



Estudi de propietats mecàniques i higromètriques de la terra compactada amb fibres com a potencial material de construcció

Document:

Memòria

Autor:

Alejandro Postigo Pereira

Director - Codirector:

Lluís Gil Espert / Ernest Bernat Masó

Titulació:

Grau en Enginyeria Mecànica

Convocatòria:

Primavera, 2022.

TREBALL DE FI D'ESTUDIS



*A Rosario y Antonio por nunca perder
la fe en mí.*

A Marcos por saber escuchar

*Y a Nuria por siempre ver la mejor
versión de mí mismo*

Resum

En aquest estudi s'avalua el comportament mecànic i higromètric de la tàpia o terra compactada, un material de construcció llegat de l'antiguitat i que està començant a ser utilitzat i estudiat per el seu poc cost energètic de producció, de forma més específica, l'estudi analitza el comportament i rendiment de la tàpia afegint a la composició fibres de canemuixa, el tall de la planta de cànem, que ha demostrat tenir propietats aïllants molt bones, i que destaca per provenir d'una planta amb petjada de carboni negativa, és a dir, que el CO₂ que emet durant tota la seva vida útil és menor al CO₂ que absorbeix.

Per la realització de l'estudi s'han produït 12 series de provetes variant la concentració de morter utilitzat referent al pes total de la mostra, (20%, 40%, 60%), i la concentració fibres de canemuixa referent al volum total de la mostra (5%, 10%, 15%), diferenciant fibres gruixudes i fibres fines, i utilitzant graves de fins a 12 mm de granulometria, prioritzant graves de granulometria més fina, de 2 i 4mm. Utilitzant unes tubs per l'encofrat i deixant les provetes assecat durant uns dies. Una vegada desemmotllades s'han produït de forma diària revisions del pes i assajos d'ultrasons per fer observació de la humitat, evolució de la densitat o la rigidesa dinàmica. Passades dues setmanes s'han realitzat assajos de compressió a totes les provetes per poder obtenir diferents propietats mecàniques.

Els resultats han destacat la tensió de compressió, el mòdul de Young i la humitat. Disminuint la majoria de propietats mecàniques quant més volum de fibres de canemuixa s'han utilitzat a les mostres, a les provetes d'un 20% i 40% de morter. A diferència d'aquestes dues anteriors concentracions, en el cas de les provetes amb un 60% de morter aquesta tendència a disminuir les propietats mecàniques es reverteix, augmentant molt en el valor de tensió. Els valors han sigut els esperables en els casos de les provetes amb menys morter, encara que positius, ja que en el cas de l'ús de les fibres gruixudes de canemuixa la reducció de les propietats es acceptable, en canvia amb les provetes amb més morter han sigut sorprenentment positius, ja que les propietats han sigut



millorades, fent recomanable avaluar altres propietats en el futur, com la d'aïllament per un futur us comercial.

Abstract

This study evaluates the mechanical and hygrometric behavior of the wall or compacted earth, a building material inherited from antiquity and which is beginning to be used and studied for its low energy cost of production, more specifically, the study analyzes the behavior and performance of the mud wall by adding to the composition hemp fibers, the cut of the hemp plant, which has been shown to have very good insulating properties, and which stands out for coming from a plant with a negative carbon footprint that is, the CO₂ it emits throughout its useful life is less than the CO₂ it absorbs.

To carry out the study, 12 series of test tubes were produced, varying the concentration of mortar used in relation to the total weight of the sample (20%, 40%, 60%), and the concentration of hemp fibers in relation to the total volume of the sample (5%, 10%, 15%), differentiating thick fibers and fine fibers, and using gravels of up to 12 mm of granulometry, prioritizing gravels of finer granulometry, of 2 and 4mm. Using tubes for formwork and allow the test tubes to dry for a few days. Once unmolded, weight checks and ultrasound tests were performed daily to monitor humidity, density changes, or dynamic stiffness. After two weeks, compression tests were performed on all the test tubes to obtain different mechanical properties.

The results have highlighted the compressive stress, Young's modulus, and humidity. Decreasing most mechanical properties, the more volume of hemp fibers have been used in the samples, in the test tubes of 20% and 40% mortar. Unlike the previous two concentrations, in the case of test tubes with 60% mortar, this tendency to decrease the mechanical properties is reversed, greatly increasing the stress values. The values have been the expected ones in the cases of the test tubes with less mortar, although positive, since in the case of the use of the thick fibers of hemp the reduction of the properties is acceptable, in change with the test tubes with more mortar have been surprisingly positive, as the properties have been improved, making it advisable to evaluate other properties in the future, such as insulation for future commercial use.



Índex de continguts

1	INTRODUCCIÓ	7
1.1	OBJECTE	7
1.2	ABAST	7
1.3	REQUERIMENTS	8
1.4	JUSTIFICACIÓ	8
2	DESENVOLUPAMENT	10
2.1	ANTECEDENTS	10
2.1.1	<i>Història</i>	10
2.1.2	<i>Procés i característiques</i>	13
2.1.3	<i>Actualitat i avenços</i>	15
2.2	METODOLOGIA	20
2.2.1	<i>Plantejament i materials</i>	20
2.2.2	<i>Procediment per la producció d'una proveta</i>	27
2.2.3	<i>Experimentació i recol·lecció de dades</i>	32
3	RESULTATS	35
3.1	EXCEPCIONS I PROBLEMÀTIQUES	35
3.2	TENSIÓ DE COMPRESSIÓ	39
3.3	MÒDUL DE YOUNG	41
3.4	HUMITAT	44
4	CONCLUSIONS	47

