amb la qual s'obtenen dos valors de  $\phi$  corresponent un valor a cada un dels eixos dels dos esforços principals. Per esbrinar quin angle correspon a cada esforç principal, s'han de seguir aquestes normes:

- Quan  $\varepsilon_b > (\varepsilon_a + \varepsilon_c)/2$ ,  $\phi_1$  està comprès entre  $0^\circ$  i  $90^\circ$
- Quan  $\varepsilon_b < (\varepsilon_a + \varepsilon_c)/2$ ,  $\phi_1$  està comprès entre  $0^\circ$  i  $-90^\circ$
- Quan  $\varepsilon_b = (\varepsilon_a + \varepsilon_c)/2$ , i
  - o  $\varepsilon_a > \varepsilon_c$ ,  $\phi_1 = 0^\circ$
  - o  $\varepsilon_a < \varepsilon_c$ ,  $\phi_1 = 90^\circ$

## CAPÍTOL 5: RESULTATS

En aquest projecte no es calcularan els esforços principals, ja que els coeficients de Poisson que s'han utilitzat són xifres aproximades i per tant utilitzar-los en aquestes equacions podrien donar uns resultats que no s'adeqüen a la realitat. Encara que no es calculin els esforços principals, si que es calcularan les deformacions i inclinacions d'aquests.

En les Taules 032 i 033 es poden observar els valors de deformació que obtinguts de les 5 rosetes en diferents moments de l'assaig:

		TEMPS										
		70 s	80 s	85 s	90 s	95 s	100 s	105 s	110 s	115 s	120 s	125 s
FORÇA	(kN)	2,1	5,9	14,4	34,2	59,4	82,9	104,3	122,9	140,7	155,7	147,2
R5	$\epsilon_a$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-0,4	-5,4	-14,7	-37,6	-67,0	-87,9	-103,6	-114,0	-123,2	-125,7	-127,8
	$\epsilon_b$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-0,7	-10,4	-29,8	-79,2	-145,2	-202,5	-246,7	-279,8	-311,4	-339,2	-206,9
	$\epsilon_c$ ( $\mu\text{m/m}$ )	0,0	-4,0	-11,2	-28,6	-52,0	-74,1	-101,9	-116,4	-129,6	-140,9	-60,1
R1	$\epsilon_a$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-0,4	-2,5	-6,8	-16,4	-28,6	-37,9	-45,3	-50,2	-53,4	-49,4	-141,1
	$\epsilon_b$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-1,6	-10,1	-26,9	-66,7	-114,7	-152,6	-184,3	-213,1	-241,0	-268,1	-366,3
	$\epsilon_c$ ( $\mu\text{m/m}$ )	0,3	-2,4	-7,0	-17,4	-27,5	-30,4	-28,7	-18,9	-6,6	12,2	-70,0
R2	$\epsilon_a$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-0,7	-3,8	-9,1	-20,4	-34,1	-40,0	-37,5	-32,4	-23,7	-2,7	-142,3
	$\epsilon_b$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-1,8	-9,1	-22,8	-52,7	-88,7	-116,9	-137,8	-154,2	-168,3	-184,2	-185,9
	$\epsilon_c$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-0,9	-2,9	-6,8	-15,0	-22,4	-25,9	-22,6	-14,8	-4,1	8,8	-8,1
R3	$\epsilon_a$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-0,5	-3,2	-8,4	-20,3	-38,4	-55,6	-67,3	-78,5	-92,4	-102,8	-39,8
	$\epsilon_b$ ( $\mu\text{m/m}$ )	0,1	-3,7	-11,3	-28,4	-51,2	-73,3	-89,6	-103,5	-111,7	-122,9	-28,7
	$\epsilon_c$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-0,3	-2,4	-5,8	-14,7	-24,5	-33,7	-39,2	-41,3	-34,2	-21,2	-51,4
R4	$\epsilon_a$ ( $\mu\text{m/m}$ )	1,2	0,6	-0,5	-3,1	-7,5	-11,9	-13,8	-14,7	-17,7	-28,7	-0,3
	$\epsilon_b$ ( $\mu\text{m/m}$ )	0,4	-1,4	-4,9	-13,5	-24,5	-33,5	-39,2	-45,1	-43,4	-40,8	-13,3
	$\epsilon_c$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-0,4	-3,0	-7,3	-17,8	-30,3	-40,8	-48,6	-56,3	-50,6	-28,7	-23,9

Taula 032. Valors de deformació aportats per les Rosetes extensomètriques (01).

		TEMPS										
		130 s	135 s	140 s	145 s	150 s	155 s	160 s	165 s	170 s	175 s	180 s
FORÇA	(kN)	153,6	159,5	165,1	162,9	151,1	157,7	158,3	148,7	40,9	39,0	38,1
R5	$\epsilon_a$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-98,1	-82,7	-74,0	-68,2	-38,0	-42,4	-47,5	-38,5	-22,0	-21,6	-21,8
	$\epsilon_b$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-164,1	-136,8	-126,1	-120,1	-67,0	-75,4	-84,2	-64,3	-35,8	-34,8	-35,2
	$\epsilon_c$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-48,3	-37,2	-34,6	-33,8	-15,3	-18,9	-22,2	-13,1	-2,9	-3,0	-2,8
R1	$\epsilon_a$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-157,8	-165,9	-173,0	-154,1	-123,2	-114,5	-100,0	-208,7	-105,8	-99,8	-95,9
	$\epsilon_b$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-391,1	-418,2	-439,1	-446,9	-466,9	-460,5	-429,6	-566,5	-161,6	-154,4	-149,8
	$\epsilon_c$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-44,2	-27,2	-30,9	-13,3	-145,2	-140,5	-126,2	-167,9	23,2	19,9	18,3
R2	$\epsilon_a$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-170,8	-205,4	-215,5	-154,6	-173,8	-173,2	-111,1	-92,8	-32,7	-33,0	-33,0
	$\epsilon_b$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-188,5	-210,1	-217,7	-212,7	-7,2	-17,0	21,9	41,7	25,5	26,0	25,7
	$\epsilon_c$ ( $\mu\text{m/m}$ )	16,7	73,1	85,1	98,9	36,7	26,4	-2,9	-11,4	-17,3	-20,3	-20,6
R3	$\epsilon_a$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-17,6	-11,6	-2,0	-4,3	20,0	19,3	7,7	6,0	9,7	9,2	8,9
	$\epsilon_b$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-14,1	-21,0	-10,3	1,3	5,6	4,9	2,1	1,8	4,7	4,9	5,0
	$\epsilon_c$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-54,4	-19,8	8,1	26,0	6,4	5,7	4,8	4,4	-28,9	-27,3	-27,1
R4	$\epsilon_a$ ( $\mu\text{m/m}$ )	12,3	2,3	1,1	5,7	28,1	30,2	9,3	7,5	-0,8	-0,6	-0,6
	$\epsilon_b$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-19,2	-15,8	-13,4	-10,7	-6,3	-5,6	16,6	14,1	4,3	4,6	4,8
	$\epsilon_c$ ( $\mu\text{m/m}$ )	-38,8	-23,6	-12,8	-7,6	-14,7	-16,7	23,0	22,5	5,4	6,3	6,4

Taula 033. Valors de deformació aportats per les Rosetes extensiomètriques (02).

## CAPÍTOL 5: RESULTATS

En les Taules 034 i 035 es poden observar els valors de deformació normal i deformació tallant un cop aplicades les fórmules corresponents a les 5 rosetes, en els mateixos moments de l'assaig de les anteriors taules.

		TEMPS										
		70 s	80 s	85 s	90 s	95 s	100 s	105 s	110 s	115 s	120 s	125 s
FORÇA	(kN)	2,1	5,9	14,4	34,2	59,4	82,9	104,3	122,9	140,7	155,7	147,2
R5	$\epsilon_x$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-0,4	-5,4	-14,7	-37,6	-67,0	-87,9	-103,6	-114,0	-123,2	-125,7	-127,8
	$\gamma_{xy}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-1,0	-11,5	-33,7	-92,1	-171,4	-243,1	-287,9	-329,1	-370,0	-411,7	-225,9
	$\epsilon_y$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	0,0	-4,0	-11,2	-28,6	-52,0	-74,1	-101,9	-116,4	-129,6	-140,9	-60,1
R1	$\epsilon_x$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-0,4	-2,5	-6,8	-16,4	-28,6	-37,9	-45,3	-50,2	-53,4	-49,4	-141,1
	$\gamma_{xy}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-3,0	-15,2	-40,1	-99,7	-173,2	-237,0	-294,7	-357,1	-422,1	-499,0	-521,5
	$\epsilon_y$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	0,3	-2,4	-7,0	-17,4	-27,5	-30,4	-28,7	-18,9	-6,6	12,2	-70,0
R2	$\epsilon_x$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-0,7	-3,8	-9,1	-20,4	-34,1	-40,0	-37,5	-32,4	-23,7	-2,7	-142,3
	$\gamma_{xy}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-2,0	-11,5	-29,7	-69,9	-120,9	-168,0	-215,4	-261,2	-308,8	-374,4	-221,4
	$\epsilon_y$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-0,9	-2,9	-6,8	-15,0	-22,4	-25,9	-22,6	-14,8	-4,1	8,8	-8,1
R3	$\epsilon_x$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-0,5	-3,2	-8,4	-20,3	-38,4	-55,6	-67,3	-78,5	-92,4	-102,8	-39,8
	$\gamma_{xy}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	0,9	-1,9	-8,5	-21,9	-39,6	-57,4	-72,8	-87,2	-96,9	-121,8	33,9
	$\epsilon_y$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-0,3	-2,4	-5,8	-14,7	-24,5	-33,7	-39,2	-41,3	-34,2	-21,2	-51,4
R4	$\epsilon_x$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	1,2	0,6	-0,5	-3,1	-7,5	-11,9	-13,8	-14,7	-17,7	-28,7	-0,3
	$\gamma_{xy}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-0,1	-0,5	-2,0	-6,2	-11,2	-14,4	-16,0	-19,3	-18,6	-24,1	-2,4
	$\epsilon_y$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-0,4	-3,0	-7,3	-17,8	-30,3	-40,8	-48,6	-56,3	-50,6	-28,7	-23,9

Taula 034. Valors de deformació normal en x ( $\epsilon_x$ ), deformació normal en y ( $\epsilon_y$ ) i deformació tallant en el pla ( $\gamma_{xy}$ ) (01).

		TEMPS										
		130 s	135 s	140 s	145 s	150 s	155 s	160 s	165 s	170 s	175 s	180 s
FORÇA	(kN)	153,6	159,5	165,1	162,9	151,1	157,7	158,3	148,7	40,9	39,0	38,1
R5	$\epsilon_x$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-98,1	-82,7	-74,0	-68,2	-38,0	-42,4	-47,5	-38,5	-22,0	-21,6	-21,8
	$\gamma_{xy}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-181,8	-153,7	-143,5	-138,1	-80,7	-89,4	-98,6	-76,9	-46,7	-45,0	-45,7
	$\epsilon_y$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-48,3	-37,2	-34,6	-33,8	-15,3	-18,9	-22,2	-13,1	-2,9	-3,0	-2,8
R1	$\epsilon_x$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-157,8	-165,9	-173,0	-154,1	-123,2	-114,5	-100,0	-208,7	-105,8	-99,8	-95,9
	$\gamma_{xy}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-580,3	-643,1	-674,2	-726,6	-665,4	-666,0	-633,0	-756,3	-240,6	-229,0	-221,9
	$\epsilon_y$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-44,2	-27,2	-30,9	-13,3	-145,2	-140,5	-126,2	-167,9	23,2	19,9	18,3
R2	$\epsilon_x$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-170,8	-205,4	-215,5	-154,6	-173,8	-173,2	-111,1	-92,8	-32,7	-33,0	-33,0
	$\gamma_{xy}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-222,9	-287,9	-305,0	-369,7	122,7	112,9	157,8	187,6	100,9	105,4	105,0
	$\epsilon_y$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	16,7	73,1	85,1	98,9	36,7	26,4	-2,9	-11,4	-17,3	-20,3	-20,6
R3	$\epsilon_x$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-17,6	-11,6	-2,0	-4,3	20,0	19,3	7,7	6,0	9,7	9,2	8,9
	$\gamma_{xy}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	43,7	-10,6	-26,8	-19,1	-15,1	-15,1	-8,2	-6,8	28,7	28,0	28,2
	$\epsilon_y$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-54,4	-19,8	8,1	26,0	6,4	5,7	4,8	4,4	-28,9	-27,3	-27,1
R4	$\epsilon_x$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	12,3	2,3	1,1	5,7	28,1	30,2	9,3	7,5	-0,8	-0,6	-0,6
	$\gamma_{xy}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-11,9	-10,4	-15,0	-19,5	-26,0	-24,8	0,8	-1,9	4,1	3,4	3,8
	$\epsilon_y$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-38,8	-23,6	-12,8	-7,6	-14,7	-16,7	23,0	22,5	5,4	6,3	6,4

Taula 035. Valors de deformació normal en x ( $\epsilon_x$ ), deformació normal en y ( $\epsilon_y$ ) i deformació tallant en el pla ( $\gamma_{xy}$ ) (02).



## CAPÍTOL 5: RESULTATS

En les taules 036 i 037 poden observar els valors de deformació unitàries dels esforços principals major i menor, i els seus respectius angles respecte el pla horitzontal. En aquesta taula s'han agregat també els segons 122 (abans i després de l'aparició de l'esquerda de l'esquerra) i el segon 144 (quan es genera l'esquerda de la dreta):

		TEMPS										
		80 s	85 s	90 s	95 s	100 s	105 s	110 s	115 s	120 s	122 s	122 s
FORÇA	(kN)	5,9	14,4	34,2	59,4	82,9	104,3	122,9	140,7	155,7	160,2	153,0
R5	$\epsilon_1$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	1,1	4,0	13,2	26,5	40,7	41,2	49,3	58,6	72,7	79,5	37,8
		176,6 <sup>e</sup>	177,1 <sup>e</sup>	177,2 <sup>e</sup>	177,5 <sup>e</sup>	178,4 <sup>e</sup>	179,8 <sup>e</sup>	0,2 <sup>e</sup>	0,5 <sup>e</sup>	1,1 <sup>e</sup>	0,6 <sup>e</sup>	174,201
	$\epsilon_2$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-10,5	-29,9	-79,4	-145,6	-202,7	-246,7	-279,8	-311,5	-339,3	-331,0	-261,0
R1	$\epsilon_1$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	86,6 <sup>e</sup>	87,1 <sup>e</sup>	87,2 <sup>e</sup>	87,5 <sup>e</sup>	88,4 <sup>e</sup>	89,8 <sup>e</sup>	90,2 <sup>e</sup>	90,5 <sup>e</sup>	91,1 <sup>e</sup>	90,6 <sup>e</sup>	264,201
		5,1	13,2	33,0	58,5	84,5	110,6	144,7	182,3	232,8	-24,8	-9,7
	$\epsilon_2$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	179,7 <sup>e</sup>	0,2 <sup>e</sup>	0,3 <sup>e</sup>	179,8 <sup>e</sup>	179,1 <sup>e</sup>	178,4 <sup>e</sup>	177,5 <sup>e</sup>	176,8 <sup>e</sup>	176,5 <sup>e</sup>	118,2 <sup>e</sup>	47,7961
R2	$\epsilon_1$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-10,1	-26,9	-66,7	-114,7	-152,7	-184,6	-213,8	-242,3	-270,0	-42,9	-15,4
		89,7 <sup>e</sup>	90,2 <sup>e</sup>	90,3 <sup>e</sup>	89,8 <sup>e</sup>	89,1 <sup>e</sup>	88,4 <sup>e</sup>	87,5 <sup>e</sup>	86,8 <sup>e</sup>	86,5 <sup>e</sup>	28,2 <sup>e</sup>	137,796
	$\epsilon_2$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	2,4	6,9	17,4	32,5	51,4	77,9	107,3	140,8	190,4	16,4	-36,7
R3	$\epsilon_1$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	177,9 <sup>e</sup>	177,7 <sup>e</sup>	177,8 <sup>e</sup>	177,2 <sup>e</sup>	177,6 <sup>e</sup>	178,0 <sup>e</sup>	178,1 <sup>e</sup>	178,2 <sup>e</sup>	179,1 <sup>e</sup>	164,6 <sup>e</sup>	141,323
		-9,1	-22,8	-52,8	-89,0	-117,2	-138,0	-154,5	-168,6	-184,3	-137,5	-106,3
	$\epsilon_2$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	87,9 <sup>e</sup>	87,7 <sup>e</sup>	87,8 <sup>e</sup>	87,2 <sup>e</sup>	87,6 <sup>e</sup>	88,0 <sup>e</sup>	88,1 <sup>e</sup>	88,2 <sup>e</sup>	89,1 <sup>e</sup>	74,6 <sup>e</sup>	51,3229
R4	$\epsilon_1$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-1,8	-2,7	-6,2	-10,5	-13,9	-14,2	-12,5	-6,8	11,3	214,7	94,7
		167,6 <sup>e</sup>	171,4 <sup>e</sup>	172,9 <sup>e</sup>	170,4 <sup>e</sup>	169,6 <sup>e</sup>	169,5 <sup>e</sup>	168,4 <sup>e</sup>	164,5 <sup>e</sup>	163,1 <sup>e</sup>	179,8 <sup>e</sup>	176,948
	$\epsilon_2$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-3,8	-11,5	-28,8	-52,4	-75,3	-92,2	-107,3	-119,8	-135,3	-192,4	-198,5
R5	$\epsilon_1$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	77,6 <sup>e</sup>	81,4 <sup>e</sup>	82,9 <sup>e</sup>	80,4 <sup>e</sup>	79,6 <sup>e</sup>	79,5 <sup>e</sup>	78,4 <sup>e</sup>	74,5 <sup>e</sup>	73,1 <sup>e</sup>	89,8 <sup>e</sup>	86,9484
		0,6	-0,4	-2,5	-6,2	-10,2	-12,1	-12,5	-15,3	-16,6	261,3	171,3
	$\epsilon_2$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	41,3 <sup>e</sup>	36,8 <sup>e</sup>	33,6 <sup>e</sup>	32,0 <sup>e</sup>	31,8 <sup>e</sup>	32,7 <sup>e</sup>	32,6 <sup>e</sup>	30,3 <sup>e</sup>	0,0 <sup>e</sup>	86,2 <sup>e</sup>	87,15
R1	$\epsilon_1$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-3,0	-7,5	-18,4	-31,6	-42,5	-50,4	-58,4	-53,0	-40,8	-287,4	-347,4
		131,3 <sup>e</sup>	126,8 <sup>e</sup>	123,6 <sup>e</sup>	122,0 <sup>e</sup>	121,8 <sup>e</sup>	122,7 <sup>e</sup>	122,6 <sup>e</sup>	120,3 <sup>e</sup>	90,0 <sup>e</sup>	176,2 <sup>e</sup>	177,15
	$\epsilon_2$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )											

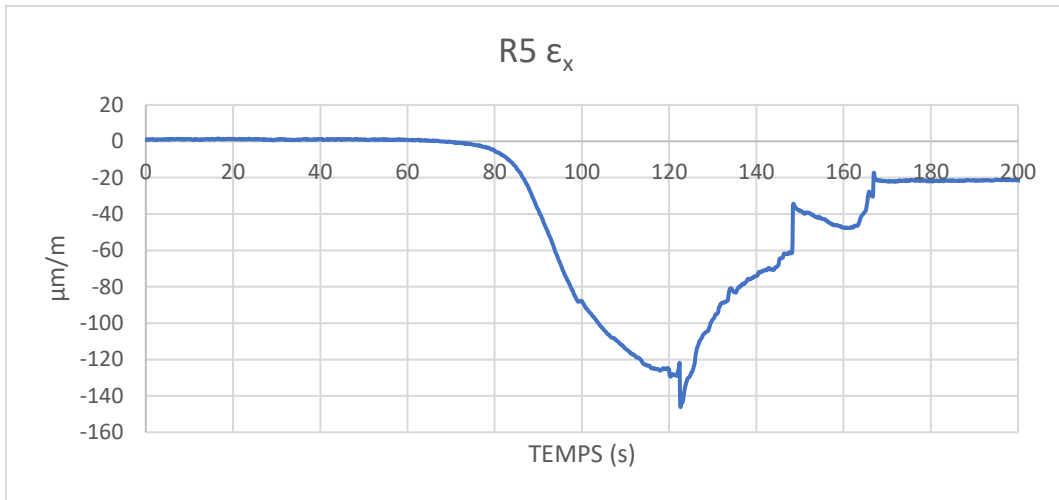
Taula 036. Valors de deformacions unitàries amb major valor ( $\epsilon_1$ ), en menor valor ( $\epsilon_1$ ) amb la inclinació dels seus eixos respecte el pla horitzontal (01).