Índex d'imatges

IMATGE 1 MOVIMENTS PRINCIPALS DE L'ÚS DE TÀPIA (JAQUIN ET AL., 2008).....	11
IMATGE 2 CONSTRUCCIONS HISTÒRIQUES DE TÀPIA A EUROPA (JAQUIN ET AL., 2008).....	11
IMATGE 3 TORRE DEL HOMENAJE DE LA ALHAMBRA, ANDALUSIA, ESPANYA.....	12
IMATGE 4 PROCÉS DE CONSTRUCCIÓ D'UNA PARET DE TERRA COMPACTADA (MUŽÍKOVÁ ET AL., 2017).....	14
IMATGE 5 PORTADA DE LA NORMATIVA NEO ZELANDESA 4297 PER TÀPIA.....	19
IMATGE 6 PAQUET DE 25 KG DE MORTER SIKA MONOTOP-612.....	21
IMATGE 7 CANEMUIXA GRUIXUDA.....	22
IMATGE 8 CANEMUIXA FINA.....	22
IMATGE 9 SORRA BARRECHA.....	23
IMATGE 10 SORRA NORMAL.....	23
IMATGE 11 SORRA FINA.....	24
IMATGE 12 PROVETA UTILITZADA PER L'ENCOFRAT D'UNA MOSTRA.....	26
IMATGE 13 RECEPTORS DEL DISPOSITIU D'ULTRASONS.....	27
IMATGE 14 EINES I PENSAMENT DELS MATERIALS.....	28
IMATGE 15 DOSIFICACIÓ D'UNA SÈRIE.....	28
IMATGE 16 IDENTIFICACIÓ I MESURAMENT DEL PES D'UN MOTLLE.....	29
IMATGE 17 PROVETA ENCOFRADA.....	29
IMATGE 18 PROVETES ASSECANT.....	30
IMATGE 19 DESEMMOTLLAT DE LA PROVETA.....	30
IMATGE 20 PROVETES DESEMMOTLLADES.....	31
IMATGE 21 ESTUDI D'ULTRASONS.....	32
IMATGE 22 MÀQUINA D'ASSAIG DE COMPRESSIÓ.....	33
IMATGE 23 EQUIP HIDRÀULIC.....	33
IMATGE 24 PROVETES TRENCADES.....	36
IMATGE 25 PROVETA AMB TRENCAMENT LONGITUDINAL.....	37
IMATGE 26 PROVETA AMB TRENCAMENT LOCAL.....	37
IMATGE 27 PROVETES DEFECTUOSES.....	38

Índex de gràfics

GRÀFIC 1 GRANULOMETRIA DE TERRA COMPACTADA SEGONS PERCENTATGE DE SORRA A LA MESCLA (CHRISTOPHER BECKETT, 2015).....	24
GRÀFIC 2 TENSIÓ DE COMPRESSIÓ DE PROVETES M1.....	40
GRÀFIC 3 TENSIÓ DE COMPRESSIÓ EN PROVETES M2.....	40
GRÀFIC 4 TENSIÓ MÀXIMA DE LES PROVETES M3.....	41
GRÀFIC 5 TENSIÓ-DEFORMACIÓ PROVETA M1.....	42
GRÀFIC 6 MÒDUL ELÀSTIC DE LES PROVETES M1.....	43
GRÀFIC 7 MÒDUL ELÀSTIC DE LES PROVETES M2.....	43
GRÀFIC 8 MÒDUL ELÀSTIC DE LES PROVETES M3.....	44
GRÀFIC 9 VELOCITAT DE PROPAGACIÓ DE LES PROVETES M1.....	45
GRÀFIC 10 VELOCITAT DE PROPAGACIÓ DE LES PROVETES M2.....	46
GRÀFIC 11 VELOCITAT DE PROPAGACIÓ DE LES PROVETES M3.....	46

Índex de taules

TAULA 1 DISTRIBUCIÓ DE PESOS PER CADA TIPUS DE PROVETA.....	26
TAULA 2 TENSIÓ COMPRESSIÓ MÀXIMA RESISTIDA.....	39
TAULA 3 MÒDUL DE YOUNG.....	41
TAULA 4 MITJANA DE VELOCITAT DE PROPAGACIÓ ESTABILITZADA.....	44

1 Introducció

1.1 Objecte

És un fet que vivim en temps de canvi, situacions com el canvi climàtic, la crisi energètica, la escassetat de recursos, i moltes més situacions, ha ocasionat l'augment en els últims anys de la recerca de noves i més sostenibles solucions per afrontar els reptes que enfronta la societat que van començar fa més de 50 anys.

En aquest projecte realitzat als laboratoris de la Escola Superior d'Enginyeries Industrials Aeroespacials i Audiovisual de Terrassa es portarà a terme un estudi de les possibles propietats mecàniques i higromètriques de la terra compactada amb fibres de canem i degut al seu potencial us en l'entorn de la construcció de manera més sostenible.

1.2 Abast

El projecte es veurà dividit en els següents paquets de treball:

- 1) Creació del "State of art".
- 2) Creació de diferents prototipats i recopilació de dades.
- 3) Realització de l'assaig de compressió.
- 4) Redactat de l'informe final .
- 5) Presentació
- 6) Defensa.

També serà necessari lliurar per cada assaig una recopilació i interpretació de les dades per tal de poder seguir l'evolució del projecte.

1.3 Requeriments

La realització del projecte necessitarà una seguit d'eines i materials per ser finalitzat de forma satisfactòria:

- Morter Sika MonoTop®-612 amb un 50% de ciment
- Vaselina
- Graves de diferents granulometries (0-12mm)
- Tubs d'encofrat de 43 mm de diàmetre
- Barra roscada M42 per el premsatge
- Recipients de mesurament de volums
- Equip d'ultrasons d'alt rendiment a 1000 V, i 4 Hz de freqüència
- Maquina d'assaig de compressió

També serà necessari que es disposi d'un programa de tractament de dades, per exemple Excel, per recopilar les dades obtingudes durant tot l'estudi i durant l'assaig de compressió

1.4 Justificació

Com hem esmentat al principi del document el segle XXI ha resultat ser la època dels reptes per la sostenibilitat, per intentar crear una societat sostenible econòmicament, socialment, i sobretot mediambientalment sense comprometre la vida de les generacions futures.

Un d'aquests reptes es la superpoblació, la despesa energètica i la contaminació que hi son directament causades per la producció d'habitatges per suplir aquest augment de població. En aquest projecte s'estudia una opció més sostenible basant els elements estructurals en terra compactada utilitzant fibres de cànem per millorar les seves propietats, un mètode molt més barat i amb menys petjada ecològica que el elements de construcció actuals.



Tota aquesta recerca seguirà part de la investigació realitzada per la direcció del TFG amb anterioritat "*Textile-reinforced rammed earth: Experimental characterisation of flexural strength and toughness*" (Bernat-Maso et al., 2016, 2017). D'aquesta manera la direcció i sots direcció del projecte seran una part activa de la investigació i ajudaran en la recerca i anàlisi de dades.

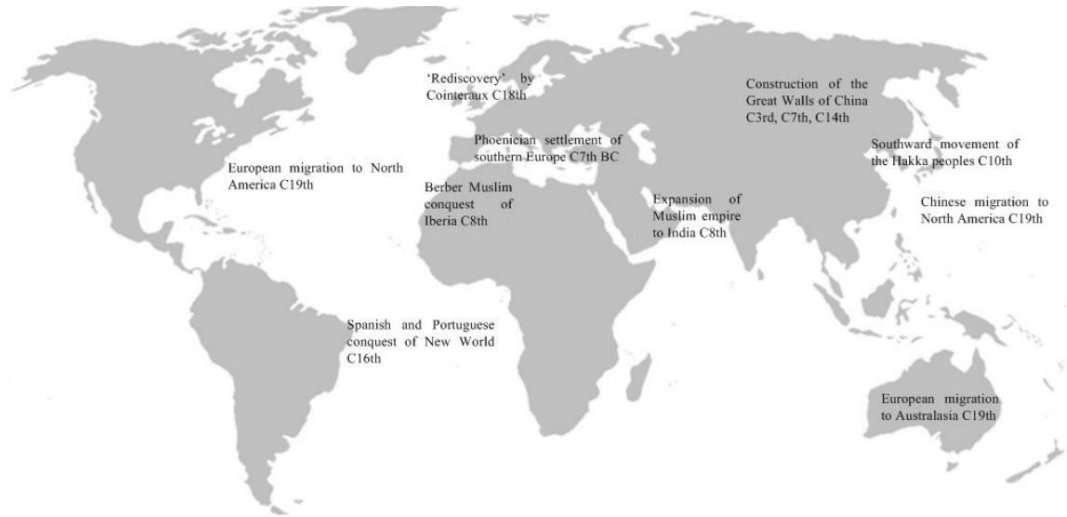
Per tant aquesta recerca no té tant com objectiu trobar un nou recurs en la construcció, com investigar una manera alternativa a els estàndards actuals i avaluar la seva viabilitat en un futur

2 Desenvolupament

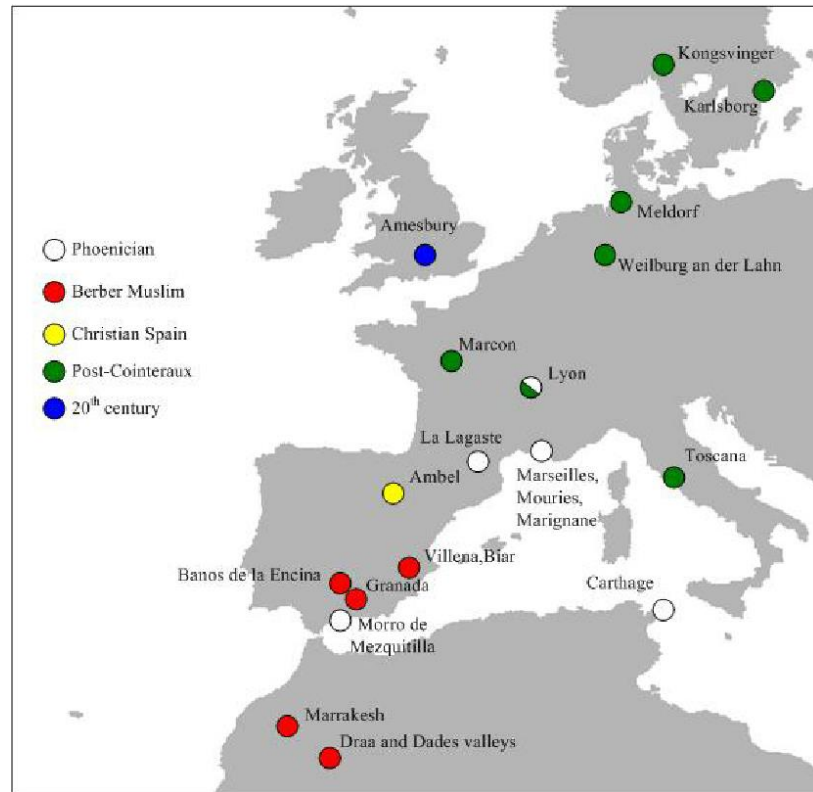
2.1 Antecedents

2.1.1 Història

Com primer punt, que es exactament la tàpia, terra compactada o *rammed earth*? És una tècnica per la creació d'elements estructurals com parets, terres i similars, que data de temps dels semi-nòmades neolítics i que podem trobar principalment a Àsia oriental, Europa occidental, el nord d'Àfrica, Austràlia i Amèrica (Imatge 1). Destaquem com a la península ibèrica trobem un dels majors punts de construccions amb tàpia, herència del cresol multicultural que ha esdevingut la península ibèrica durant segles (Imatge 2), tenint majoritàriament construccions llegades de la Al-Àndalus (Imatge 3), construccions de l'Espanya cristiana, o fins i tot dels fenicis, essent sobretot el territori de l'actual Andalusia un punt molt important d'estudi i d'avaluació de totes aquestes estructures (Martín-del-Río et al., 2021). Lamentablement l'aparició amb el temps de nous materials estructurals com el formigó, i les necessitats de construccions més complexes i exigents van anar desplaçant la tàpia cada vegada més fins esdevenir un element minoritari a la construcció.



Imatge 1 Moviments principals de l'ús de tàpia (Jaquin et al., 2008)



Imatge 2 Construccions històriques de tàpia a Europa (Jaquin et al., 2008)



Imatge 3 Torre del homenaje de la Alhambra, Andalusia, Espanya

Encara que la tàpia ha sigut utilitzada al llarg de tota la història no seria fins els anys setanta que a diferents grups van començar a investigar la tàpia i es va començar una iniciativa per promoure el seu ús, destacant als Estats Units l'empresa "Rammed Earth Works" fundada per David Easton, i "Tom Schmidt Construction" com principals impulsors de la tàpia al país, o a Austràlia on les empreses fundades per Giles Hohnen i Stephen Dodson oferien cases construïdes amb tàpia. Gràcies a aquests moviments avui en dia la construcció amb terra compactada està molt consolidada a l'oest d'Austràlia i al sud-oest dels Estats Units. Mentres a la resta del món i sobretot a Europa està començant a esdevenir un material sostenible (Jaquin et al., 2008).