		TEMPS									
		125 s	130 s	135 s	140 s	144 s	145 s	150 s	155 s	160 s	165 s
FORÇA	(kN)	147,2	153,6	159,5	165,1	165,4	162,9	151,1	157,7	158,3	148,7
R5	$\epsilon_1$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	23,9	21,0	20,2	20,1	19,6	20,2	15,2	15,6	16,1	14,7
		171,7 <sup>e</sup>	172,4 <sup>e</sup>	171,8 <sup>e</sup>	172,3 <sup>e</sup>	172,6 <sup>e</sup>	173,0 <sup>e</sup>	172,1 <sup>e</sup>	172,6 <sup>e</sup>	172,8 <sup>e</sup>	170,884
	$\epsilon_2$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-211,9	-167,4	-140,1	-128,7	-124,3	-122,2	-68,6	-76,9	-85,8	-66,3
R1	$\epsilon_1$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	81,7 <sup>e</sup>	82,4 <sup>e</sup>	81,8 <sup>e</sup>	82,3 <sup>e</sup>	82,6 <sup>e</sup>	83,0 <sup>e</sup>	82,1 <sup>e</sup>	82,6 <sup>e</sup>	82,8 <sup>e</sup>	80,8841
		157,6	194,7	232,4	242,5	5,2	286,4	198,7	205,8	203,7	190,4
	$\epsilon_2$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	176,1 <sup>e</sup>	174,5 <sup>e</sup>	173,9 <sup>e</sup>	174,0 <sup>e</sup>	92,6 <sup>e</sup>	174,5 <sup>e</sup>	0,9 <sup>e</sup>	1,1 <sup>e</sup>	1,2 <sup>e</sup>	178,454
R2	$\epsilon_1$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-368,7	-396,6	-425,6	-446,5	-24,7	-453,7	-467,0	-460,7	-429,8	-567,0
		86,1 <sup>e</sup>	84,5 <sup>e</sup>	83,9 <sup>e</sup>	84,0 <sup>e</sup>	2,6 <sup>e</sup>	84,5 <sup>e</sup>	90,9 <sup>e</sup>	91,1 <sup>e</sup>	91,2 <sup>e</sup>	88,4543
	$\epsilon_2$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	54,3	68,6	134,1	148,9	27,2	196,3	53,2	41,3	38,7	50,2
R3	$\epsilon_1$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	164,4 <sup>e</sup>	160,0 <sup>e</sup>	158,0 <sup>e</sup>	157,7 <sup>e</sup>	152,3 <sup>e</sup>	162,8 <sup>e</sup>	119,9 <sup>e</sup>	120,3 <sup>e</sup>	107,2 <sup>e</sup>	101,735
		-204,6	-222,7	-266,4	-279,3	-6,1	-251,9	-190,4	-188,1	-152,6	-154,4
	$\epsilon_2$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	74,4 <sup>e</sup>	70,0 <sup>e</sup>	68,0 <sup>e</sup>	67,7 <sup>e</sup>	62,3 <sup>e</sup>	72,8 <sup>e</sup>	29,9 <sup>e</sup>	30,3 <sup>e</sup>	17,2 <sup>e</sup>	11,735
R4	$\epsilon_1$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-27,7	-7,4	-9,0	17,4	192,5	28,7	23,3	22,7	10,6	8,7
		80,6 <sup>e</sup>	69,9 <sup>e</sup>	18,9 <sup>e</sup>	169,7 <sup>e</sup>	163,0 <sup>e</sup>	151,1 <sup>e</sup>	21,0 <sup>e</sup>	21,1 <sup>e</sup>	9,5 <sup>e</sup>	6,60858
	$\epsilon_2$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-63,5	-64,5	-22,4	-11,2	-259,0	-7,1	3,0	2,3	1,9	1,7
R5	$\epsilon_1$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	170,6 <sup>e</sup>	159,9 <sup>e</sup>	-71,1 <sup>e</sup>	79,7 <sup>e</sup>	73,0 <sup>e</sup>	61,1 <sup>e</sup>	-69,0 <sup>e</sup>	-68,9 <sup>e</sup>	-80,5 <sup>e</sup>	-83,391
		-0,2	13,0	3,3	4,4	283,8	10,8	31,8	33,3	23,0	22,6
	$\epsilon_2$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	42,1 <sup>e</sup>	38,4 <sup>e</sup>	34,0 <sup>e</sup>	21,4 <sup>e</sup>	174,2 <sup>e</sup>	17,1 <sup>e</sup>	29,4 <sup>e</sup>	31,0 <sup>e</sup>	133,4 <sup>e</sup>	138,519
R1	$\epsilon_1$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-24,0	-39,5	-24,6	-16,1	-458,5	-12,7	-18,3	-19,7	9,3	7,4
		132,1 <sup>e</sup>	128,4 <sup>e</sup>	124,0 <sup>e</sup>	111,4 <sup>e</sup>	264,2 <sup>e</sup>	107,1 <sup>e</sup>	119,4 <sup>e</sup>	121,0 <sup>e</sup>	43,4 <sup>e</sup>	48,5188
	$\epsilon_2$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )										

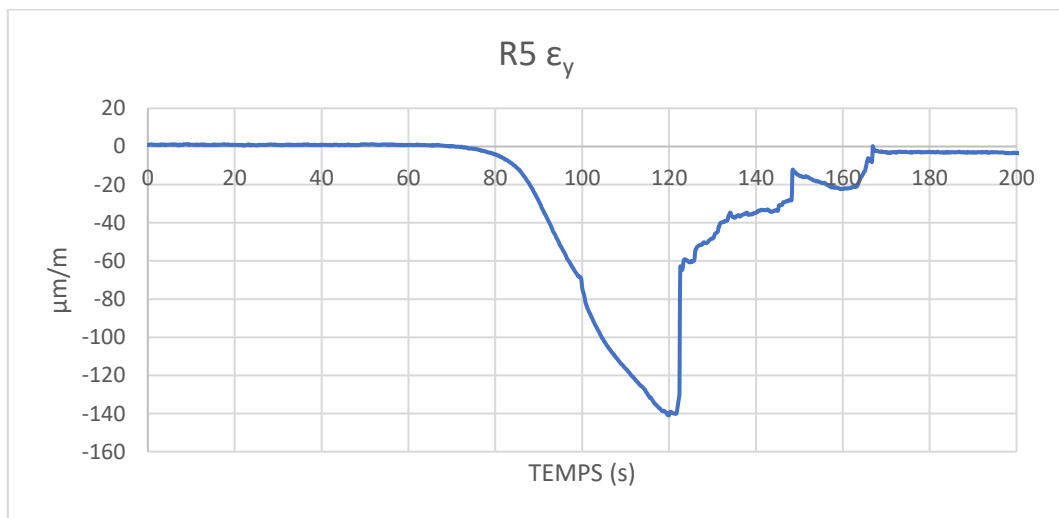
Taula 037. Valors de deformacions unitàries amb major valor ( $\epsilon_1$ ), en menor valor ( $\epsilon_1$ ) amb la inclinació dels seus eixos respecte el pla horitzontal (02).

Es procedeix a mostrar gràficament les dades obtinguts amb les dades de les rosetes i a descriure els resultats:

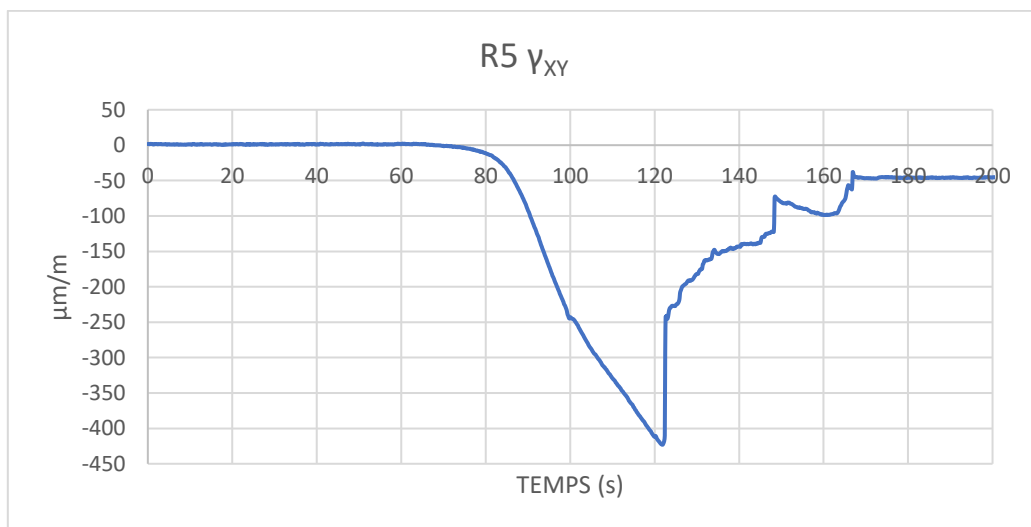
**a) Roseta extensomètrica R5**

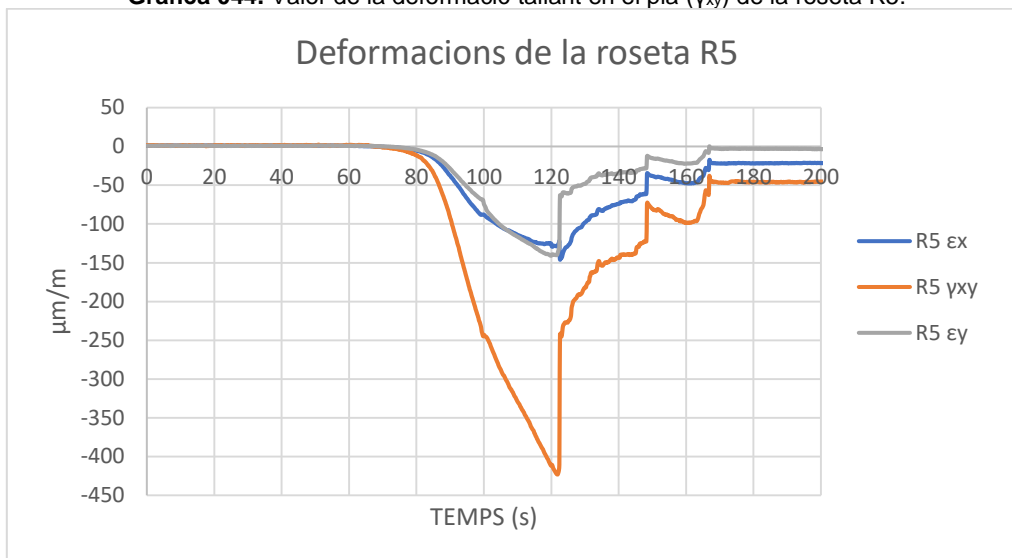


**Gràfica 042.** Valor de deformació  $\epsilon_x$  - valor de deformació normal en x  $\epsilon_x$  de la roseta R5.



**Gràfica 043.** Valor de deformació  $\epsilon_y$  - valor de deformació normal en y  $\epsilon_y$  de la roseta R5.



**Gràfica 044.** Valor de la deformació tallant en el pla ( $\gamma_{xy}$ ) de la roseta R5.**Gràfica 045.** Valors de deformació normal en x ( $\epsilon_x$ ), la deformació normal en y ( $\epsilon_y$ ) i la deformació tallant en el pla ( $\gamma_{xy}$ ) de la Roseta R5.

En el segon 80 és quan comencen a aparèixer les deformacions, ja que és quan el mur comença a rebre la força aplicada.

Les deformacions unitàries augmenten de forma mes o menys lineal fins al segon 122, que arriben fins a:

- $\epsilon_x$ : -146  $\mu\text{m}/\text{m}$ .
- $\gamma_{xy}$ : -420  $\mu\text{m}/\text{m}$ .
- $\epsilon_y$ : -140  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

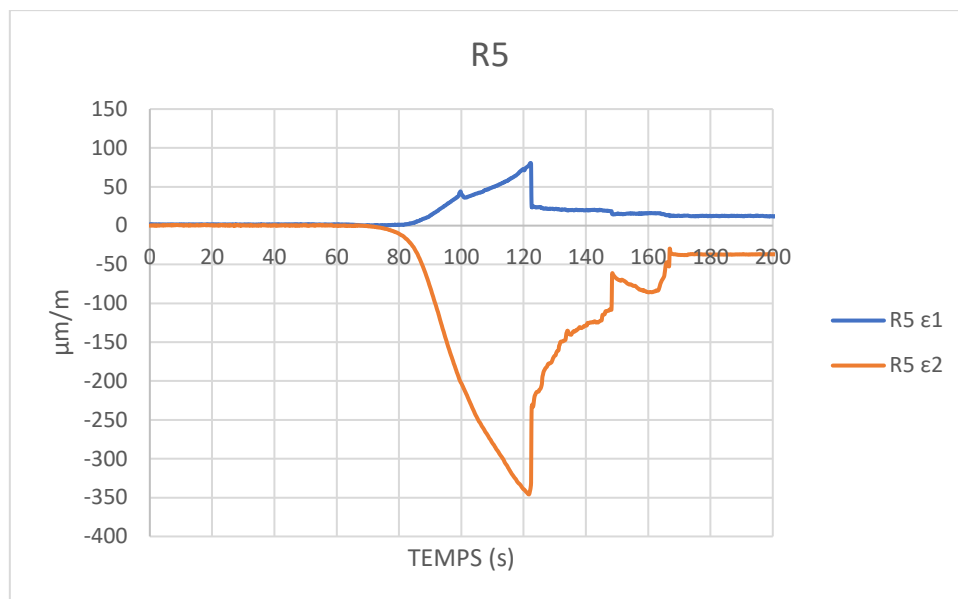
Es pot comprovar en la gràfica que els valors de deformació són més alts en la de la deformació tallant en el pla ( $\gamma_{xy}$ ) en aquest punt, i que les deformacions en les altres dues direccions són bastant similars.

En el segon 122 apareix la primera esquerda vertical en el mur, i aquesta es situa entre la roseta R5 i el centre del mur. Aquesta esquerda el que provoca és que les tensions que es transmetien a la zona esquerra de la zona d'estudi (zona situada la roseta R5) disminueixin considerablement i es distribueixin cap al centre del mur.

A partir del segon 122, la deformació unitària de la roseta R5 comença a disminuir fins al segon 147, on apareix un pic de disminució arribant als valors:

- $\epsilon_x$ : -28  $\mu\text{m}/\text{m}$ .
- $\gamma_{xy}$ : -78  $\mu\text{m}/\text{m}$ .
- $\epsilon_y$ : -14  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

La roseta augmenta la seva deformació unitària fins al segon 163 on torna a disminuir fins al segon 165, on es dona per finalitzat l'assaig.



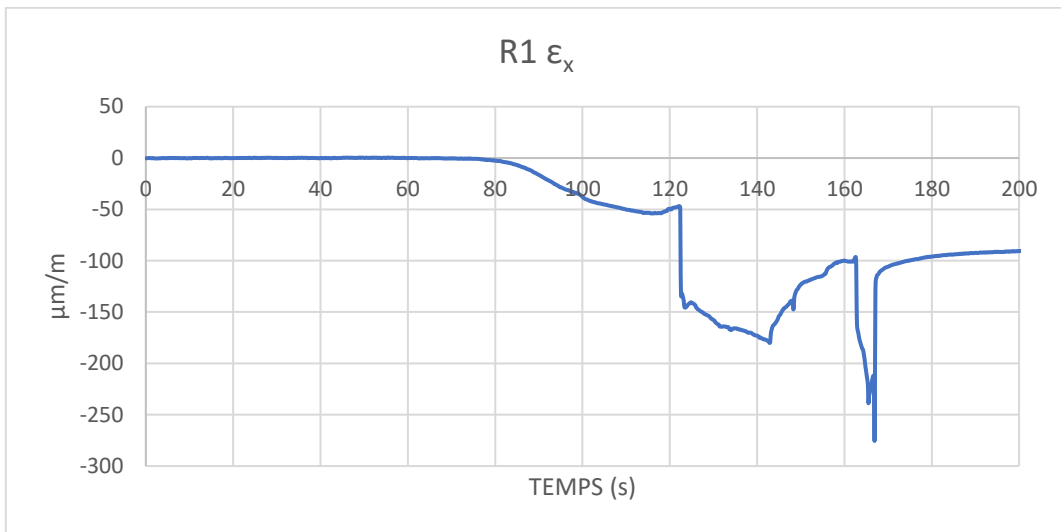
**Gràfica 046.** Valors de deformacions unitàries dels esforços principals amb major valor ( $\epsilon_1$ ), en menor valor ( $\epsilon_2$ ) de la Roseta R5.

En les deformacions dels esforços principals, es pot comprovar que entre els segons 80 i 122,  $\epsilon_1$  es va traccionant fins arribar a 80  $\mu\text{m}/\text{m}$ , i  $\epsilon_2$  es va comprimint fins arribar a -347  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

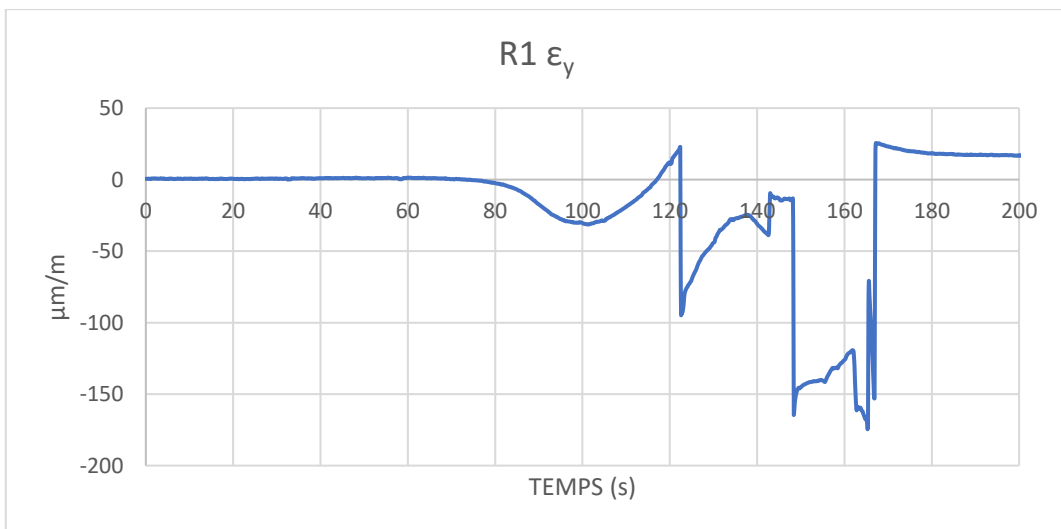
En el moment que es produeix l'esquerda vertical de l'esquerra, entre les rosetes R5 i R1, tant les deformacions a tracció com a compressió disminueixen. En un primer moment,  $\epsilon_1$  passa de estar traccionada de 80 a 23  $\mu\text{m}/\text{m}$  mantenint-se estable perdent tracció de forma lleugera, mentre que  $\epsilon_2$  passa de estar comprimit de -347 a -225  $\mu\text{m}/\text{m}$  instantàniament, per seguir perdent deformació a compressió fins al segon 147.

En el segon 147, la màxima deformació baixa sobtadament de -225 a -68  $\mu\text{m}/\text{m}$  i seguidament torna a recuperar-la, fins que es dona per acabat l'assaig.