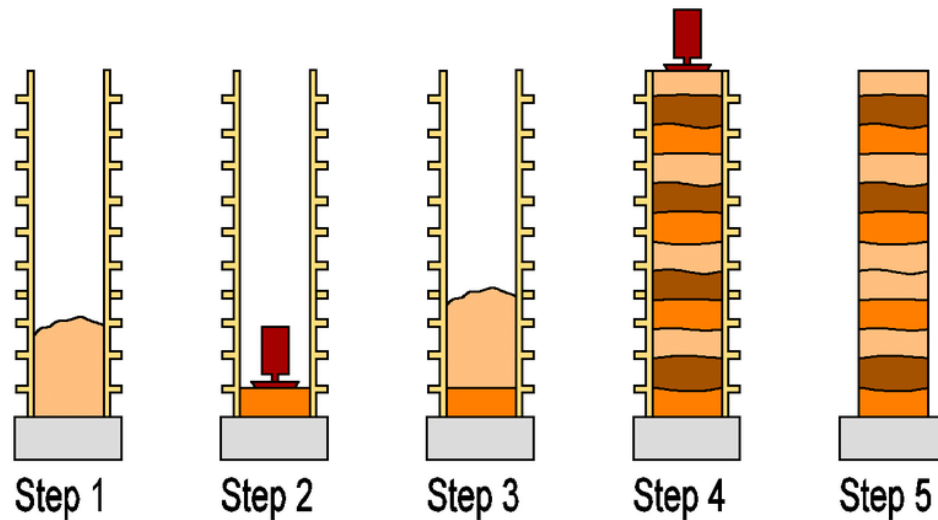
2.1.2 Procés i característiques

Per la producció de la tàpia sempre s'han utilitzat matèries primes d'origen natural com sorra o grava, utilitzant també sang animal o calç com estabilitzador. Principalment a les primeres construccions s'utilitzava grava amb percentatge d'argila, que actuava d'aglutinant, essent una proporció de 30% d'argila i la resta de grava (Dernier, 2014). Als últims anys la producció no ha canviat gairebé, la novetat es l'adició de ciment per millorar la resistència i la durabilitat, utilitzant un 5-10% de ciment en pes. Gracies a aquesta adició dels aglutinants com l'argila pot ser reduïda conservant un bon rati d'estabilització arribant a uns percentatges d'aglutinant de 8-10% depenent d'algunes característiques com la granulometria, la plasticitat, etc.

El procés de producció es molt senzill i la raó de que sigui una opció de construcció tan atractiva, seguint els passos següents:

- Utilitzant un encofrat disposem una primera capa de la barreja d'uns 10-25 cm de gruix.
- Es comprimeix la capa fins arribar aproximadament al 50% del volum inicial.
- Es repeteix aquest procés per cada capa.
- Es retira l'encofrat deixant exposat l'element estructural

Aquest procés era molt costós fa anys per la feina que comportava l'esforç de compressió iteratiu, que era molt exigent, però avui en dia, amb l'existència dels elements neumàtics la producció amb tàpia ha esdevingut molt més senzilla, podent augmentar la compressió realitzada i el nombre de capes de l'element estructural (Imatge 4).



Imatge 4 Procés de construcció d'una paret de terra compactada (Mužíková et al., 2017)

En quant a les seves característiques mecàniques no ha sigut fins aquests últims anys que s'ha pogut entreveure realment els beneficis que aporta degut a la substitució per altres materials de construcció en els últims segles. La seva característica principal és la accessibilitat, és un material barat i que és fàcil d'obtenir i per construir per una sola persona, a més la seva despesa energètica es relativament baixa comparat amb altres materials d'ús més generalitzat, mentrestant que el consum energètic per la producció primària per la tàpia és tan sols d'uns 44 Kw/m^3 , el del ciment pot arribar fins uns 800 kW/m^3 (Mužíková et al., 2017).

Encara els seus beneficis també cal destacar algunes característiques a tenir en compte que poden comportar problemes: La utilització específica de cert tipus de terres és necessària per poder tenir un bon comportament, no tot tipus de terres es poden utilitzar, la terra compactada no és idònia per ambients freds i no és possible la creació d'elements estructurals de tàpia amb certa complexitat, usualment la tàpia queda relegada a formes quadrades o rectangulars (Self-reliance University, 2020).

2.1.3 Actualitat i avenços

Com s'ha mencionat diverses vegades en aquest document en els últims anys el sector de la construcció ha reprès l'interès per l'ús de la tàpia a com element de construcció sostenible. Gracies a aquest fet s'han promogut diverses investigacions i estudis per poder donar-li nous usos i millores.

2.1.3.1 Terra compacta estabilitzada

Llavors, encara que la tàpia és un element estructural barat i de baix impacte ambiental, el gran objectiu d'aquestes investigacions es aconseguir que la tàpia assoleixi rendiments aptes en diferents apartats per els diferents requeriments que la legislació de cada país pot exigir, un exemple es l'estudi "*Characterization of the mechanical and physical properties of stabilized rammed earth: A review*"(Ávila et al., 2022) on es ressaltla la importància de l'adició de estabilitzadors a la tàpia per que les diferents legislacions permetin el seu us, remarcant com l'ús de ciment ajuda a millorar les principals i més importants propietats mecàniques, com la resistència a la compressió, que en el cas de la tàpia sense estabilitzadors té un rendiment de 1.0-3.0 MPa com s'indica a l'estudi "*Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls*" (Jayasinghe & Kamaladasa, 2007), podent millorar aquest rendiment fins els 12.0 MPa, depenent de la concentració de ciment utilitzat. En aquest primer estudi, a més a més, menciona la possibilitat d'utilitzar fibres sintètiques que complementin el ciment i que redueixin l'impacte ambiental, de manera que es milloraran esforços de flexió i tensió. D'aquesta manera va néixer la tàpia estabilitzada, que a diferencia de la tàpia original, té unes propietats mecàniques competitives, sent aquesta la més utilitzada a l'actualitat. Encara de l'existència de la tàpia estabilitzada hi ha estudis que intenten suplir el baix rendiment d'algunes propietats mecàniques amb altres mètodes, com a "*Textile-reinforced rammed earth: Experimental characterisation of flexural strength and toughness*"(Bernat-Maso et al., 2016) on es

planteja la utilització de reixetes tèxtils per poder millorar el seu esforç de tensió i la seva poca energia de deformació, donant resultats molt positius.

2.1.3.2 Utilització de fibres i canemuixa

Un altre punt important i molt relacionat amb aquest estudi es la utilització de diferents fibres a la composició de la tàpia, que com hem esmentat anteriorment es un mètode amb un impacte ambiental menor a només utilitzar ciment. Hi ha diferents estudis que contempen diferents tipus de fibres com "*Reinforcing rammed earth with plant fibers: A case study*"(Koutous & Hilali, 2021), on utilitzen fibres de palla i de palmera datilera d'uns 3 cm, comprovant una millora en l'esforç de tensió i compressió que pot arribar a ser comparable a la que proporciona el ciment, però reduint la rigidesa. Per això en molts dels estudis consultats un punt comú és la utilització de el ciment amb les fibres per poder suplir aquesta pèrdua de rigidesa.

En el cas del nostre estudi interessa avaluar el comportament de les fibres de canemuixa, element provinent del cànem o en anglès *Hemp*, una planta de la qual s'extreu el gra per obtenir oli alimentari, la canemuixa es la tija de la planta. De la canemuixa destaca el seu comportament aïllant, essent utilitzat per fer pasta de paper, llana aïllant o materials compostos plàstics. Encara que la seva millor propietat es que es un material amb petjada de carboni negatiu, ja que la planta de cànem absorbeix més CO₂ del que emet a la seva vida, requerint 1,7 tones de CO₂ per fer créixer una tona de cànem. En els últims anys la utilització de la canemuixa ha començat a destacar en la construcció per aquestes propietats aïllants i higromètriques, a l'estudi "*A comprehensive review on the use of hemp in concrete*"(Barbhuiya & Bhusan Das, 2022) veuen molt futur a l'aplicació de la canemuixa al sector constructiu després de realitzar diferents proves amb ciment, destacant la seva

propietat de CO₂ negatiu, i com pot ser reciclada després de la vida de l'estructura on s'ha utilitzat

2.1.3.3 Propietats higromètriques i aïllants

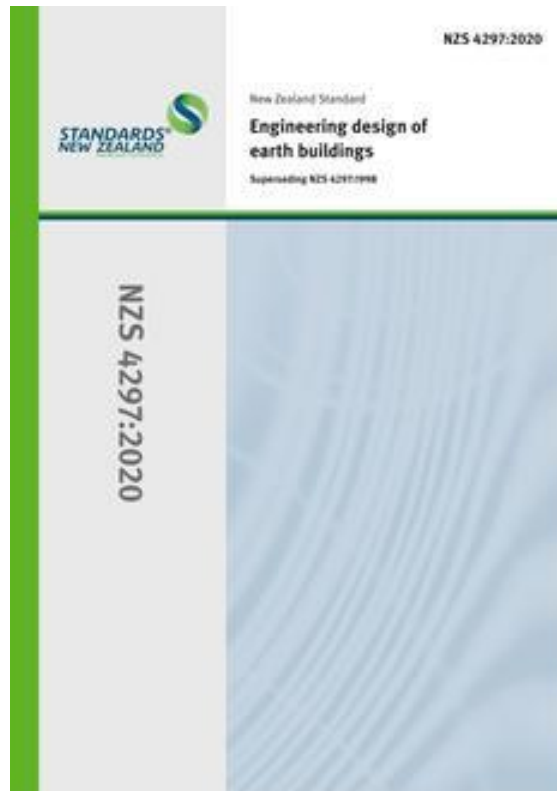
Un altre punt que ha interessat molt als investigadors, i on pot desmarcar-se d'altres composicions estructurals més convencionals és el seu comportament tèrmic o d'humitat, a l'estudi "*The effects of stabilizers on the thermal and the mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts*"(Toufigh & Kianfar, 2019) avaluen aquestes propietats utilitzant diferents estabilitzadors com ciment, puzolana, goma guar, fibra de vidre i material de canvi de fase microencapsulat, sent aquest últim un bon additiu per tractar la humitat i concloent que el tipus de mescla de la tàpia és un punt molt important en quant la conductivitat tèrmica. Un mètode que s'utilitzarà en aquest estudi i que ha demostrat ser molt útil es l'ús d'ultrasons per poder determinar la humitat d'una mostra a materials amb terra gràcies en part a un estudi realitzat a l'ESEIAAT, per el director i codirector d'aquest projecte, "*Ultrasound transmission method to assess raw earthen materials*"(Bernat-Maso et al., 2017), desenvolupant com la humitat de la mostra i la velocitat dels ultrasons estan relacionats de manera lineal, podent determinar el seu equilibri higromètric, i fins i tot podent determinar el mòdul de Young de la mostra.

2.1.3.4 Legislació

En quan a la legislació per la utilització d'aquest element està molt regulada als països occidentals, com els Estats Units, Austràlia, Alemanya, Polònia i fins i tot a Espanya, encara que hi altres països com l'Índia o Zimbabwe que també contenen amb la seva pròpia norma . Els criteris més comuns a aquestes normatives són l'esforç a compressió y els paràmetres de la mescla de terra, com la granulació, el contingut de

substàncies orgàniques, plasticitat, etc. (Rogala et al., 2021), destacant els següents països i les seves normatives.

- Austràlia: Existeixen tres normatives, "*Earth Wall Construction*" (Middleton & Schneider, 1987), "*Building with Earth Bricks and Rammed Earth in Australia*" (Minke, 2013) i "*The Australian Earth Building Handbook*" (Walker, 2002). Totes tres normatives regulen la utilització de substàncies orgàniques i la força de compressió. És en el cas de la composició del material on la segona normativa va una mica més enllà i regula el contingut de sals solubles a la composició. Les altres dues es diferenciarien per la regulació de una propietat diferent del material cadascuna, la primera norma regularà la resistència a l'aigua i la tercera la deformació lineal.
- Nova Zelanda: Serà un cas similar al australià amb 3 normatives, "*Engineering Design of Earth Buildings*" (NZS, 1998) (Imatge 5), "*Materials and Workmanship for Earth Buildings*" (Committee, 1998) i "*Earth Buildings Not Requiring Specific Design*" (Standard, 1998). A diferència del cas australià totes tres normatives regulen els mateixos aspectes, el contingut de sals a la composició, la força de compressió, la de tensió la deformació lineal, i la resistència a l'aigua.



Imatge 5 Portada de la normativa Neo Zelandesa 4297 per tàpia

- Estats Units: El país nortamericà, igual que els països anteriors basa la seva legislació en 3 normatives. “*New Mexico Earthen Building Materials Code*”(Code, 2006) la qual regula casi tots elements de la composició menys la plasticitat, “*Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures*”(ASTM, 2003) essent de les poques normatives al mon que contempen la resistència a la congelació, i “*Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures*”(Maafi et al., 2017) regulant la resistència a l'aigua.
- Espanya: En el nostre cas només tenim una norma per la granulació de la composició, el contingut de productes orgànics, i la resistència a compressió “*Bases Para El Diseño i Construcción Con Tapial*”(Bauluz del Río & Bárcena Barrios, 1992).

2.2 Metodologia

2.2.1 Plantejament i materials

Per realitzar l'estudi primer es va plantejar les proporcions de cada material i les proporcions i nombre de provetes.

Començant amb els materials i les seves proporcions es necessitava en primer lloc la grava, fibres de cànem i un aglutinant que seria argila vermella en pols, però després de setmanes de buscar es va escollir per canviar l'aglutinant per morter, ja que com s'ha exposat a l'Estat de l'art el ciment que conté el morter pot reforçar les propietats mecàniques de les nostres provetes. Per tant, s'ha utilitzat com aglutinant Morter Sika MonoTop®-612 (Imatge 6), que conté entre un 25 i un 50% de volum de ciment segons el document tècnic de seguretat (consultar annex apartat 1), i 3 tipus de sorra, sorra normal (0-4mm de grandària de gra), sorra fina (0-2 mm de grandària de gra) i sorra barrecha (0-12 mm de grandària de gra).

Per la producció de les provetes es van pensar diferents proporcions per intentar poder comparar les dades de manera efectiva. Finalment es van definir diferents volums amb nomenclatures diferents per poder identificar cada proveta, tenint en compte que els valors que variaran serà el percentatge de morter i el percentatge de cànem, i també tenint en compte la quantitat d'aigua utilitzada i els percentatges de cada tipus de grava:

- Volum de morter: Es va definir 3 possibles proporcions de morter segons el pes total de la proveta. Un primer volum de 20% , un segon de 40% i un tercer de 60% del pes de la dosificació de sorra i morter. En aquest cas la nomenclatura seria una M per identificar el morter acompanyat de diferents números segons la el percentatge de morter utilitzat, M1 (20% de morter), M2 (40% de morter), i M3 (60% de morter).