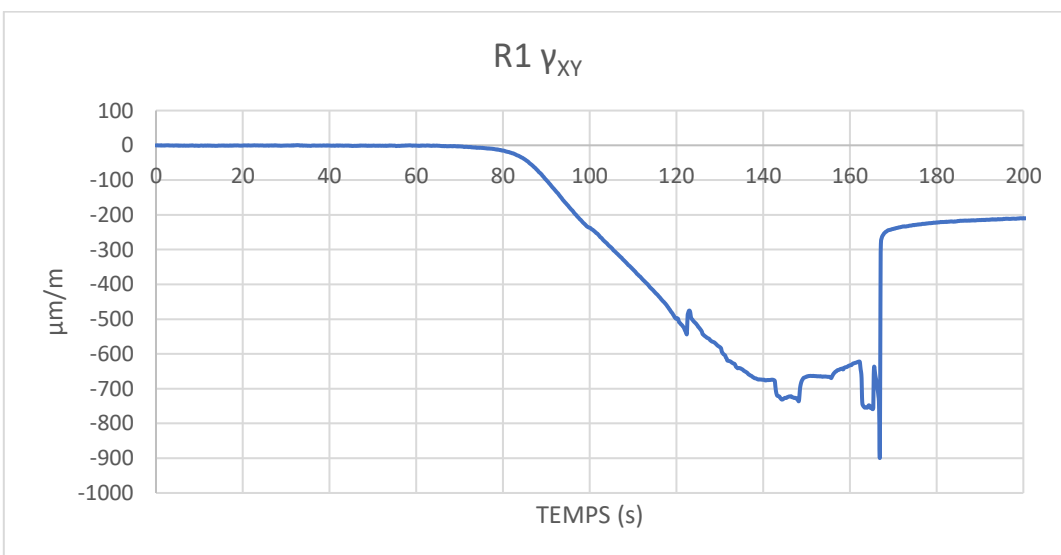
b) Roseta extensomètrica R1



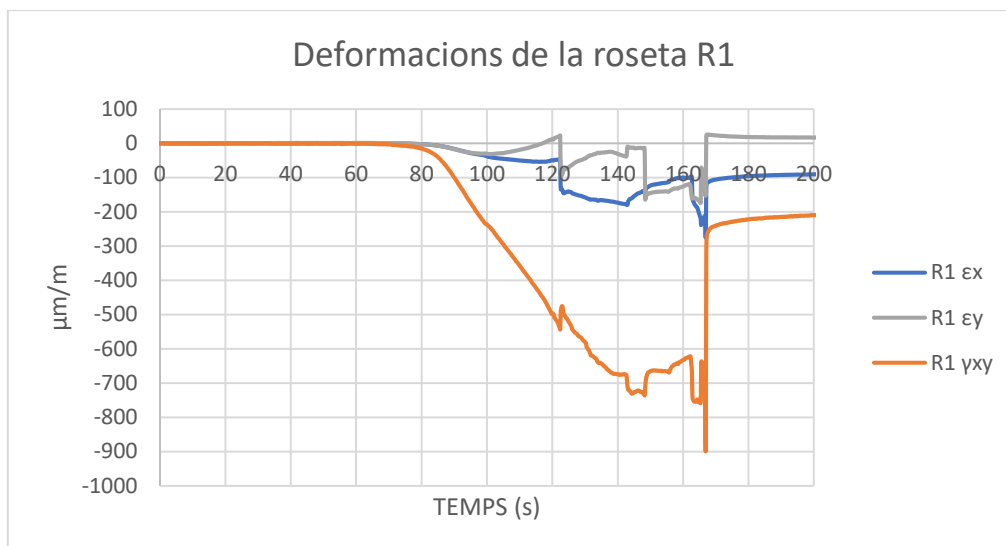
Gràfica 047. Valor de deformació  $\epsilon_a$  - valor de deformació normal en x  $\epsilon_x$  de la roseta R1.



Gràfica 048. Valor de deformació  $\epsilon_c$  - valor de deformació normal en y  $\epsilon_y$  de la roseta R1.



Gràfica 049. Valor de la deformació tallant en el pla ( $\gamma_{xy}$ ) de la roseta R1.



**Gràfica 050.** Valors de deformació normal en x ( $\epsilon_x$ ), la deformació normal en y ( $\epsilon_y$ ) i la deformació tallant en el pla ( $\gamma_{xy}$ ) de la Roseta R1.

Es pot comprovar en la gràfica, que els valors de deformació són més alts, pertanyen a la deformació tallant en el pla ( $\gamma_{xy}$ ), i que les deformacions que es produeixen en les altres dues direccions són molt petites comparades amb la primera.

En el segon 80 és quan comencen a aparèixer les deformacions, ja que és quan en mur comença a rebre la força aplicada.

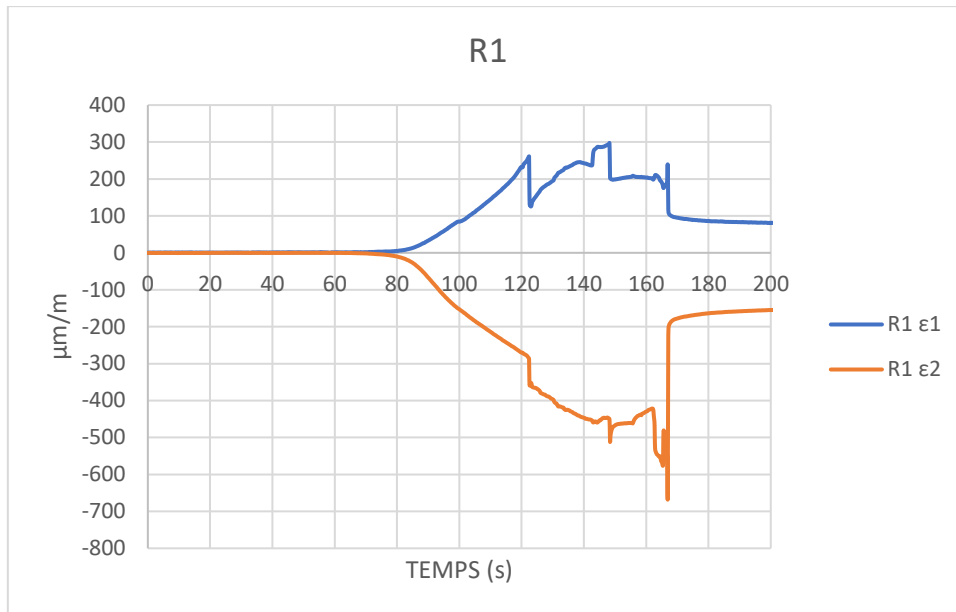
Les deformacions unitàries augmenten de forma mes o menys lineal fins al segon 122, on es crea el primer pic, ja que és el moment on apareix la primera esquerd vertical. En la gràfica es pot llegir que la direcció de les deformacions és principalment vertical, amb una lleugera inclinació en sentit horari. En aquest segon les deformacions que apareixen són:

- $\epsilon_x$ : -62  $\mu\text{m}/\text{m}$ .
- $\gamma_{xy}$ : -544  $\mu\text{m}/\text{m}$ .
- $\epsilon_y$ : 20  $\mu\text{m}/\text{m}$  (tracció).

La deformació unitària a tallant del pla continua augmentant fins al segon 144, on apareix un pic d'augment de compressió, que termina en el segon 149, on la deformació es manté més o menys estable, arribant a disminuir un poc fins al segon 162. Durant aquest període ha aparegut la segona esquerd vertical a la zona dreta del mur, i s'estan formant esquerdes en la base de recolzament del perfil metàl·lic, fent que les tensions es distribueixin cap al centre.

La roseta augmenta la seva deformació unitària fins al segon 163 on torna a disminuir fins al segon 165, on les deformacions augment molt bruscament a ser:

- $\epsilon_x$ : -269  $\mu\text{m}/\text{m}$ .
- $\gamma_{xy}$ : -900  $\mu\text{m}/\text{m}$ .
- $\epsilon_y$ : -164  $\mu\text{m}/\text{m}$ .



**Gràfica 051.** Valors de deformacions unitàries dels esforços principals amb major valor ( $\epsilon_1$ ), en menor valor ( $\epsilon_2$ ) de la Roseta R1.

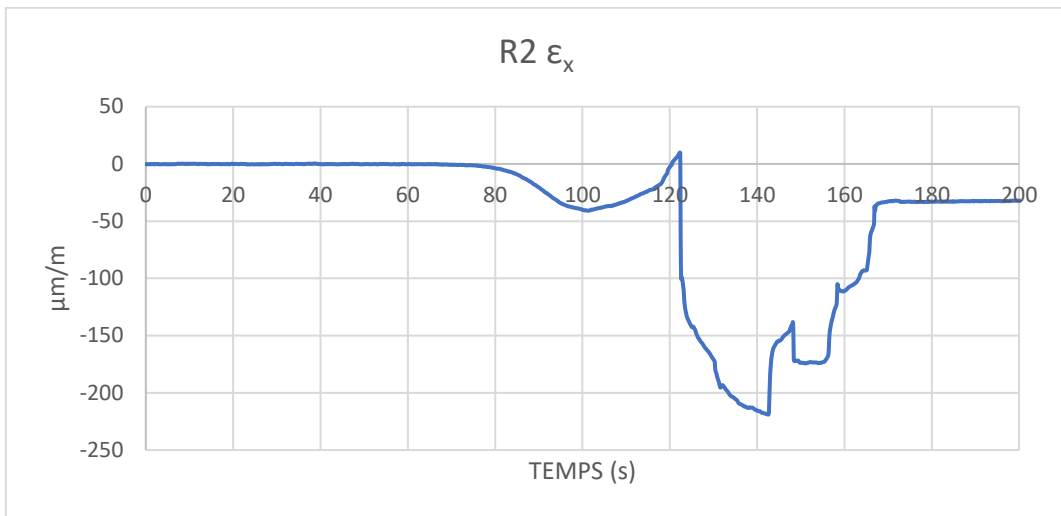
En les deformacions dels esforços principals, es pot comprovar que entre els segons 80 i 122,  $\epsilon_1$  es va traccionant fins arribar a 260  $\mu\text{m}/\text{m}$ , i  $\epsilon_2$  es va comprimint fins arribar a -285  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

En el moment que es produeix l'esquerda de l'esquerda, entre les rosetes R5 i R1, les deformacions a tracció disminueixen passant de 260 a 127  $\mu\text{m}/\text{m}$  i les deformacions a compressió augmenten de -285 a -360  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Del segon 122 als 143 la tracció i compressió màxima continuen augmentant.

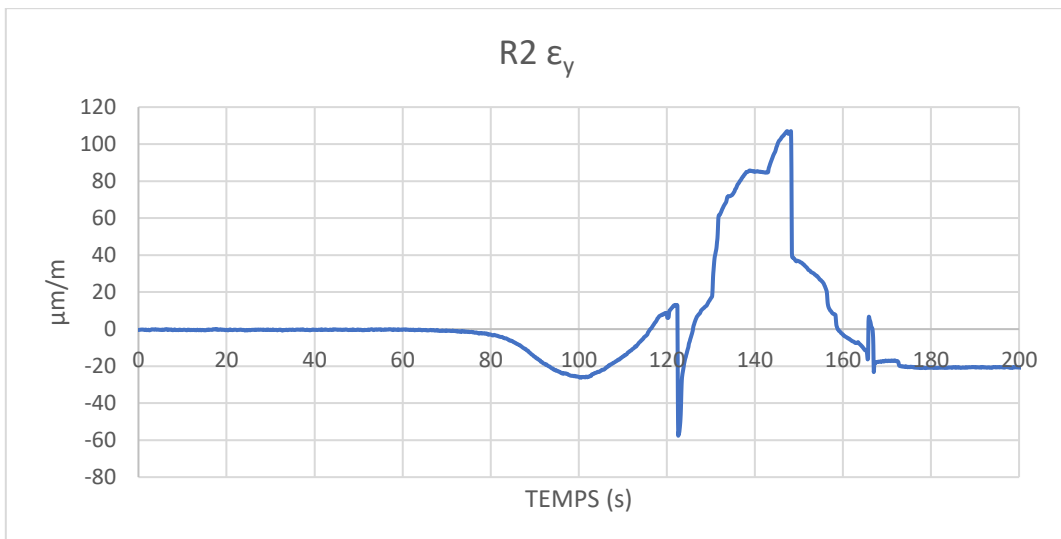
$\epsilon_1$  augmenta la tracció en el segon 143 i la perd al 148, passant de 250 a 295 a 199  $\mu\text{m}/\text{m}$ . i  $\epsilon_2$  forma un pic de compressió en el segon 148 va comprimint fins arribar a -285  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

$\epsilon_1$  i  $\epsilon_2$  es mantenen mes o ment estables fins al segon 162, on ambdós augmenten sobtadament, passant  $\epsilon_1$  a una tracció de 240  $\mu\text{m}/\text{m}$  i  $\epsilon_2$  a una compressió màxima de -668  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

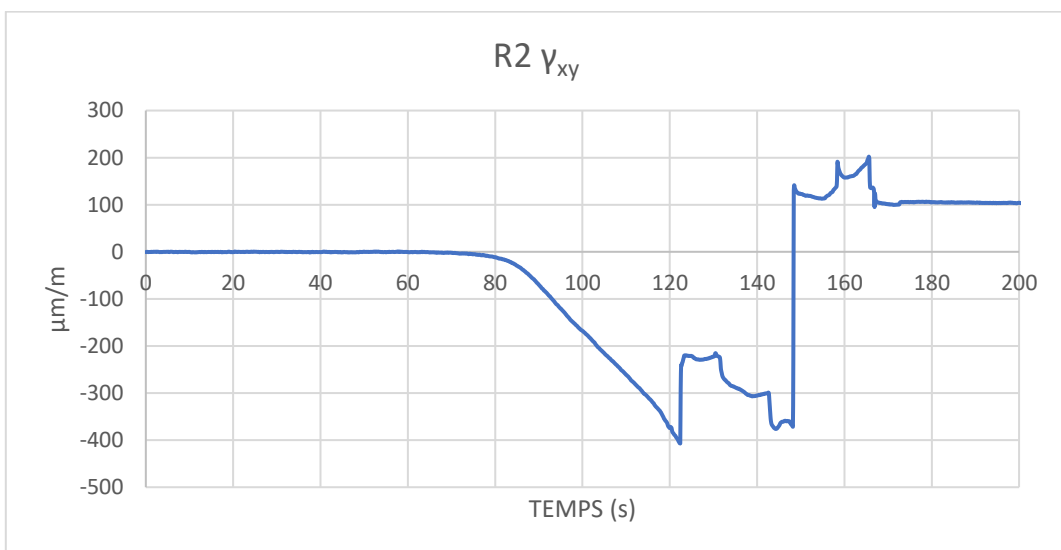
c) Roseta extensomètrica R2



**Gràfica 052.** Valor de deformació  $\epsilon_x$  - valor de deformació normal en x  $\epsilon_x$  de la roseta R2.

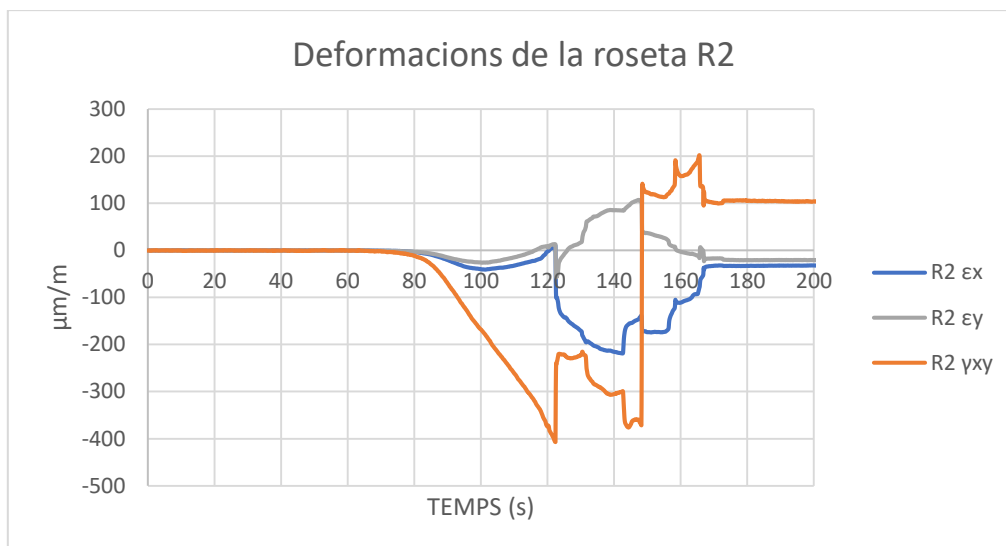


**Gràfica 053.** Valor de deformació  $\epsilon_y$  - valor de deformació normal en y  $\epsilon_y$  de la roseta R2.



**Gràfica 054.** Valor de la deformació tallant en el pla ( $\gamma_{xy}$ ) de la roseta R2.





**Gràfica 055.** Valors de deformació normal en x ( $\epsilon_x$ ), la deformació normal en y ( $\epsilon_y$ ) i la deformació tallant en el pla ( $\gamma_{xy}$ ) de la Roseta R2.

En el segon 80 és quan comencen a aparèixer les deformacions, ja que és quan el mur comença a rebre la força aplicada.

La deformació vertical augmenta de forma més o menys lineal fins al segon 122. Les deformacions de normal x i la normal y són pròximes a 0. El que ens indica que les deformacions es distribueixen quasi completament verticals. En aquest moment les deformacions són:

- $\epsilon_x$ : 6  $\mu\text{m}/\text{m}$  (tracció).
- $\gamma_{xy}$ : -406  $\mu\text{m}/\text{m}$ .
- $\epsilon_y$ : 10  $\mu\text{m}/\text{m}$  (tracció).

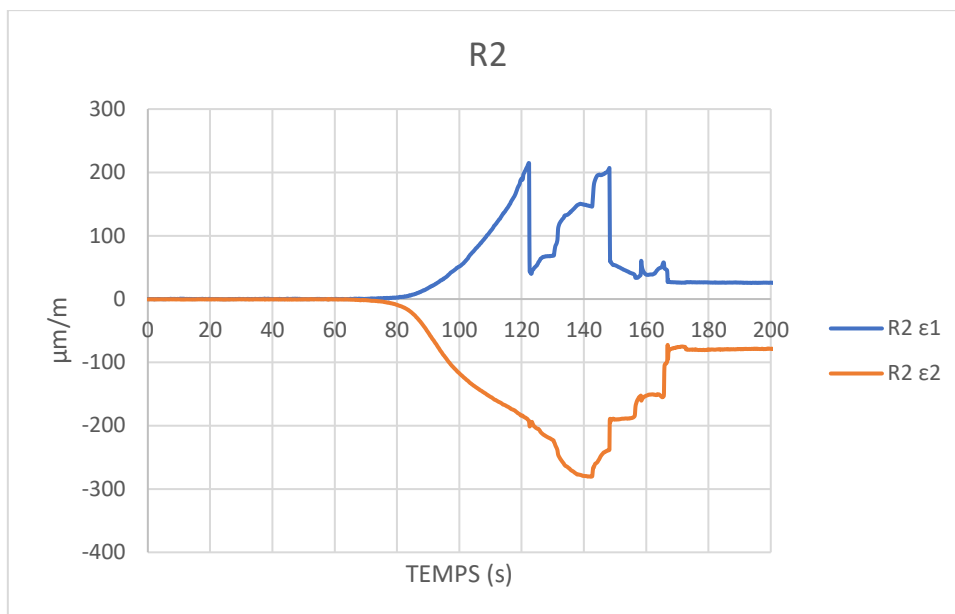
En el segon 122 apareix la primera esquerra vertical en el mur. Aquesta esquerra provoca que la deformació tallant en el pla disminueixi fins a -224  $\mu\text{m}/\text{m}$  i que torni a augmentar-la, la deformació normal en x augmenti considerablement a compressió i la deformació normal en y es vegi traccionada.

Llegint la gràfica, podem entendre que durant els segons 122 i 142 les tensions es redistribueixen principalment cap al centre de la zona d'estudi. Entre els segons 142 i 148 la deformació tallant en el pla augmenta i la deformació normal en x disminueix, indicant que les tensions s'estan desplaçant en el sentit vertical.

En el segon 148 hi ha un canvi molt brusc en el sentit de les deformacions i els valors passen a ser:

- $\epsilon_x$ : de 104 (tracció) a 35  $\mu\text{m}/\text{m}$  (tracció).
- $\gamma_{xy}$ : de -365 a 134  $\mu\text{m}/\text{m}$  (tracció).
- $\epsilon_y$ : de -148 a -174  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Aquest canvi tan de repent pot ser ocasionat a l'aparició de la segona gran esquerra vertical, la qual provoca que les tensions que es transmetien a la zona dreta de la zona d'estudi (zona situada a la roseta R2) es distribueixin cap al centre.



**Gràfica 056.** Valors de deformacions unitàries dels esforços principals amb major valor ( $\epsilon_1$ ), en menor valor ( $\epsilon_2$ ) de la Roseta R2.