Imatge 6 Paquet de 25 kg de morter Sika MonoTop-612

- Volum de cànem: Es va determinar que també s'utilitzarien 3 volums per cada tipus de cànem, un tipus de fibres de canemuixa d'uns 10 mm de llargària aproximadament, que anomenem canemuixa gruixuda, i unes altres fibres de 5 mm aproximadament, que anomenem canemuixa fina. La excepció en el cas del cànem és que el percentatge utilitzat no serà sobre el pes total de la mostra, sinó pel seu volum, per calcular-ho es va omplir tot un recipient d'encofrat de les provetes i es va omplir sencer, es va observar el pes del cànem utilitzat, i el percentatge del volum de canemuixa es referenciarà amb aquest pes, un primer volum de 5%, el segon de 10%, i el tercer de 15% del volum total de la proveta. Les nomenclatures seria com en el cas del morter una primera lletra que depèn del tipus de cànem utilitzat, F per les fibres fines de cànem (Imatge 8) , G per les fibres gruixudes de cànem (Imatge 7), i de la mateixa manera que la anterior s'utilitzen diferents números per descriure el volum de fibres, F1 o G1 (5% de volum) , F2 o G2 (10% de volum) i F3 o G3 (15% de volum).



Imatge 7 Canemuixa gruixuda



Imatge 8 Canemuixa fina

- Volum d'aigua: Sempre serà un 15% de el pes de el morter
- Percentatges de sorra: El pes de tota la sorra serà la resta de la dosificació que no és morter, però com es menciona a l'estudi "*The effects of stabilizers on the thermal and the mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts*"(Toufigh & Kianfar, 2019) mencionat a l'estat de l'art, la composició de la mescla de terra és vital pel bon funcionament de la mescla. Segons l'estudi "*Notched mini round determinate panel test to calculate tensile strength and fracture energy of fibre reinforced cement-stabilised rammed earth*"(Christopher Beckett, 2015) es dona un petit gràfic on és defineix la granulometria adequada segons la concentració de sorra. Avaluant aquest gràfic es va determinar que s'utilitzaria un

percentatge de un 22% per la sorra de tipus barrecha (imatge 9), un 39% de sorra normal (imatge 10), i un altre 39% de sorra fina (imatge 11). Amb aquesta mescla obtenim una composició molt global però amb una concentració principal de grans de sorra petits que siguin aptes per la utilització de proporcions més elevades de morter.



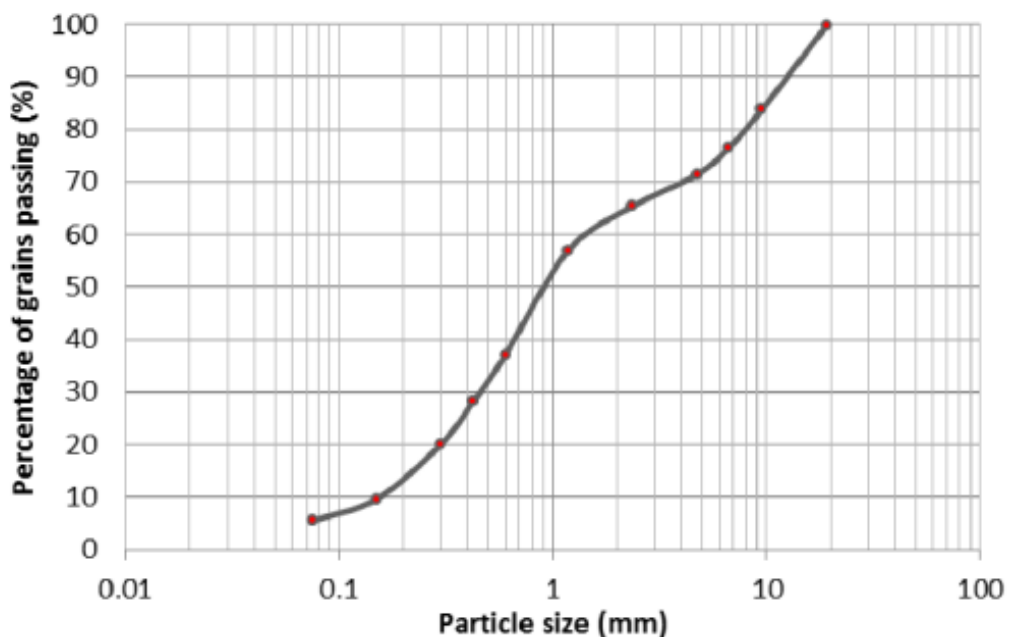
Imatge 9 Sorra barrecha



Imatge 10 Sorra normal



Imatge 11 Sorra fina



*Gràfic 1 Granulometria de terra compactada segons percentatge de sorra a la mescla
(Christopher Beckett, 2015)*

Una vegada determinada la nomenclatura i les proporcions, es determina cada sèrie de provetes amb les seves proporcions específiques i el nombre de repeticions de cada tipus de proveta. Com s'ha mencionat abans les proporcions variables son el morter i la canemuixa, per tant les variacions de cada tipus de proveta giraran envers aquets dos materials. Com l'objectiu

de l'estudi es l'observació dels efectes de la canemuixa a la tàpia, la majoria de variacions de canemuixa es donaran a provetes amb la concentració més baixa de morter per garantir que el morter elimini no superposi les seves propietats a la de la canemuixa, es farà un tipus de proveta sense canemuixa, 3 tipus variant de canemuixa fina , i altres 3 tipus variant la canemuixa gruixuda, un total de 7 tipus de proveta amb 20% de morter. Per les proporcions més grans de morter s'utilitzarà només canemuixa gruixuda, en el cas del 40% de morter es faran 2 tipus de provetes amb poc al mínim i el màxim de canemuixa gruixuda, 2 tipus per tant, i en el cas de les provetes amb la proporció de 60% de morter a més es fabricarà un tipus de proveta sense canemuixa sent 3 tipus en aquest cas. Per assegurar els resultats es faran 3 provetes de cada tipus.

Fent recompte es fabricaran 12 tipus de provetes(Taula 1), amb 3 repeticions per sèrie, fabricant un total de 36 provetes.

Serie	Pes de morter(g)	Pes aigua(g)	Pes barreja(g)	Pes sorra normal(g)	Pes sorra fina(g)	Pes canemuixa gruixuda(g)	Pes canemuixa fina(g)
M1	50	7,5	44,4	77,78	77,78	0	0
M1G1	50	7,5	44,4	77,78	77,8	0,05	0
M1G2	50	7,5	44,4	77,78	77,78	0,1	0
M1G3	50	7,5	44,4	77,78	77,78	0,15	0
M1F1	50	7,5	44,4	77,78	77,78	0	0,05
M1F2	50	7,5	44,4	77,78	77,78	0	0,1
M1F3	50	7,5	44,4	77,78	77,78	0	0,15
M2G1	100	15	33,3	58,33	58,33	0,05	0
M2G3	100	15	33,3	58,33	58,33	0,15	0
M3G1	150	22,5	22,2	38,89	38,89	0,05	0
M3G3	150	22,5	22,2	38,89	38,89	0,015	0

M3	150	22,5	22,2	38,89	38,89	0	0
----	-----	------	------	-------	-------	---	---

Taula 1 Distribució de pesos per cada tipus de proveta

Per fer l'encofrat de cada proveta s'utilitza uns recipients de PVC de 43mm de diàmetre i 14,5mm de altura, prèviament netejades i revisades per intentar evitar imperfeccions que puguin perjudicar el rendiment de la proveta, com trencaments, inclinacions, etc.(Imatge 12)



Imatge 12 Proveta utilitzada per l'encofrat d'una mostra

Per poder determinar la humitat de les mostres i la seva evolució, ens basem en l'exposat anteriorment amb l'estudi "*Ultrasound transmission method to assess raw earthen materials*"(Bernat-Maso et al., 2017), es realitzarà un estudi d'ultrasons de cada mostra de forma diària per poder determinar l'evolució de la humitat de la mostra, per portar a terme l'estudi s'utilitzarà un instrument d'ultrasons d'alt rendiment proveït per la universitat.



Imatge 13 Receptors del dispositiu d'ultrasons

2.2.2 Procediment per la producció d'una proveta

Per explicar el procediment es posarà l'exemple de la producció d'una proveta amb morter i canemuixa.

1. Obtenció i mesurament del pes de cada element de la proveta utilitzant una mateixa bascula a tots els casos (Imatge 13). S'obté per 750 g totals de pes de les provetes de aquesta sèrie el morter segons el percentatge que hem aplicat. Una vegada pesat s'aboca al cub de mescla, la resta del pes serà la sorra aplicant els ratis definits anteriorment, es diposita al cub, a més es calcula el pes de canemuixa i es diposita al cub, s'agita la mescla de sòlids intentant distribuir de forma homogènia tots els components de la mescla, sobretot la canemuixa, per últim segons el pes de morter s'afegeix una quantitat d'aigua determinada.



Imatge 14 Eines i pensament dels materials

2. Durant un minut s'agita la mescla intentant que l'aigua arribi a tot el material i tornant a procurar distribuir la canemuixa de forma homogènia a tota la dosificació (Imatge 14).
- 3.



Imatge 15 Dosificació d'una sèrie

4. Tenint en compte el pes de 250 g d'una proveta, es disposa un dels motlles prèviament netejat, identificat i pesat (Imatge 16), i s'aboca 125 g de mescla, es comprimeixen amb una barra roscada de 42M de forma

repetida fins unes 15 iteracions, i amb uns altres 125 g es torna a repetir la compressió.



Imatge 16 Identificació i mesurament del pes d'un motlle



Imatge 17 Proveta encofrada

5. Una vegada s'ha pesat la proveta amb el motlle es deposita les provetes per que es puguin assecar i es puguin desemmotllar amb més facilitat



Imatge 18 Provetes assecant

6. Passat un dia o dos es desemmotllen les provetes pressionant la proveta contra una barra circular que faci joc amb el motlle (Imatge 19) i les pesem per tornar a depositar-les per poder identificar-les (Imatge 20)



Imatge 19 Desemmotllat de la proveta



Imatge 20 Provets desemmotllades

7. Durant dues setmanes s'espera que les provets s'assequin per realitzar els assajos de compressió. Per poder avaluar l'evolució de la humitat de les mostres i poder determinar quan estan llestes per assajar, de forma diària es realitza un assaig d'ultrasons a cada mostra, pesant la mostra al principi i al final del assaig per poder tenir en compte l'adició a la mostra de la vaselina utilitzada per poder fer l'assaig de forma correcta. L'assaig d'ultrasons es basarà en la transmissió d'ultrasons a través de la mostra utilitzant un emissor i un receptor puntuals amb una freqüència de 4 Hz i un voltatge d'excitació dels cristalls de 1000 V (Imatge 21) degut la forma geomètrica de cilindre de les provets, per assegurar el bon funcionament dels assajos, es marquen uns punts concrets de la proveta on es disposaran l'emissor i el receptor sempre a la part inferior de la proveta, per poder recolzar-los i que la altura d'aplicació sigui sempre igual.



Imatge 21 Estudi d'ultrasons

2.2.3 Experimentació i recollida de dades

Una vegada les provetes han aconseguit el seu equilibri d'humitat, que es pot comprovar amb els estudis d'ultrasons que es realitzen de forma diària, es considera que les mostres estan llestes per poder realitzar els assajos de compressió.

Per realitzar els assajos s'ha utilitzat un sistema hidràulic al laboratori de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria de la universitat (Imatge 22)(Imatge 23)



Imatge 22 Màquina d'assaig de compressió



Imatge 23 Equip hidràulic

A l'assaig el element compressor actua a 5mm/min, utilitzant unes gomes en la base i la part superior de la proveta reduir la concentració de tensions derivada de les irregularitats superficials puntuals d'algunes mostres. La freqüència mostreig de l'equip de compressió és de 50 Hz, és a dir, revisió per cada 0,02 segons.

Les dades que proporciona l'equip és el temps d'assaig de la compressió de la mostra, la força de compressió que la proveta resisteix a cada punt, i el desplaçament de l'element compressor. Amb aquestes dades podem obtenir diferents dades d'interès per l'explicació de resultats, com la pressió que s'aplica a la mostra, la deformació longitudinal aparent de la proveta, i combinant aquestes dos dades, podem obtenir el mòdul de Young aparent, que necessitarem per poder examinar l'elasticitat de les mostres i les variacions segons les diferents series, a més de lògicament veure la resistència a compressió màxima de la mostra

3 Resultats

Una vegada realitzats tots els processos de producció i d'assaig es poden tractar les dades per trobar diferents propietats i avaluar la viabilitat de l'estudi. Alguns es tracten i s'argumenten a aquest document, mentre que algunes altres dades obtingudes i que no s'han considerat de suficient rellevància, es mostren als annexes proporcionats.

3.1 Excepcions i problemàtiques

Al llarg de tot el procés de producció s'han donat una sèrie de problemes que s'han d'assenyalar i les solucions proporcionades.