En les deformacions dels esforços principals, es pot comprovar que entre els segons 80 i 122,  $\epsilon_1$  es va traccionant fins arribar a 212  $\mu\text{m}/\text{m}$ , i  $\epsilon_2$  es va comprimint fins arribar a -199  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

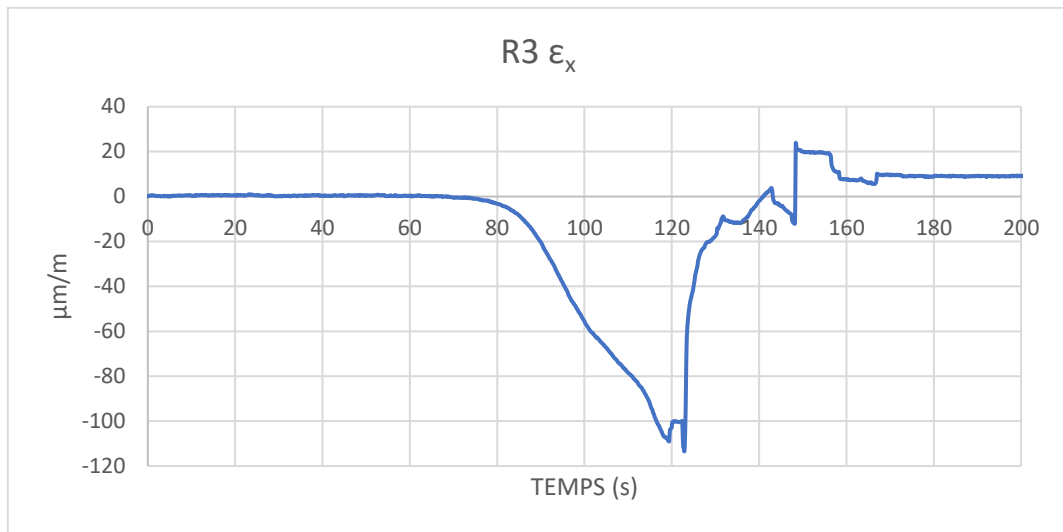
En el moment que es produeix l'esquerda de l'esquerra, les deformacions a tracció disminueixen passant de 212 a 40  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

$\epsilon_2$  continua augmentant la seva deformació a compressió fins el segon 142, arribant a -280  $\mu\text{m}/\text{m}$ , on comença a perdre esforç a compressió de forma esglaonada. Aquests canvis s'originen en:

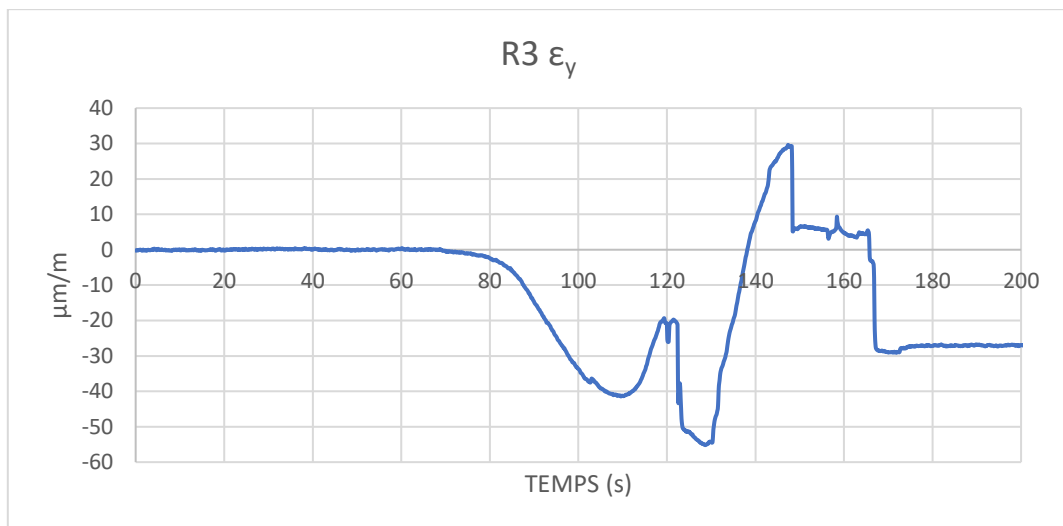
- El segon 147, passant de -240 a -189  $\mu\text{m}/\text{m}$ .
- El segon 156, passant de -187 a -155  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

$\epsilon_1$  augmenta la seva deformació a tracció des del segon 122 fins 147 de forma esglaonada, arribant una deformació unitària a tracció de a 206  $\mu\text{m}/\text{m}$ . En el segon 147 perd tracció sobtadament arribant a 59  $\mu\text{m}/\text{m}$ . A partir d'aquest moment continua perdent tracció lleugerament, formant un parell de pics a tracció, fins finalitzar l'assaig.

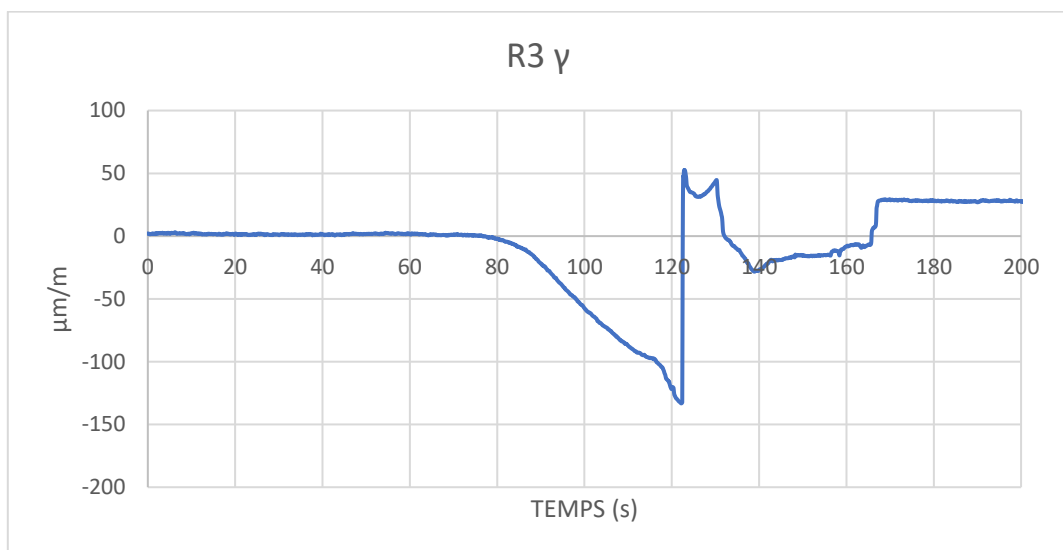
d) Roseta extensiomètrica R3



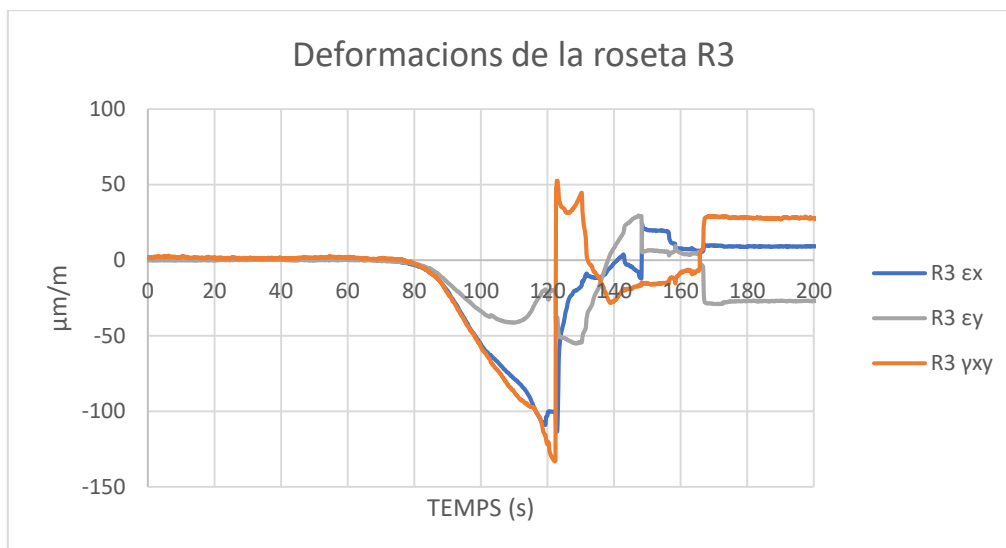
**Gràfica 057.** Valor de deformació normal en x  $\epsilon_x$  de la roseta R3.



**Gràfica 058.** Valor de deformació normal en y  $\epsilon_y$  de la roseta R3.



**Gràfica 059.** Valor de la deformació tallant en el pla ( $\gamma_{xy}$ ) de la roseta R3.



**Gràfica 060.** Valors de deformació normal en x ( $\epsilon_x$ ), la deformació normal en y ( $\epsilon_y$ ) i la deformació tallant en el pla ( $\gamma_{xy}$ ) de la Roseta R3.

En el segon 80 és quan comencen a aparèixer les deformacions, ja que és quan el mur comença a rebre la força aplicada.

En la gràfica es pot veure que la deformació en el pla x i la deformació tallant en el pla és similar fins al segon 122, on ambdues baixen abruptament. En aquest període la deformació a compressió en el pla y augmenta lleugerament fins al segon 110 i disminueix fins al segon 122. En aquest moment les deformacions varien de:

- $\epsilon_x$ : de -113 a -50  $\mu\text{m}/\text{m}$ .
- $\gamma_{xy}$ : de -133 a 52  $\mu\text{m}/\text{m}$  (tracció).
- $\epsilon_y$ : de -20 a -50  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

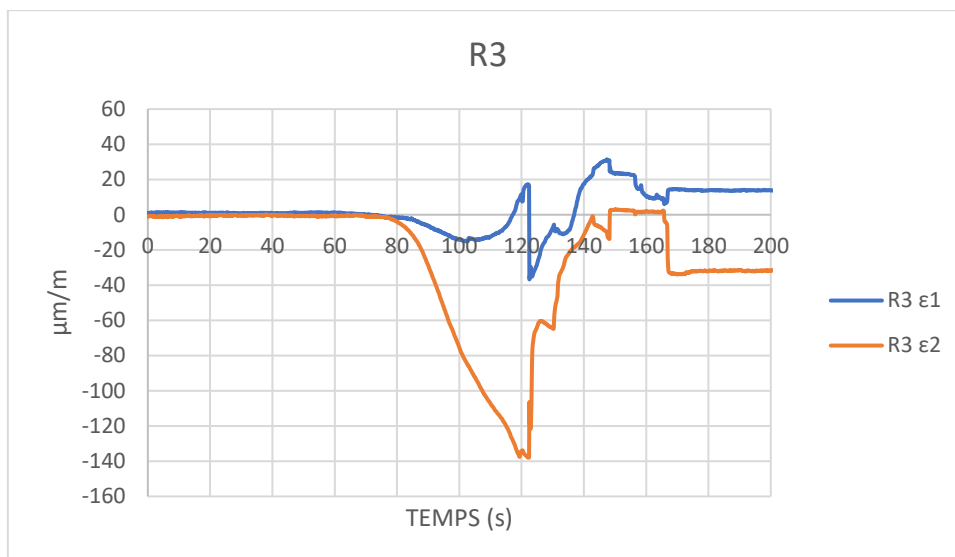
En aquest moment les deformacions en el sentit vertical passen a estar traccionades i comprimides en el sentit horitzontal.

Del segon 122 al 130, la deformació en el pla x continua disminuint la seva deformació a compressió, la deformació en el pla y continua augmentant la deformació a tracció i la deformació tallant en el pla pateix un altre pic a tracció, mantenint-la traccionada.

La deformació tallant en el pla disminueix la seva tracció i augmenta la seva deformació a compressió fins al segon 139 arribant a -28  $\mu\text{m}/\text{m}$ , seguidament comença a perdre deformació a compressió lleugerament fins al segon 165, arribant a -7  $\mu\text{m}/\text{m}$ , on abruptament es tracciona a 26  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

En el segon 148, la deformació en el pla x es tracciona a 22  $\mu\text{m}/\text{m}$  i la deformació en el pla y disminueix la seva tracció a 6  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

En el segon 165, la deformació en el pla y es comprimeix fins a -28  $\mu\text{m}/\text{m}$ .



**Gràfica 061.** Valors de deformacions unitàries dels esforços principals amb major valor ( $\epsilon_1$ ), en menor valor ( $\epsilon_2$ ) de la Roseta R3.

En les deformacions dels esforços principals,  $\epsilon_1$  es deforma a compressió fins el segon 103, arribant a  $-14 \mu\text{m/m}$ , on comença a traccionar-se fins al segon 122, arribant a  $17 \mu\text{m/m}$ .  $\epsilon_2$  es va comprimint fins al segon 120, arribant a  $-138 \mu\text{m/m}$ .

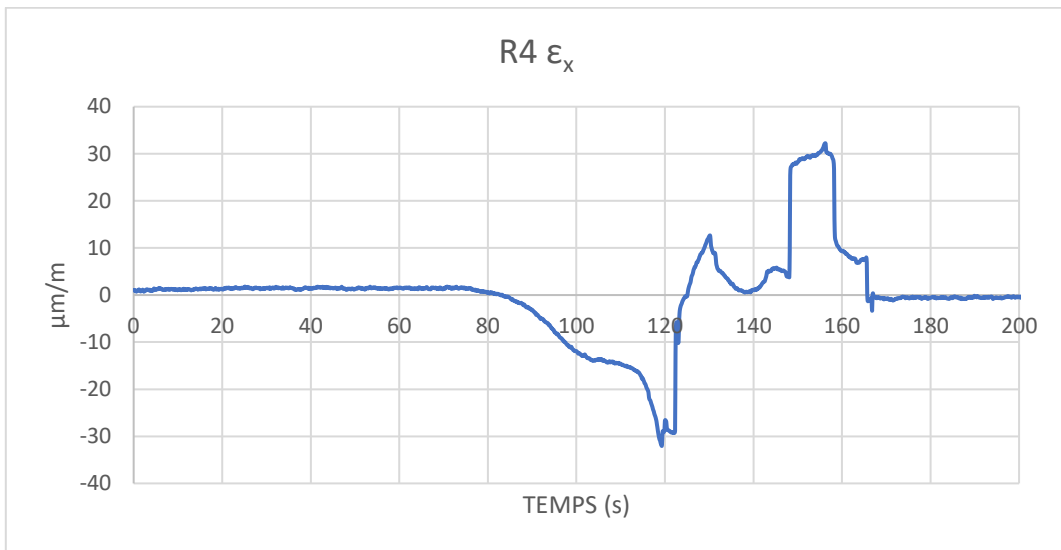
En el segon 120,  $\epsilon_1$  es comprimeix i  $\epsilon_2$  perd compressió, passant a estar tot R3 comprimida, en el rang:

- $\epsilon_1$ :  $-36 \mu\text{m/m}$ .
- $\epsilon_2$ :  $-67 \mu\text{m/m}$ .

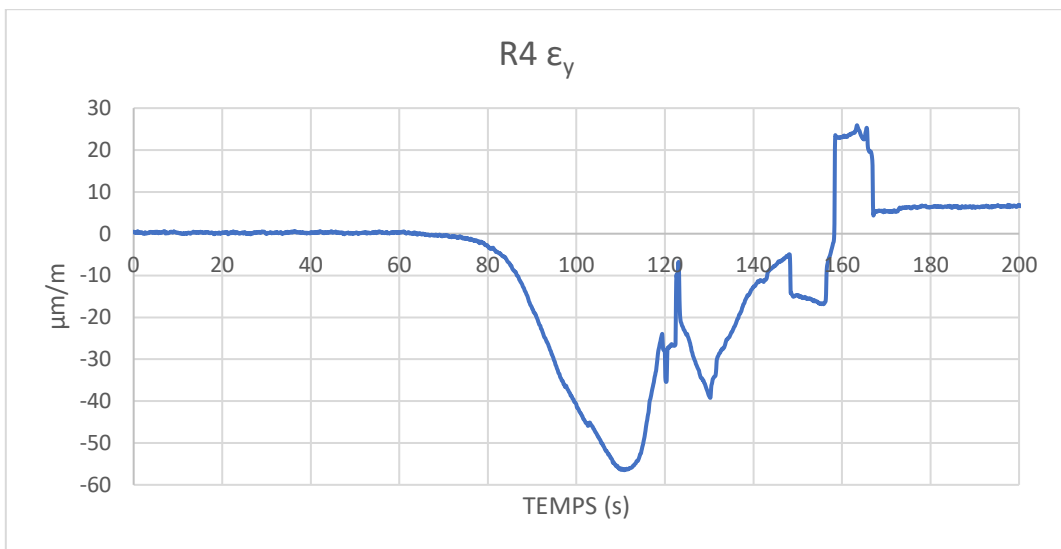
En el moment que es produeix l'esquerda de l'esquerra,  $\epsilon_1$  torna a recuperar tracció fins al segon 148, formant un pic a compressió en el segon 135, on la tracció arriba a  $31 \mu\text{m/m}$ .  $\epsilon_2$  forma un pic al segon 130 on la seva compressió era de  $-130 \mu\text{m/m}$ , comença a perdre compressió passant a  $-1 \mu\text{m/m}$  en el segon 143, passant a recuperar-ne fins a  $-14$  en el segon 148.

En el segon 148  $\epsilon_1$  perd tracció de forma esglaonada i  $\epsilon_2$  s'arriba a traccionar a  $2 \mu\text{m/m}$  fins a finalitzar l'assaig.

e) Roseta extensimètrica R4



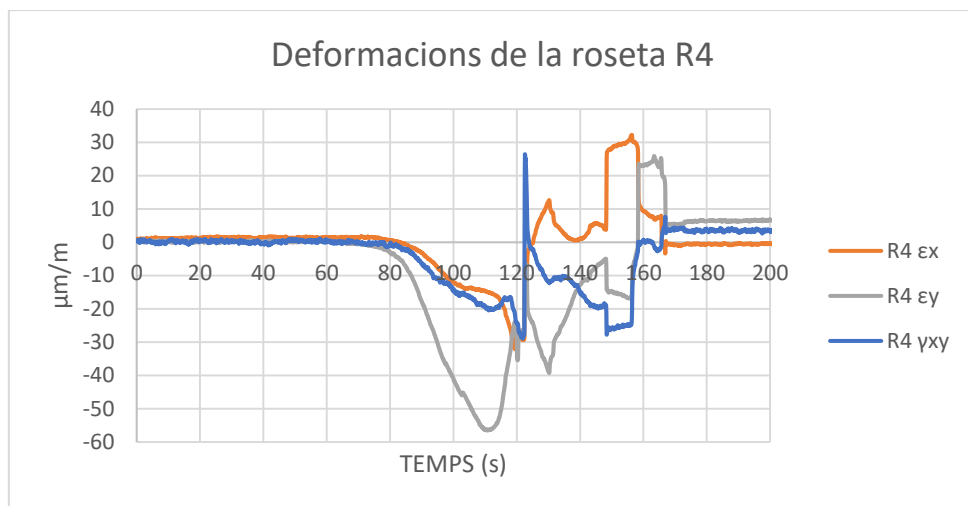
**Gràfica 062.** Valor de deformació normal en x  $\epsilon_x$  de la roseta R4.



**Gràfica 063.** Valor de deformació normal en y  $\epsilon_y$  de la roseta R4.



**Gràfica 064.** Valor de la deformació tallant en el pla ( $\gamma_{xy}$ ) de la roseta R4



**Gràfica 065.** Valors de deformació normal en x ( $\epsilon_x$ ), la deformació normal en y ( $\epsilon_y$ ) i la deformació tallant en el pla ( $\gamma_{xy}$ ) de la Roseta R4.

En aquesta zona de la roseta R4 les deformacions es comporten diferent que en el centre de la zona d'estudi i son molt menors.

Fins al segon 112, la deformació normal en el pla y augmenta fins a  $-55 \mu\text{m}/\text{m}$  i disminueix fins al segon 122 a  $-8 \mu\text{m}/\text{m}$ .

La deformació normal en el pla y i la deformació tallant del pla augmenten fins al segon 122 on passen a estar traccionades, passant de:

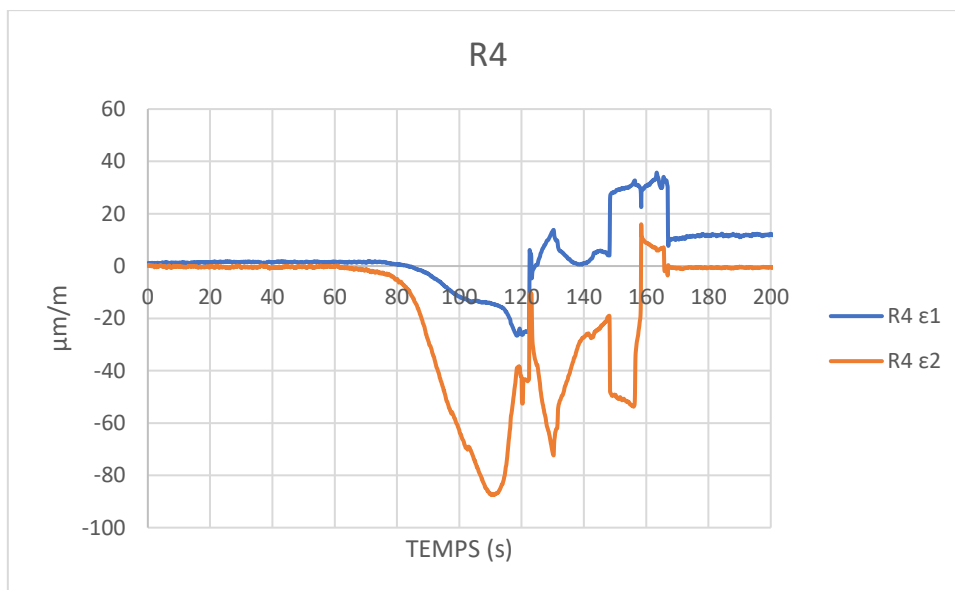
- $\epsilon_x$ : de  $-32$  a  $-3 \mu\text{m}/\text{m}$ .
- $\gamma_{xy}$ : de  $-25$  a  $26 \mu\text{m}/\text{m}$  (tracció).

Del segon a 122 al 130, la deformació normal en el pla y i la deformació tallant del pla augmenten considerablement la deformació a compressió, i la deformació normal en el pla x augmenta la deformació a tracció

Del segon 130 al 148, la deformació normal en el pla x passa a deformació 0 i es torna a traccionar, la deformació en el play y disminueix la deformació i la deformació tallant en el pla continua augmenta la deformació a compressió.

Del segon 148 al 156, les deformacions es mantenen amb unes deformacions relativaments similars i canvien abruptament, passant de:

- $\epsilon_x$ : de 30 (tracció) a  $10 \mu\text{m}/\text{m}$  (tracció).
- $\gamma_{xy}$ : de  $-25$  a  $8 \mu\text{m}/\text{m}$  (tracció).
- $\epsilon_y$ : de  $-18$  a  $25 \mu\text{m}/\text{m}$  (tracció).



**Gràfica 066.** Valors de deformacions unitàries dels esforços principals amb major valor ( $\epsilon_1$ ), en menor valor ( $\epsilon_2$ ) de la Roseta R4.

En les deformacions dels esforços principals,  $\epsilon_1$  es deforma a compressió fins el segon 122, arribant a  $-26 \mu\text{m/m}$ , on canvia abruptament a una tracció de  $6 \mu\text{m/m}$  i torna a comprimir-se a  $-5 \mu\text{m/m}$ .  $\epsilon_1$  torna a traccionar-se fins al segon 130 per després disminuir tracció fins al segon 140 arribant a una tracció casi nul·la en el segon 148 puja a una tracció de  $28 \mu\text{m/m}$ , i es manté sobre aquesta xifra fins finalitzar l'assaig.

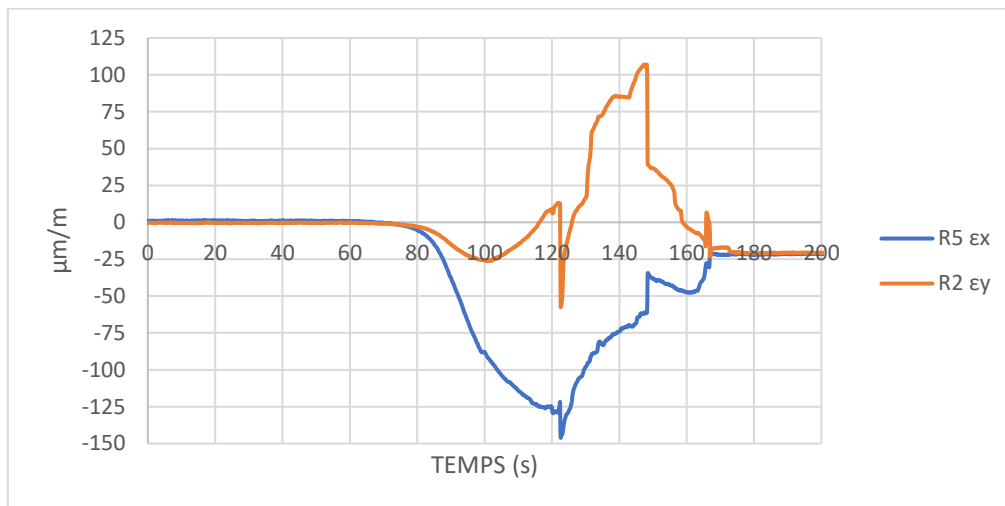
$\epsilon_2$  es comprimeix fins al segon 111, arribant a  $-87 \mu\text{m/m}$ , on comença a perdre-la. En el segon 120 es forma un pic passant de  $-38$  a  $-52 \mu\text{m/m}$ , en el segon 120 es forma un pic de disminució de compressió arribant a  $-10 \mu\text{m/m}$  i comença a recuperar compressió. En el segon 130 es forma un pic, arribant a  $-72 \mu\text{m/m}$ , per tornar a perdre'n fins al segon 147 on passa a ser de  $-19 \mu\text{m/m}$ . En el segon 147 la compressió puja a  $-50 \mu\text{m/m}$ , i en el segon 156 baixa de  $-54$  a  $16 \mu\text{m/m}$ , arribant a traccionar-se, fins finalitzar l'assaig.

Com es pot observar, la roseta R4 esta lo suficientment allunyada de la zona on s'apliquen les càrregues que les tensions que li transmeten son molt variables al llarg de l'assaig, i les direccions de les direccions principals no es mantenen estables en una mateixa inclinació.



### f) Comparació de les rosetes extensomètriques R5 i R2.

Les rosetes extensomètriques R5 i R2 estan col·locades de forma simètrica respecte el centre d'on es transmeten les tensions. Es procedeix a fer una comparació de les dues rosetes per comprovar si les deformacions unitàries es distribueixen de forma similar en ambdues rosetes.



**Gràfica 067.** Comparació entre la deformació normal en x ( $\epsilon_x$ ) de la Roseta R5 i la deformació normal en y ( $\epsilon_y$ ) de la Roseta R2.

Les direccions de la deformació normal en x de la roseta R5 i la deformació normal en y de la roseta R2, estan col·locades a  $45^\circ$  de l'eix vertical, cap a l'exterior del mur (R5 en sentit horari i R2 en sentit antihorari).

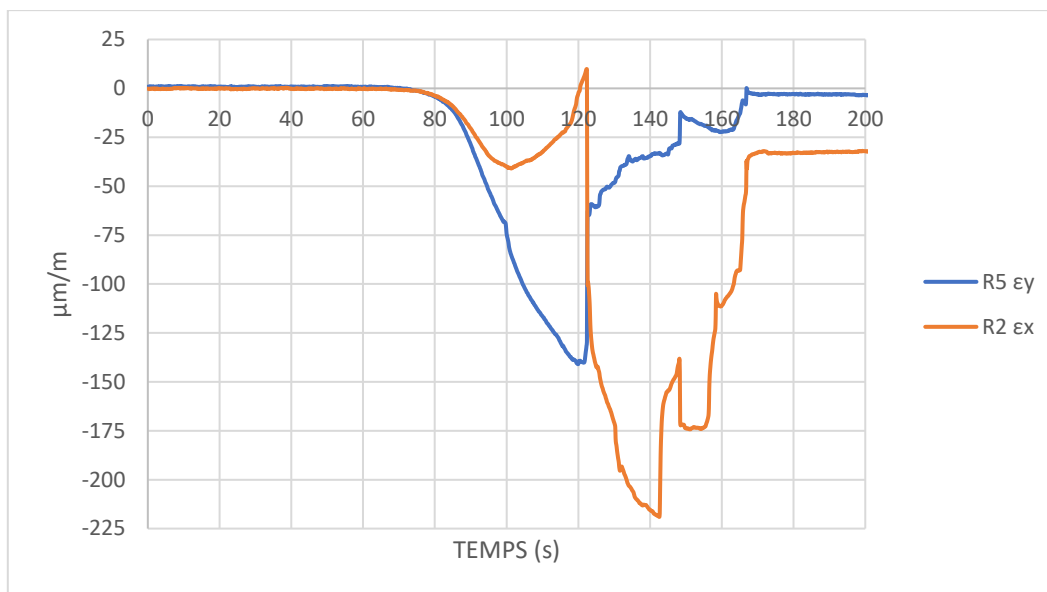
En la gràfica 067 es pot comprovar els valors de les dues direccions no s'assimilen entre ells.

La deformació normal en x de R5 es va comprimint fins arribar als  $-127 \mu\text{m}/\text{m}$  en el segon 122, mentre que la deformació normal en y de R2 es comprimeix fins a  $-26 \mu\text{m}/\text{m}$  en el segon 102 i es tracciona fins  $13 \mu\text{m}/\text{m}$  al segon 122. Quan apareix l'esquerda de l'esquerda, ambdues es comprimeixen, i seguidament es comencen a estirar, fins que en el segon 148 es produeix un pic amb valors de:

- R5  $\epsilon_x$ : de  $-62$  a  $-38 \mu\text{m}/\text{m}$ .
- R2  $\epsilon_y$ : de  $85$  (tracció) a  $106 \mu\text{m}/\text{m}$  (tracció).

Seguidament R2  $\epsilon_y$  va perdent tracció fins arribar a comprimir-se a  $-17 \mu\text{m}/\text{m}$  al segon 164, on acaba fent un pic a tracció i a comprimir-se un altra vegada.

R5  $\epsilon_x$  s'arriba a comprimir un poc més per després disminuir-la.



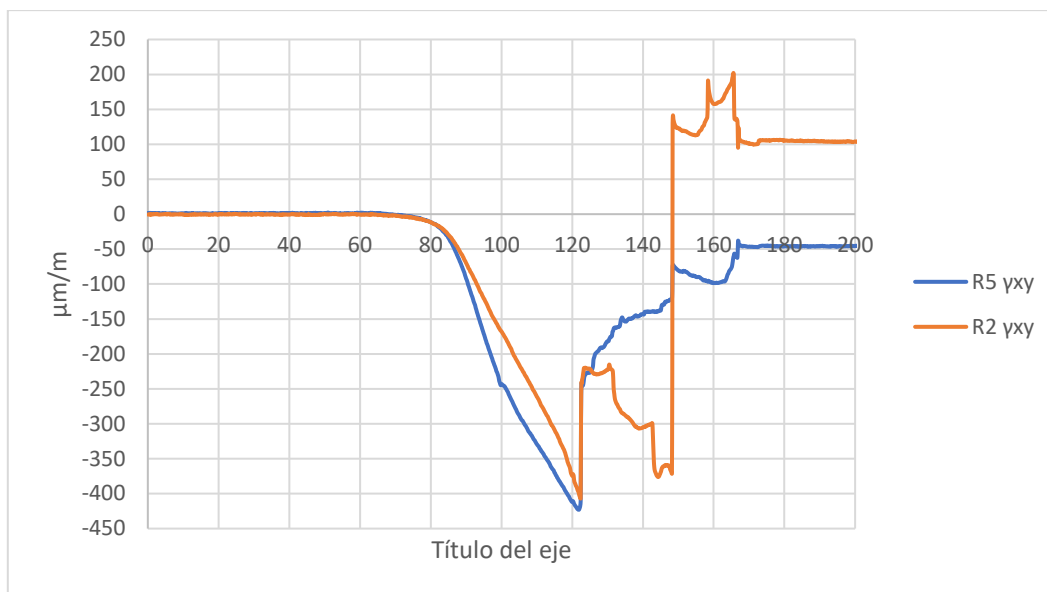
**Gràfica 068.** Comparació entre la deformació normal en y ( $\epsilon_y$ ) de la Roseta R5 i la deformació normal en x ( $\epsilon_x$ ) de la Roseta R2.

Les direccions de la deformació normal en y de la roseta R5 i la deformació normal en x de la roseta R2, estan col·locades a 45° de l'eix vertical, cap a l'interior del mur (R5 en sentit antihorari i R2 en sentit horari).

En els primers moments, la gràfica 068, s'assimila a la gràfica 067; La deformació normal en y de R5 es va comprimint fins arribar als -140  $\mu\text{m}/\text{m}$  en el segon 122, mentre que la deformació normal en y de R2 es comprimeix fins a -40  $\mu\text{m}/\text{m}$  en el segon 102 i es tracciona fins 7  $\mu\text{m}/\text{m}$  al segon 122. Quan apareix l'esquerda de l'esquerra, R5  $\epsilon_y$  perd compressió mentre que R2  $\epsilon_x$  la guanya passant de:

- R5  $\epsilon_y$ : de -140 a -61  $\mu\text{m}/\text{m}$ .
- R2  $\epsilon_x$ : de 6 (tracció) a -138  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Un cop s'origina la primera esquerda vertical, R5  $\epsilon_y$  va disminuint la compressió fins que s'origina la segona esquerda vertical, on augmenta un poc la compressió per després disminuir-la fins casi 0. R2  $\epsilon_x$  va augmentant la compressió fins a 219  $\mu\text{m}/\text{m}$  en segon 144, pn forma un pic perdent compressió. En el segon 148 torna a augmentar la compressió, però torna a disminuir en el 155 fins arribar a -34  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

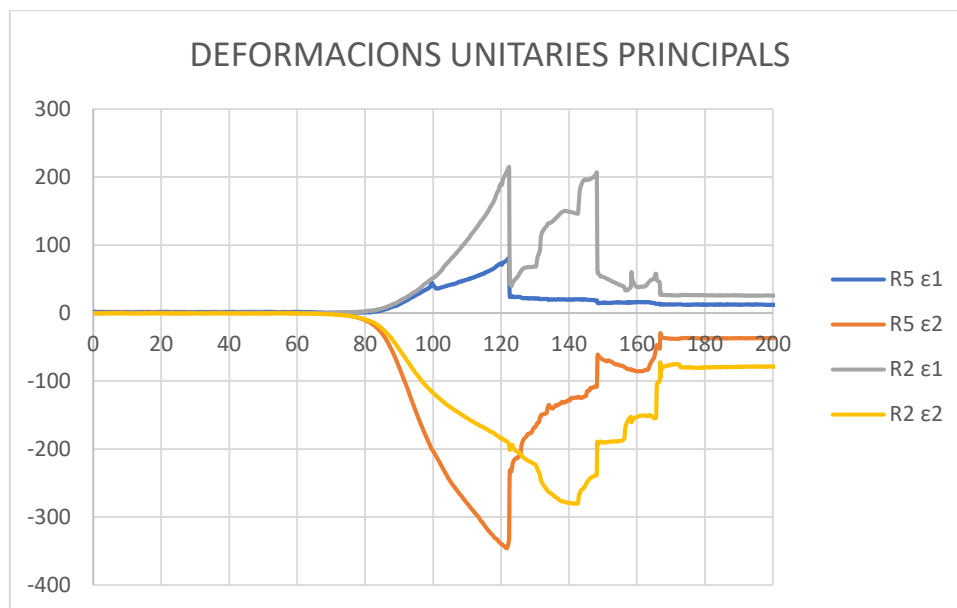


**Gràfica 069.** Comparació entre deformacions de tallant en el pla ( $\gamma_{xy}$ ) de les Rosetes R5 i R2.

Les direccions de les deformacions tallant al pla de R5 i R2, estan col·locades en l'eix vertical.

Fins al segon 122 ambdues tenen un comportament similar, augmentant la seva deformació a compressió, arribant R5  $\gamma_{xy}$  a -423 i R2  $\gamma_{xy}$  a -407  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Amb la primera esquerda ambdues pateixen un pic de descompressió; R5  $\gamma_{xy}$  va perdent compressió de forma contínua, mentre que R2  $\gamma_{xy}$  es manté i torna a recuperar compressió fins als segon 144.

Amb la segona esquerda, R5  $\gamma_{xy}$  forma un pic perdent descompressió, on seguidament en recupera per tornar a perdre-la. R2  $\gamma_{xy}$  fa un canvi molt brusc i passa de -372  $\mu\text{m}/\text{m}$  a estar traccionada a 141  $\mu\text{m}/\text{m}$  de cop. Seguidament continua fent pics de tracció per acabar al segon 165 a 95  $\mu\text{m}/\text{m}$ .



**Gràfica 070.** Comparació entre deformacions unitàries dels esforços màxims i mínims en les rosetes R5 i R2 .

En les deformacions dels esforços principals, entre els segons 80 i 122, R5  $\epsilon_1$  es va traccionant fins arribar a 80  $\mu\text{m}/\text{m}$ , i R5  $\epsilon_2$  es va comprimint fins arribar a -347  $\mu\text{m}/\text{m}$ , mentre que R2  $\epsilon_1$  es va traccionant fins arribar a 212  $\mu\text{m}/\text{m}$ , i R2  $\epsilon_2$  es va comprimint fins arribar a -199  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

En aquest moment, tant les deformacions a tracció com a compressió de R5 disminueixen, passant R5  $\epsilon_1$  de estar traccionada de 80 a 23  $\mu\text{m}/\text{m}$  i R5  $\epsilon_2$  de estar comprimida de -347 a -225  $\mu\text{m}/\text{m}$ , mentre que R2  $\epsilon_1$  disminueix la tracció de 212 a 40  $\mu\text{m}/\text{m}$  i R2  $\epsilon_2$  continua augmentant la deformació a compressió.

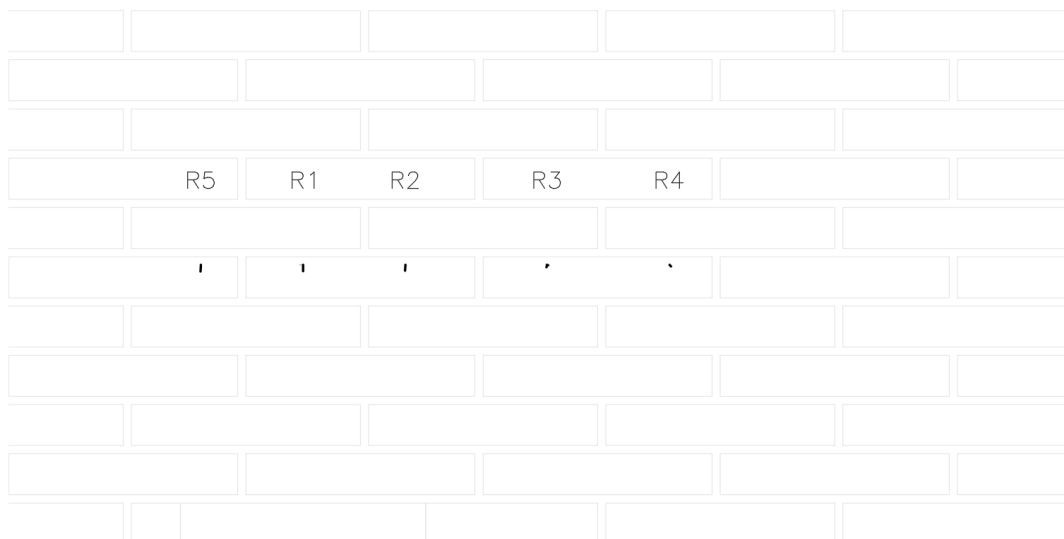
Després del segon 122, R5  $\epsilon_1$  es manté en una tracció estable, disminuint lleugerament al llarg de l'assaig, mentre que R5  $\epsilon_2$  segueix perdent deformació a compressió fins al segon 147, on baixa sobtadament de -225 a -68  $\mu\text{m}/\text{m}$  i seguidament torna a recuperar-la. R2  $\epsilon_1$  augmenta la seva deformació a tracció fins 147 de forma esglaonada, on perd instantàniament aquesta tracció passant de 206 a 59  $\mu\text{m}/\text{m}$  i continua perdent tracció lleugerament, mentre que R2  $\epsilon_2$  continua augmentant la seva deformació a compressió fins el segon 142, arribant a -280  $\mu\text{m}/\text{m}$ , on comença a perdre esforç a compressió de forma esglaonada.

Amb aquestes dades podem comprovar que a al exercir la càrrega sobre el mur, les tensions es van redistribuir més per la zona de la roseta R5, fent que aquesta estigués més comprimida i que R2 estigués més traccionada. En el moment que apareix la primera esquerra vertical en el segon 122, entre R5 i R1, les rosetes perden una part importat de la tracció i també la compressió de R5 de forma instantània.

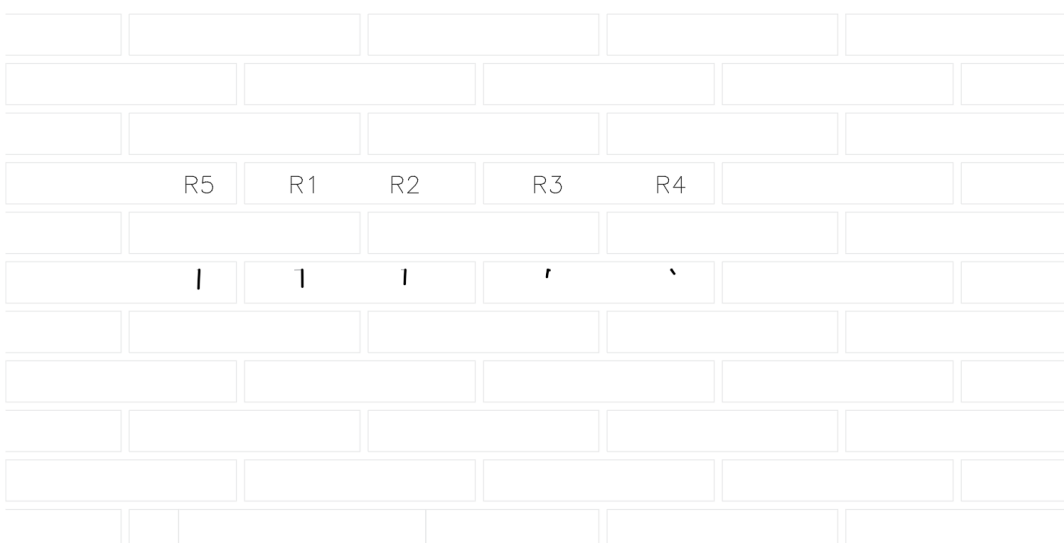
Un cop s'ha originat l'esquerda, les tensions que havia per la zona de R5 es redistribueixen cap al centre i la zona de R2, fent que  $R5 \epsilon_1$  i  $R5 \epsilon_2$  vagin disminuint fins al final de l'assaig i  $R2 \epsilon_1$  i  $R2 \epsilon_2$  vagin augmentant.

En el segon 142, es comença a originar la segona esquerda vertical situada entre R1 i R2, La roseta R2 perd una gran part de tracció instantàniament i de compressió de forma esglaonada. Això suggereix, que amb la segona esquerda, les tensions que es situaven en la zona de R2 es redistribueixen un altre cop cap al centre del mur.

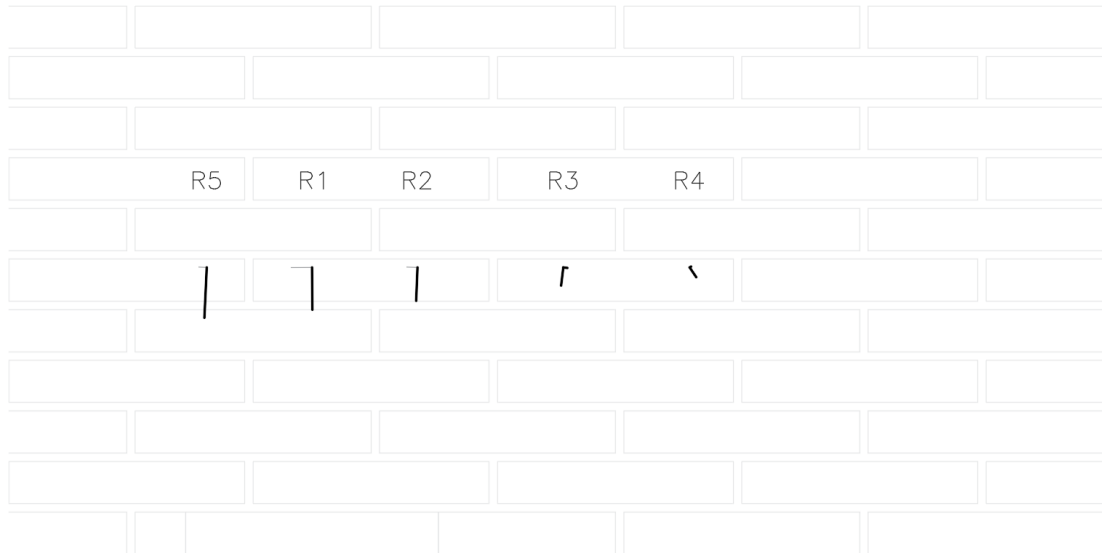
Es procedeix a mostrar gràficament el sentit de les tensions principals dels esforços màxims i mínims en les rosetes durant els segons indicats en les taules 035 i 036. S'ha dibuixat a escala les proporcions de les deformacions que van apareixent. Les línies negres simbolitzen el sentit dels esforços a compressió, mentre que les línies grises simbolitzen el sentit dels esforços a tracció.



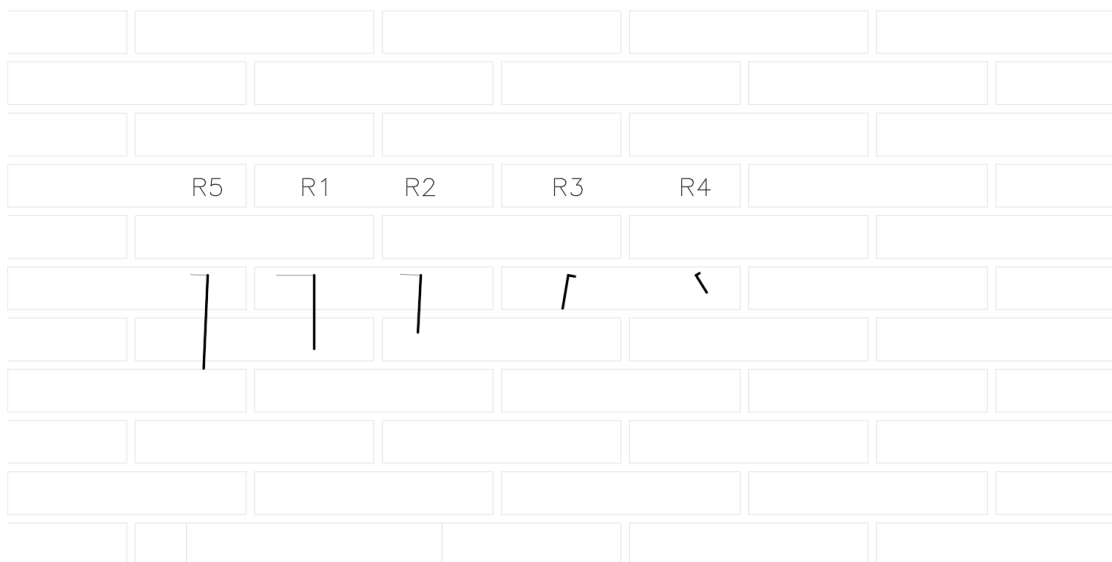
**Imatge 185.** Direccions principals del major i menor esforç en les rosetes en el segon 80.



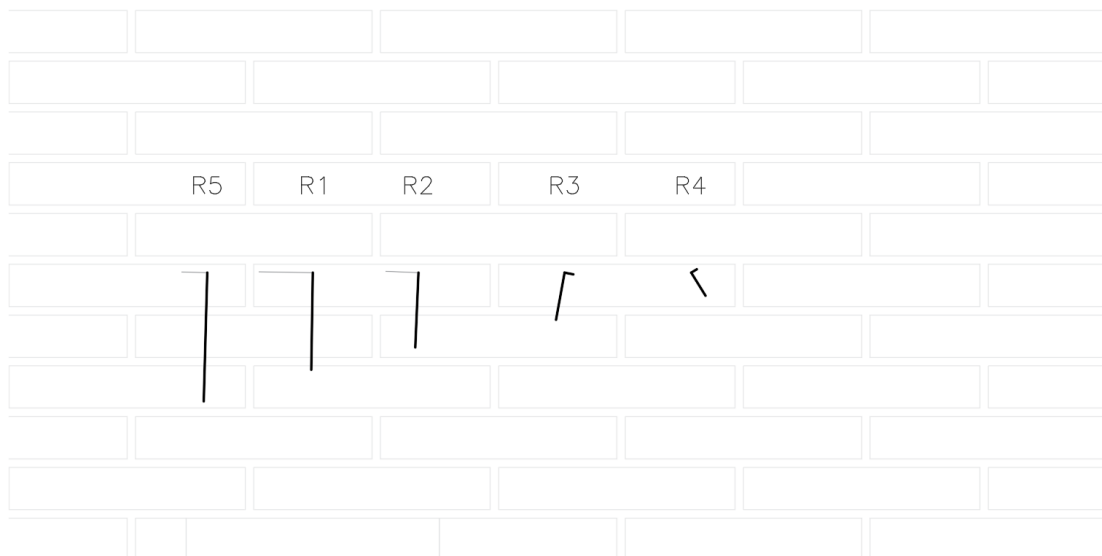
**Imatge 186.** Direccions principals del major i menor esforç en les rosetes en el segon 85.



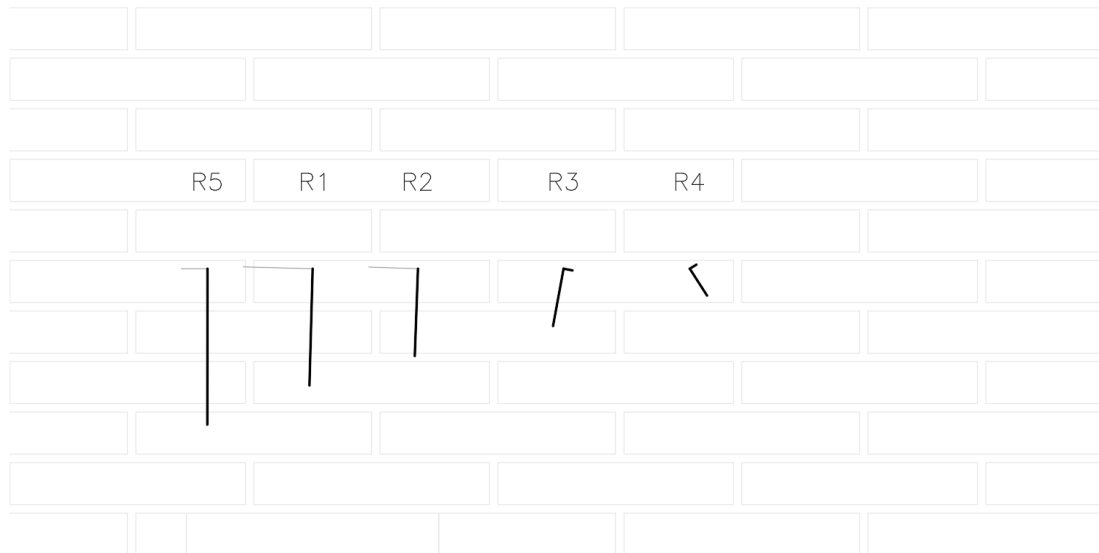
**Imatge 187.** Direccions principals del major i menor esforç en les rosetes en el segon 90.



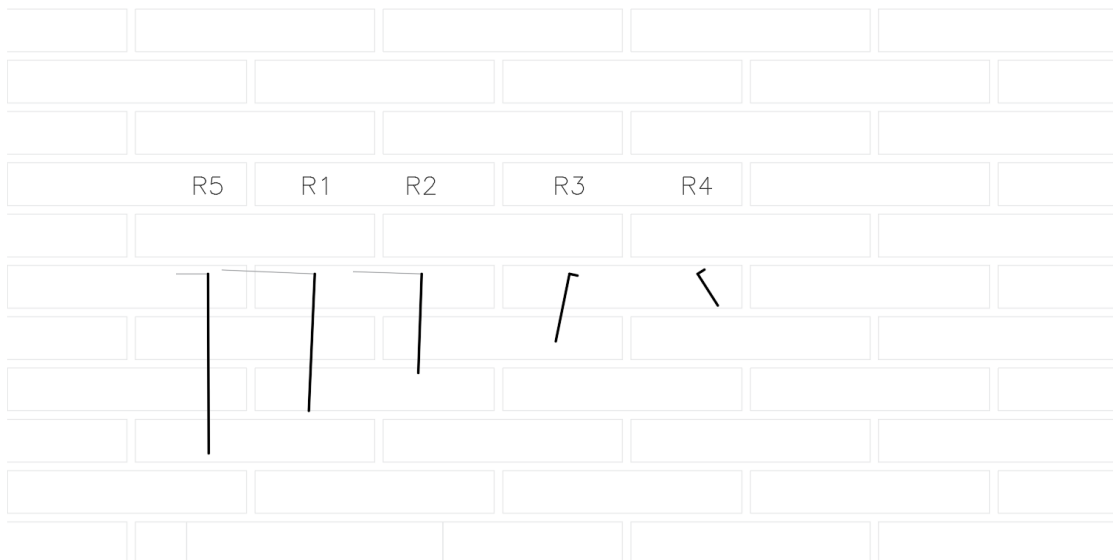
**Imatge 188.** Direccions principals del major i menor esforç en les rosetes en el segon 95.



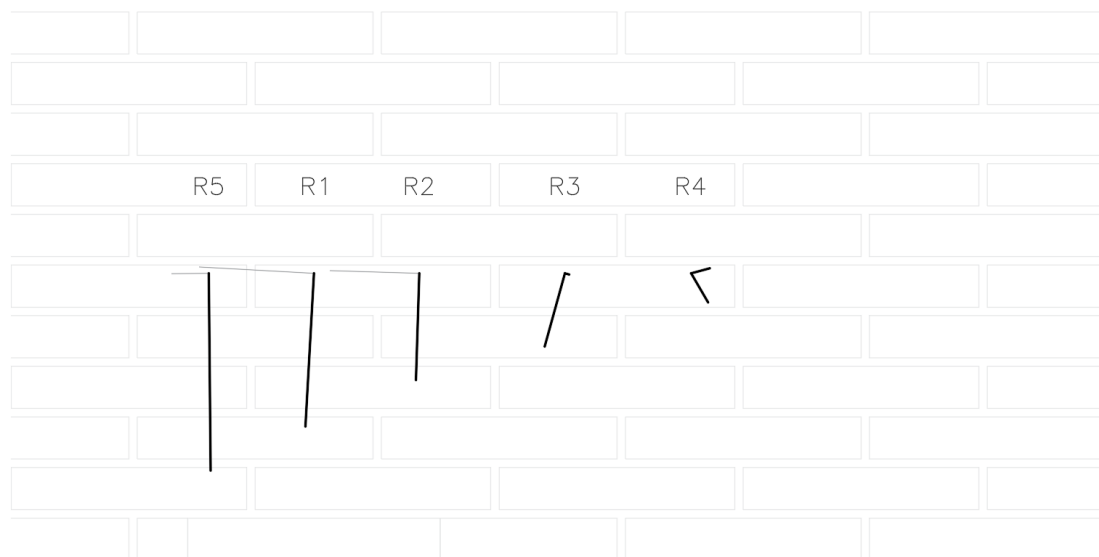
**Imatge 189.** Direccions principals del major i menor esforç en les rosetes en el segon 100.



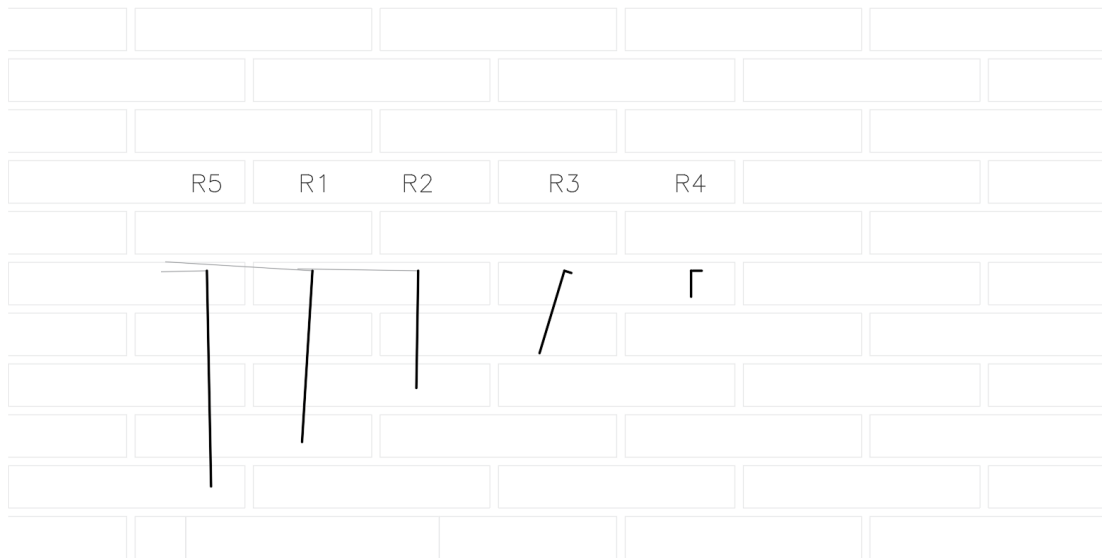
**Imatge 190.** Direccions principals del major i menor esforç en les rosetes en el segon 105.



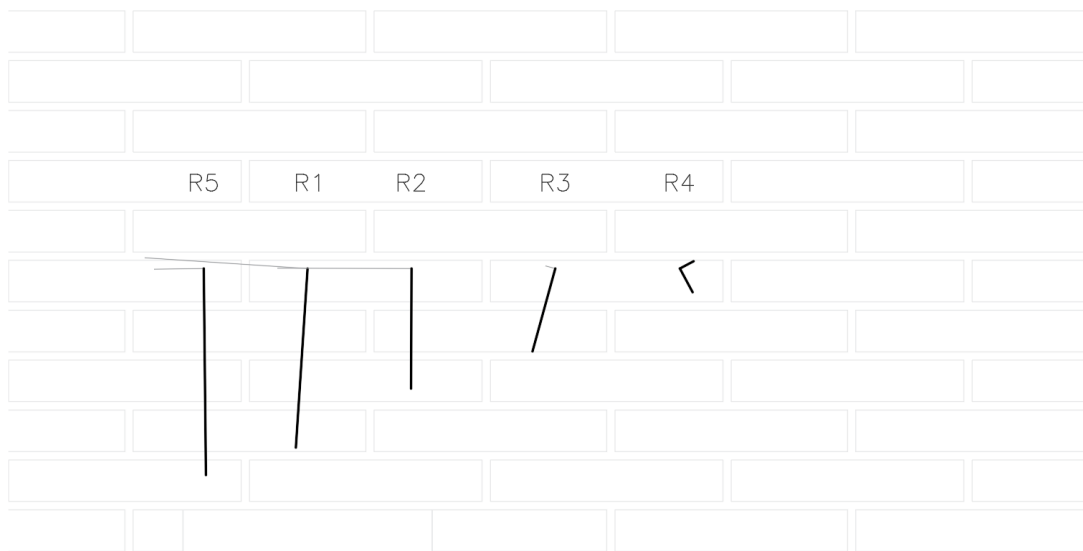
**Imatge 191.** Direccions principals del major i menor esforç en les rosetes en el segon 100.



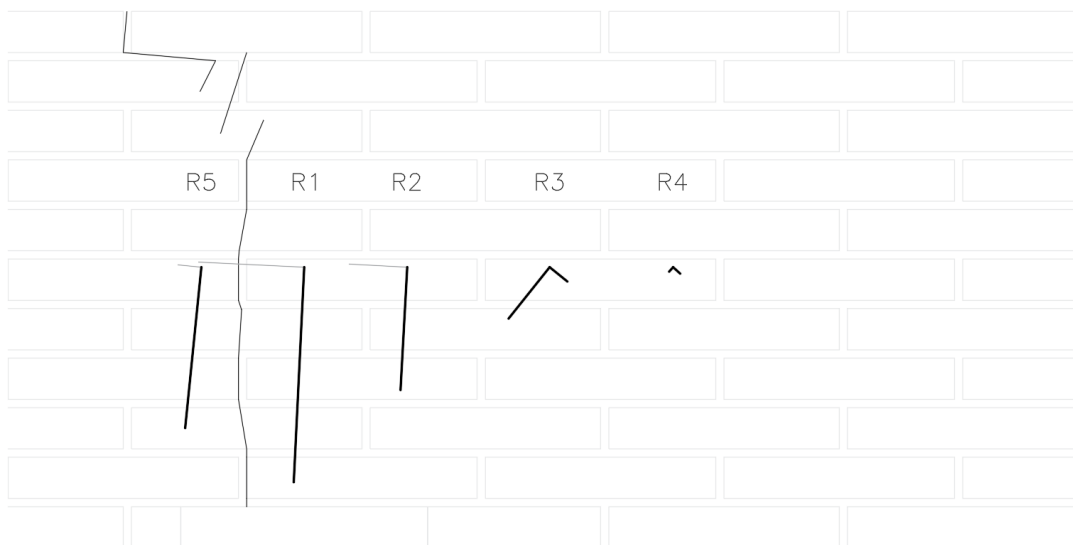
**Imatge 192.** Direccions principals del major i menor esforç en les rosetes en el segon 115.



**Imatge 193.** Direccions principals del major i menor esforç en les rosetes en el segon 120.

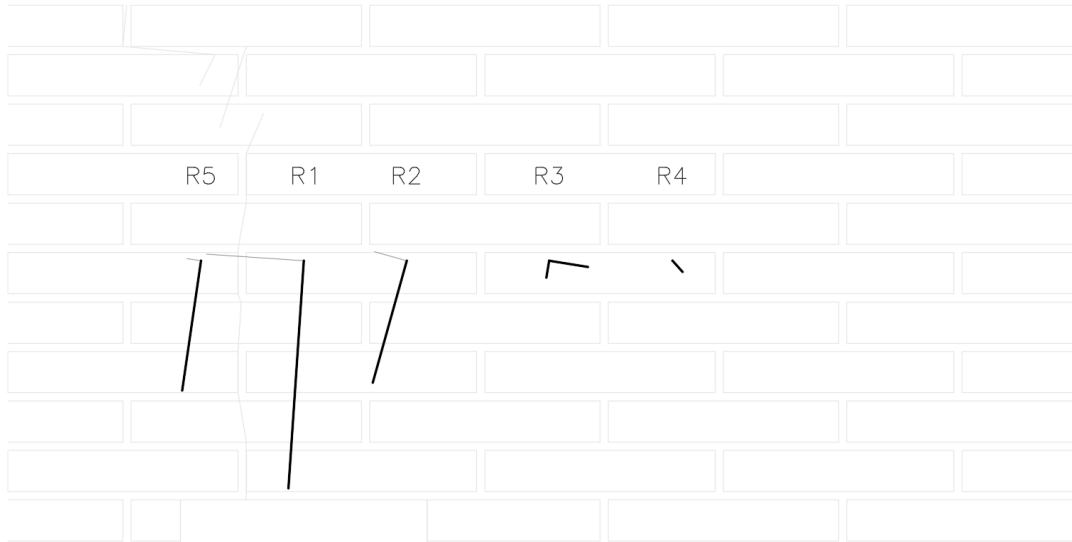


**Imatge 194.** Direccions principals del major i menor esforç en les rosetes en el segon 122, abans d'iniciar-se l'esquerda.

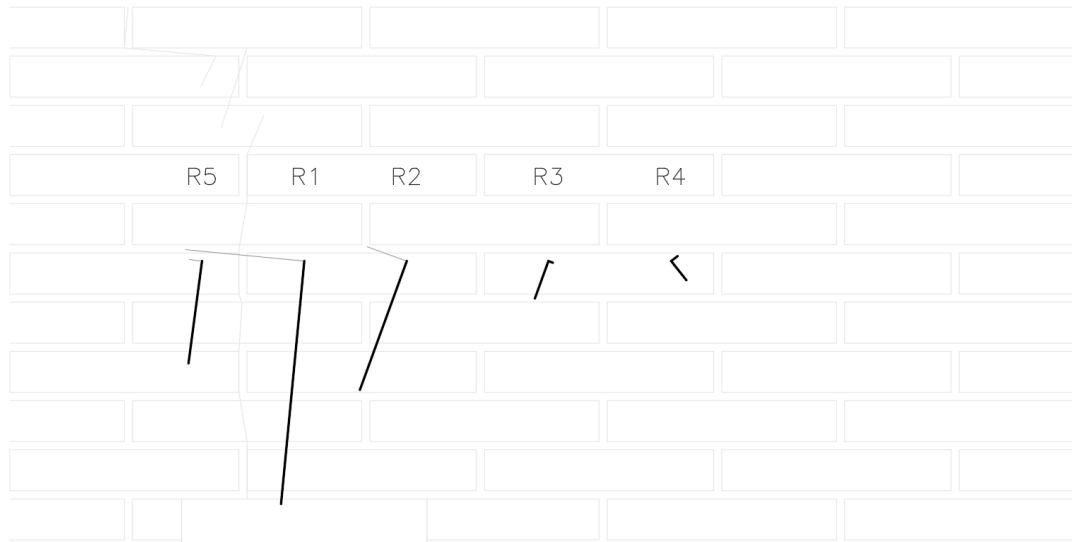


**Imatge 195.** Direccions principals del major i menor esforç en les rosetes en el segon 122, en el moment que s'origina l'esquerda.

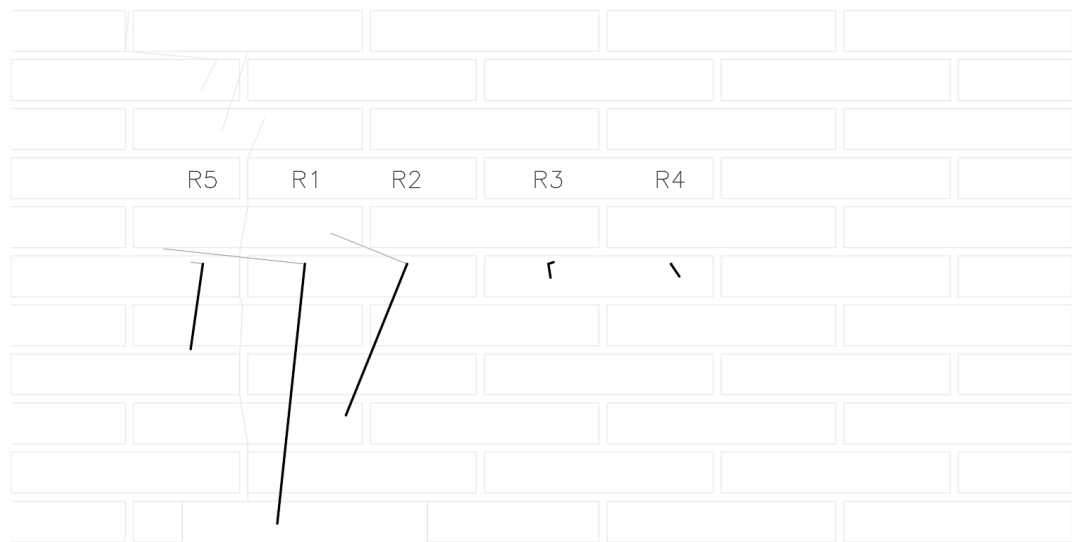




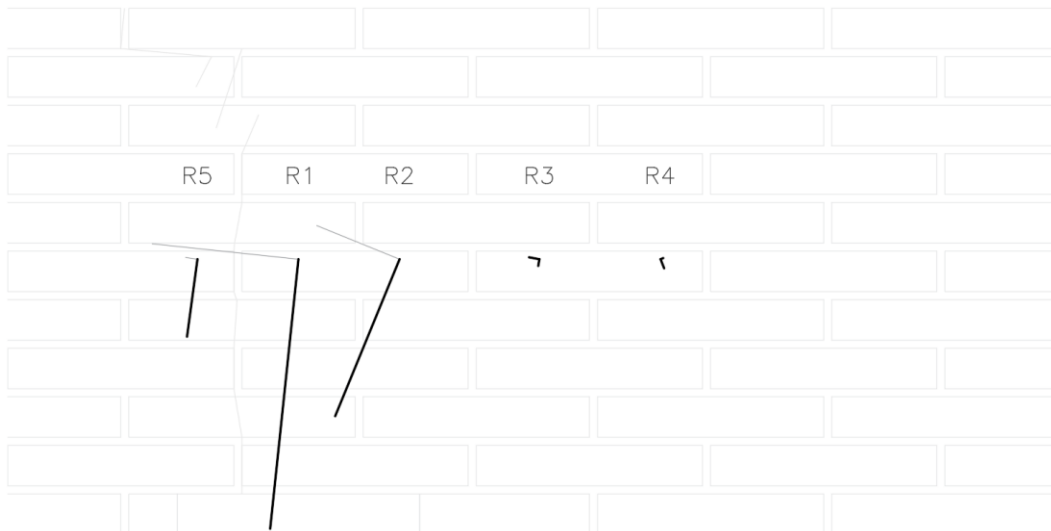
**Imatge 196.** Direccions principals del major i menor esforç en les rosetes en el segon 125.



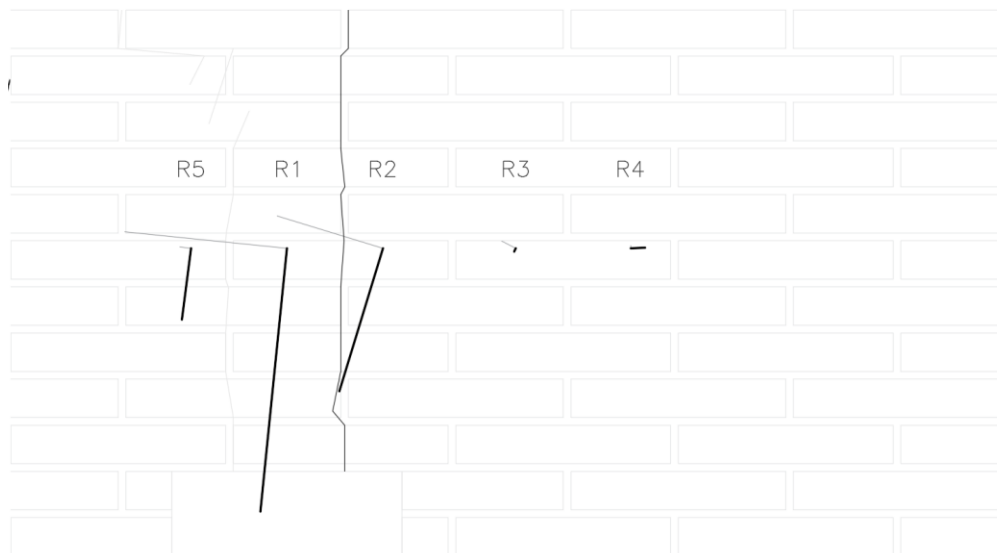
**Imatge 197.** Direccions principals del major i menor esforç en les rosetes en el segon 130.



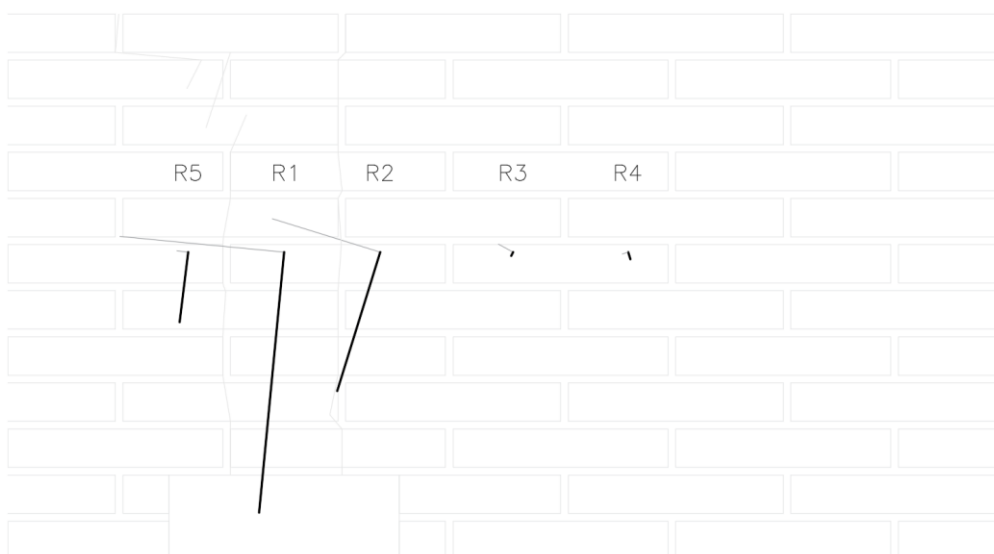
**Imatge 198.** Direccions principals del major i menor esforç en les rosetes en el segon 135.



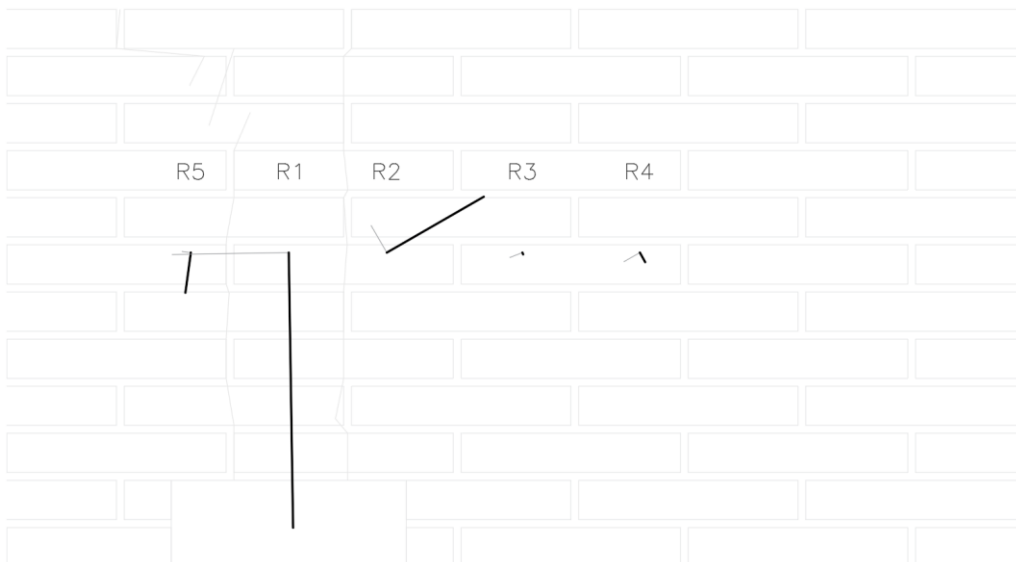
**Imatge 199.** Direccions principals del major i menor esforç en les rosetes en el segon 140.



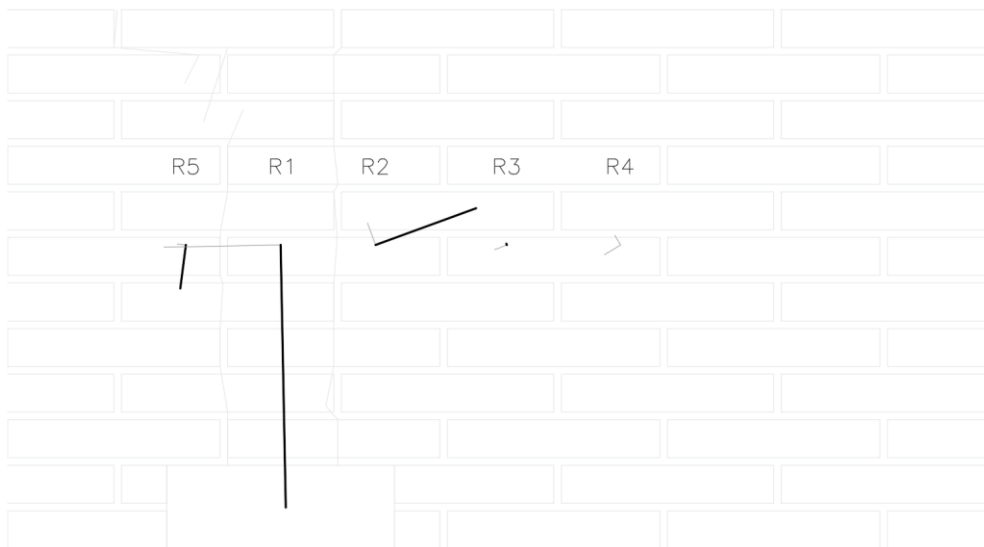
**Imatge 200.** Direccions principals del major i menor esforç en les rosetes en el segon 144, quan s'origina l'esquerda.



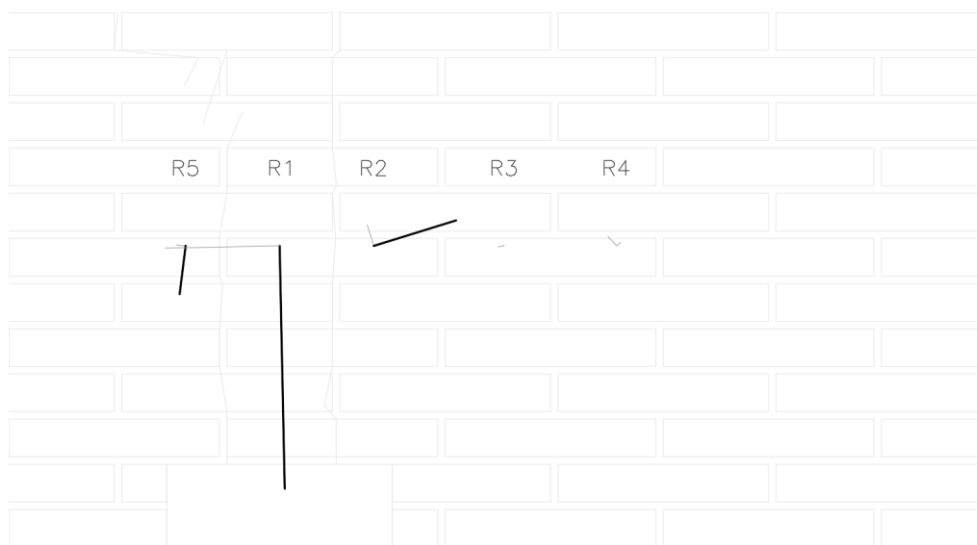
**Imatge 201.** Direccions principals del major i menor esforç en les rosetes en el segon 145.



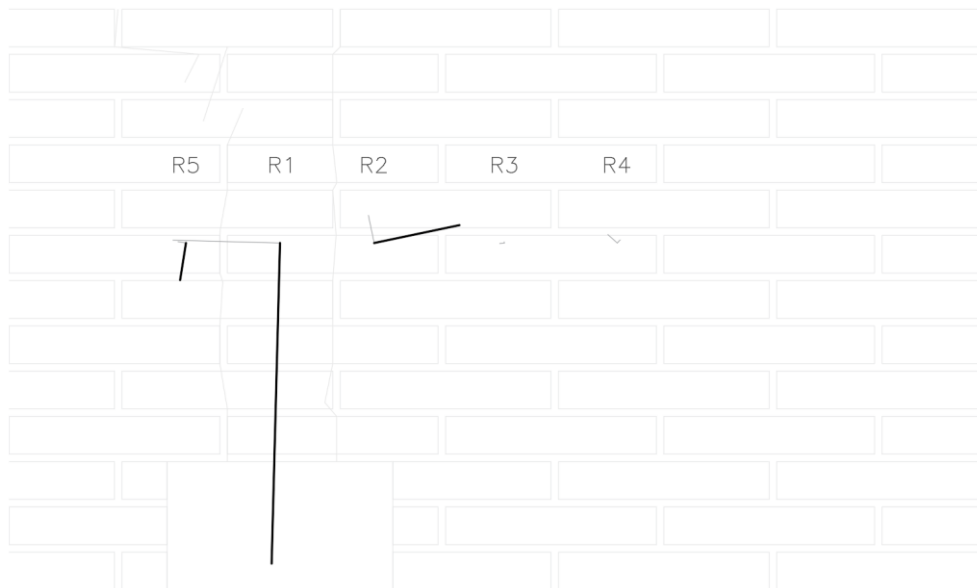
**Imatge 202.** Direccions principals del major i menor esforç en les rosetes en el segon 150.



**Imatge 203.** Direccions principals del major i menor esforç en les rosetes en el segon 155.



**Imatge 204.** Direccions principals del major i menor esforç en les rosetes en el segon 160.

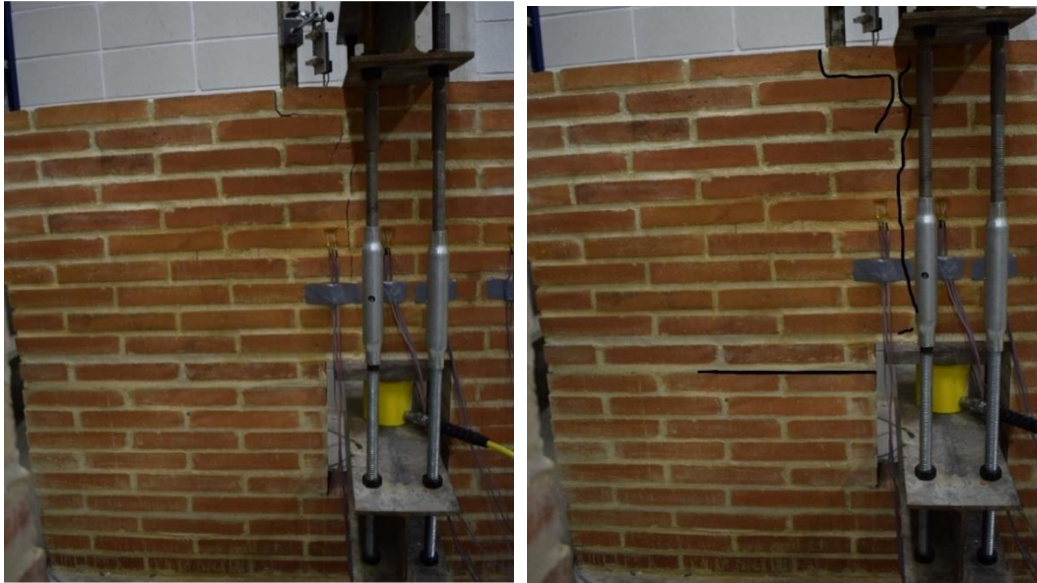


**Imatge 205.** Direccions principals del major i menor esforç en les rosetes en el segon 165.

S'exposa la documentació gràfica del trencament del mur 03 i el seguiment de les esquerdes que es van originant al llarg de l'assaig:



**Imatges 206.** Col·locació dels elements en el mur 03.



**Imatges 207 i 208.** 207- Seguiment de les esquerdes que sorgeixen en el mur 03 (01).  
208- Remarcat de les esquerdes que sorgeixen el mur 03.



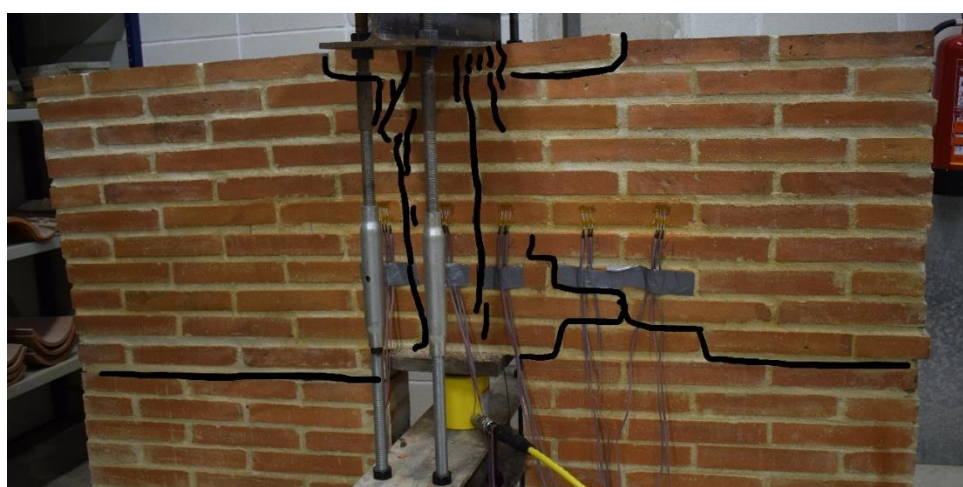
**Imatge 209.** Seguiment de les esquerdes que sorgeixen en el mur 03 (02).



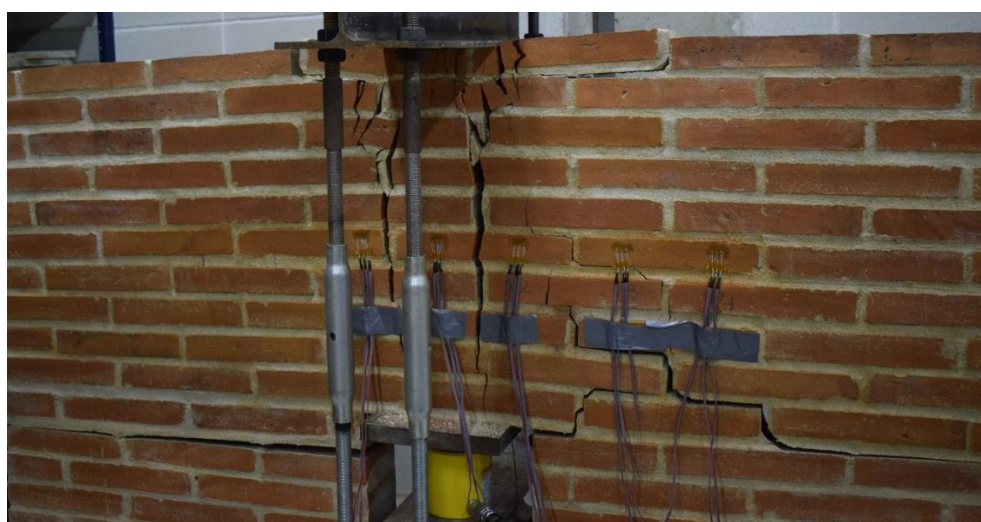
**Imatge 210.** Remarcat de les esquerdes que sorgeixen el mur 03 (02).



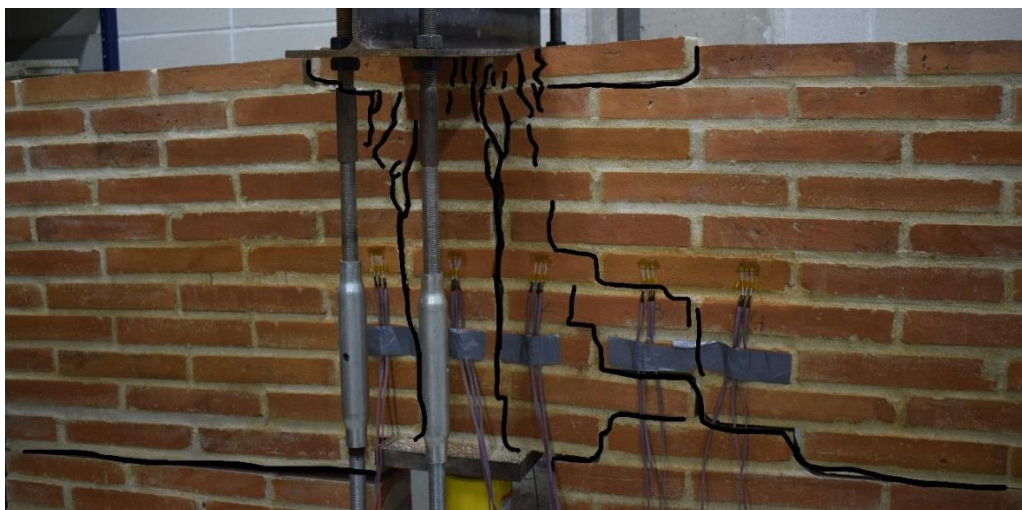
**Imatge 211.** Seguiment de les esquerdes que sorgeixen en el mur 03 (03).



**Imatge 212.** Remarcat de les esquerdes que sorgeixen el mur 03 (03).



**Imatge 213.** Seguiment de les esquerdes que sorgeixen en el mur 03 (04).



**Imatge 214.** Remarcat de les esquerdes que sorgeixen el mur 03 (03).



**Imatges 215 i 216.** 215- Detall de les esquerdes del mur 03 (01).  
2116- Detall de les esquerdes del mur 03 (02).



**Imatges 217 i 218.** 217-Detall de les esquerdes del mur 03 (03).  
218- -Detall de les esquerdes del mur 03 (04).



**Imatges 219.** Detall de les esquerdes del mur 03 (03).



### 5.6.4. COMPARACÓ DELS RESULTATS

Es procedeix a adjuntar els resultats obtinguts en els altres subapartats del capítol 5, referent a la resistència a compressió dels elements, per poder comparar-los amb més facilitat:

		FORÇA APLICADA	fk	fm
PROVETA 01		544,19 kN	9,90 MPa	5,50 MPa
PROVETA 02		510,55 kN	12,01 MPa	7,41 MPa
PROVETA 03		567,94 kN	12,91 MPa	5,75 MPa
MUR 01	σ inferior	173,50 kN	6,20 MPa	6,35 MPa
	σ superior		6,20 MPa	
MUR 02	σ inferior	177,30 kN	6,33 MPa	6,02 MPa
	σ superior		5,07 MPa	
MUR 03	σ inferior	167,40 kN	5,98 MPa	6,06 MPa
	σ superior		4,78 MPa	

**Taula 038.** Resultats obtinguts en el capítol 5.

#### a) Comparació dels resultats segons el CTE

En l'apartat 4.3.1, s'ha estimat que la resistència a compressió de les peces era de uns 27,10 MPa.

Segons les equacions per a trobar la resistència a compressió de l'obra de fàbrica del CTE, exposades en l'apartat 2.4.5., la resistència a compressió de la fàbrica s'obté de la fórmula:

$$f_k = K \cdot f_b^{0.65} \cdot f_m^{0.25}$$

on:

$K$  és una constant, en aquest cas de valor 0,60.

$f_b$  és la resistència a compressió de les peces.

$f_m$  és la resistència a la compressió del morter.

Si aïllem  $f_b$  de la fórmula, obtenim que la resistència de càlcul de les peces en cada proveta d'obra de fàbrica i en cada mur és de:

- $f_b$  proveta 01: 38,75 MPa.
- $f_b$  proveta 02: 46,52 MPa.
- $f_b$  proveta 03: 57,31 MPa.
- $f_b$  mur 01: 17,85 MPa.
- $f_b$  mur 02: 18,81-13,37 MPa.
- $f_b$  mur 03: 17,19-12,18 MPa.

Com observem, la resistències de les peces segons les fórmules del CTE surten molt dispars, sense cap similitud entre les de una proveta o mur i les altres.

Si l'operació l'ha féssim al revés, intentar obtenir la resistència de la fàbrica a partir de dels elements que la componen, utilitzant  $f_b$  la resistència estimada al apartat 4.3.1., 27,10 MPa, la resistència de càlcul és de:

- $f_k$  proveta 01: 7,85 MPa.
- $f_k$  proveta 02: 8,45 MPa.
- $f_k$  proveta 03: 7,93 MPa.
- $f_k$  mur 01: 8,13 MPa.
- $f_k$  mur 01: 8,03 MPa.
- $f_k$  mur 01: 8,04 MPa.

Les resistència de càlcul de la fàbrica no s'assimilen a les resistència reals obtingudes, on:

- Les resistència a compressió obtinguda en les provetes d'obra de fàbrica és entre 1,26 i 1,62 vegades la resistència a compressió de càlcul.
- Les resistència a compressió obtinguda dels murs és entre 0,59 i 0,78 vegades la resistència a compressió de càlcul.

Per tant, les equacions sobre la resistència dels elements emeses pel codi tècnic no s'adapten a les provetes realitzades.

### **b) Comparació dels resultats entre les provetes i els murs**

Si es comparen els resultats de la resistència a compressió entre les provetes d'obra de fàbrica i els murs, podem veure que els primers resisteixen més:

- Si comparem la resistència de la proveta més elevada amb la resistència del mur menys elevat, obtenim que la resistència del primer és 2,70 vegades més gran.
- Si comparem la resistència de la proveta menys elevada amb la resistència del mur més elevat, obtenim que la resistència del primer és 1,56 vegades més gran.
- Si comparem mitjana aritmètica de les resistències de les provetes amb la de les resistències del mur, obtenim que la resistència dels primers és 2,01 vegades més gran.
- Si comparem mitjana geomètrica de les resistències de les provetes amb la de les resistències del mur, obtenim que la resistència dels primers és 2,01 vegades més gran.

## 6. CONCLUSIONS

### 6.1. CONCLUSIONS DEL PROJECTE

El càlcul dels elements d'obra de fàbrica estan regits per unes regles que no són del tot precises, ja que el comportament de les peces, el morter i la interfície que els uneix com un material compost fan que el seu estudi sigui complex.

Les tensions no es reparteixen de forma uniforme al llarg del mur d'obra de fàbrica quan s'apliquen les càrregues sobre aquesta, distribuint-se de manera que es concentren més unes zones que en altres. Quan apareixen esquerdes danyant la zona on es concentren més tensions, aquestes es redistribueixen al llarg del mur per poder suportar les càrregues que li arriben.

L'ús de mètodes d'elements finits ofereix un mode d'estudi capaç d'aportar informació sobre els possibles fenòmens que succeeixen en la fàbrica. Per al modelatge realitzat en aquest projecte, s'han descrit algunes propietats dels materials de forma aproximada, al no haver realitzat els pertinents assajos per a conèixer-les. Si es realitza un estudi més detallat d'algunes d'aquestes propietats dels elements que componen la fàbrica, com ara la resistència a compressió i a tracció, el mòdul d'elasticitat i el coeficient de Poisson entre altres, es podrien obtenir uns resultats més coincidents amb la realitat.

El disseny i la instrumentació utilitzada sembla adequada per al mètode d'assaig proposat, ja que ha tingut un bon funcionament a l'hora de comprovar la resistència a compressió dels murs.

La resistència a compressió de les provetes dona un valor més gran que la resistència a compressió dels murs assajats, sent la primera aproximadament el doble que la segona. Aquest resultat no es concloent, ja que no s'han realitzat suficients assajos com per garantir que aquest rati sigui del tot cert.

La comparació entre els resultats experimentals i els resultats de càlcul mitjançant la normativa CTE-DB-SE-F mostra que:

- La normativa redueix la resistència a compressió de la fàbrica de forma conservadora respecte els resultats obtinguts en els assajos de les provetes.
- La resistència a compressió de la fàbrica segons les equacions del Codi Tècnic de la Edificació és més alta respecte els resultats obtinguts en els assajos dels murs.

Per tant, segons els resultats obtinguts, és possible que la resistència a compressió dels murs d'obra de fàbrica sigui menor que la resistència a compressió de càlcul proporcionada per la normativa, almenys quan s'apliquen càrregues puntuals.

Les provetes d'obra de fàbrica s'han realitzat en laboratori i no han estat sotmeses a cap circumstància amb les que puguin haver patit possibles danys. En la realitat, l'extracció de la mostra a obra i el seu transport fins a laboratori poden ocasionar desperfectes afectant els resultats. Per tant, en aquest projecte s'han tingut en compte aquests possibles danys.

Els murs d'obra de fàbrica s'han construït deixant el buit per passar la instrumentació des del principi. En la realitat, s'haurien de realitzar 2 buits al mur a assajar per poder passar la instrumentació. Aquests buits es realitzarien a partir de talls, els quals podrien afectar als resultats obtinguts.

### **6.2. PROPOSTES PER A FUTURS DESENVOLUPAMENTS**

Com a continuïtat d'aquest projecte es proposen les següent direccions d'estudi per a futurs desenvolupaments:

- Realitzar més assajos de les provetes d'obra de fàbrica i dels murs. Tres assajos de cada no són suficients per treure unes conclusions fermes.
- Els assajos realitzats s'han fet a partir de provetes d'obra de fàbrica construïdes en el laboratori sense que aquests hagin patit cap dany. Seria convenient realitzar l'extracció de les provetes a partir de un mur, com es faria en la realitat, i comprovar quina diferència de resultats pot haver entre construir la proveta i extreure-la de la mateixa obra.
- Els murs realitzats s'han construït deixant els buits per passar la instrumentació. Seria convenient realitzar els buits a partir dels talls pertinents als murs per comprovar quina diferència de resultats pot haver entre deixar el buit previst i realitzar-lo posteriorment.
- S'hauria de realitzar un estudi de les característiques mecàniques de les peces i el morter que componen la fàbrica poder realitzar un micromodelatge detallat més acurat per obtenir uns resultats numèrics més semblants a la realitat.
- Si els futur desenvolupaments afirmen que la resistència a compressió dels murs assajats és menor que la resistència a compressió de càlcul, segons normativa del Codi Tècnic de la Edificació, considerar si aquesta pot ser errònia i calgui aplicar modificacions, en casos on apareguin càrregues puntuals.

## 7. REFERÈNCIA BIBLIOGRÀFICA

### 7.1. NORMATIVA APLICABLE

1. Asociación Española de Normalización y Certificación. (1999). Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión. UNE-EN 1052-1. Madrid: Aenor.
2. Asociación Española de Normalización y Certificación. (2011). Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Piezas de arcilla cocida. UNE-EN 771-1. Madrid: Aenor.
3. Código Técnico de la Edificación. (2009). Documento Básico SE-F. Seguridad Estructural: Fábrica. Ministerio de la Vivienda.

### 7.2. ARTICLES

1. Hilsdorf H. K. (1969). Investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression. Proc. Int. Conf. on Masonry Structural Systems. Texas, pp. 34-41.
2. Khoo, C.L. & Hendry, A.W. (1973): A Failure Criterion for Brickwork in Axial Compression. In: Proc. of Third International Brick Masonry Conference, eds. L. Foertig and K. Gobel, Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie, Bonn: Essen, 139-145
3. Ohler, A. (1986). Determining the Compressive Strength of Masonry Taking Account of the Multiaxial Stress States in the Unit and Mortar. Bautechnik 63(5), pp. 163-169.
4. Van der Pluijm, R. (1992). Material properties of masonry and its components under tension and shear, in: Proc. 6th Canadian Masonry Symposium, eds. V.V. Neis, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, p. 675-686.
5. Wesche, K. y Ilantzis, A. (1980). General recommendations for methods of testing load bearing walls. Materials and Structures, RILEM, 13(78), pp. 433-445.

### 7.3. DOCUMENTS

1. Felix, I. (1999). Compressive and Modulus of Elasticity of Masonry Prisms. Tesis inèdita de mestria, Carleton University.
2. Hernández, A. (2014). Simulación del comportamiento de paredes de obra de fábrica de ladrillo bajo estados de carga biaxial mediante micromodelización.
3. Hidalgo, F. J. (1995). Análisis experimental de esfuerzos, aplicaciones con galgas extensométricas. Tesis inèdita de mestria, Universidad Autónoma de Nuevo León.
4. Lourenço, P. B. (1996) Computational Strategies for Masonry Structures. Tesis inèdita de doctorat, Delft University of Technology.
5. Lourenço, P. B. (1998). Experimental and numerical issues in the modelling of the mechanical behavior of masonry. CIMNE, Barcelona.
6. Sandoval. C. (2011). Estudio experimental y numérico del fallo por inestabilidad de muros de obra de fábrica. Tesis inèdita de doctorat, Universitat Politècnica de Catalunya.
7. Viviescas, A. (2009). Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano. Tesis inèdita de doctorat, Universitat Politècnica de Catalunya.

### 7.4. LLIBRES

1. Benito, J. J. & Álvarez, R. & Ureña, F. & Salet, E. & Aranda, E. (2014). Introducción al Método de los Elementos Finitos. Madrid: UNED.
2. Hendry, A.W. (1998). Structural Masonry. Second Edition. Edinburg: Palgrave.
3. Sarhosis, V. & Bagi, K. & Lemos, J. & Milani, G. (2016). Computational Modeling of Masonry Structures Using the Discrete Element Method. Engineering Science Reference.