- Valors aparents: És important ressaltar que en aquest estudi els valors obtinguts no són els reals, ja que la falta de control en alguns elements de l'estudi fa que els valors obtinguts només siguin aparents. Per aquesta raó aquest estudi és vàlid per la comparació de les propietats de les provetes, però no per l'obtenció de valors.
- Trencament de les provetes al desemmotllament: Durant el procés per desemmotllar les provetes, algunes provetes que havien assecat massa i que eren molt difícils de treure van trencar per el pla de construcció de les capes, partint per la meitat de les provetes, i unes poques trencant per diferents plans. Aquestes provetes són descartades i emmagatzemades per un possible futur us(Imatge 24). Per suplir aquestes provetes i la problemàtica de que assequin massa ràpid s'han fet unes provetes per cada sèrie que tingui una proveta o cap aprofitable, essent les sèries M1G1, M1G2, M1F1 i M1F3, per intentar que no trenquin s'ha escollit per desemmotllar les provetes al poc de fer-les i deixant que s'assequin fora de l'encofrat.



Imatge 24 Provetes trencades

- Superfícies cònques: Algunes provetes s'han assecat tenint alguna de les superfícies una forma cònca, això depenent de la proveta pot afectar l'assaig de compressió falsejant els primers resultats, fins que la part cònca trenca localment i s'aplica la càrrega de forma correcta, s'ha intentat solucionar llimant aquestes superfícies.
- Inclinió de les provetes: Unes poques provetes s'han assecat amb una certa inclinió, possiblement per algun problema en el motlle d'encofrat, depenent el grau d'inclinió l'assaig no funcionarà ja que la proveta trençarà de forma diagonal i el seu rendiment no serà el real. Igual que al cas anterior s'ha llimat la base per intentar corregir la inclinió.
- Trencament defectuós: És important que per suposar un comportament correcte de la proveta a l'hora de la realització de l'assaig, les provetes hagin trencat longitudinalment (Imatge 25). Encara que la majoria de les provetes han fet un trencament correcte algunes han trencat de maneres diferents, i per tant, sense donar un resultat òptim (Imatge 26). De forma addicional als annexes s'han adjuntat imatges dels trencaments de totes les mostres



Imatge 25 Proveta amb trencament longitudinal



Imatge 26 Proveta amb trencament local

- Provetes mal assecades: Una vegada es van produir les noves series de provetes per cobrir les que havien trencat, l'equip vam ressaltar que el color d'aquestes provetes, desmottlades només fer-les, era diferent (Imatge 25). A l'hora de fer l'experimentació s'ha fet obvi aquest canvi tenint un rendiment molt més menor que desmottlades passats uns dies. Per aquesta raó, encara que si es disposarà de les dades

d'aquestes provetes a les taules i gràfics del annex, a les comparatives dels pròxims apartats s'obviaran per evitar que distorsionin les dades proporcionades. Teoritzem que aquest canvi de rendiment es degut a que en el moment de desemmotllar, part de la humitat que queda a la canemuixa i que el ciment absorbeix quan ho necessita s'evapora, per la qual cosa el rendiment del ciment es menor i les seves propietats empitjoren.



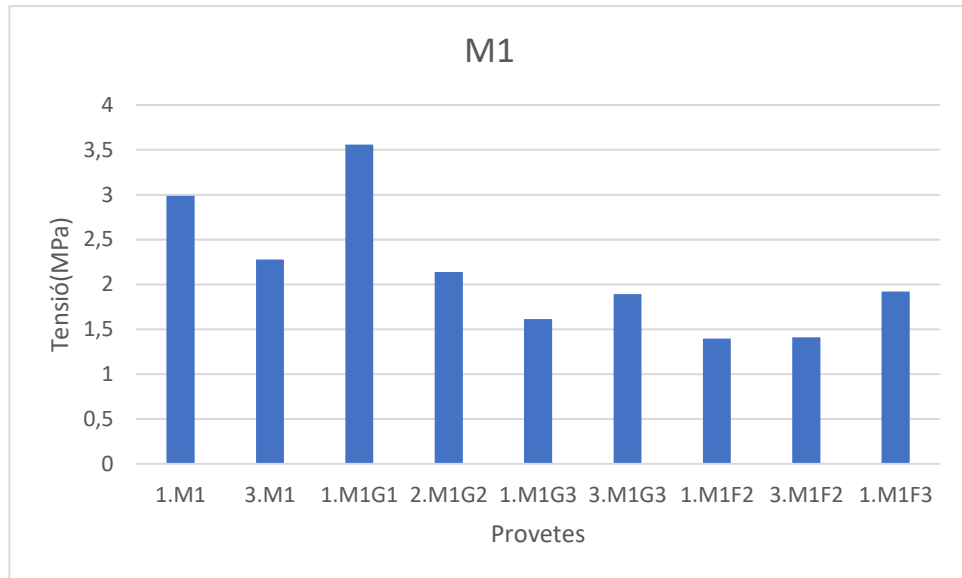
Imatge 27 Provetes defectuoses

3.2 Tensió de compressió

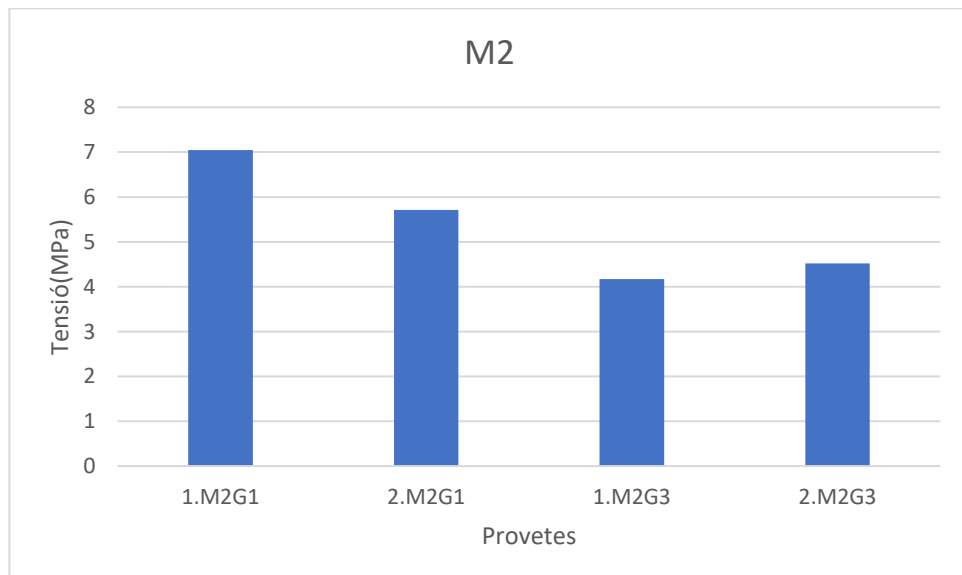
Provetes	Tensió(Mpa)	Provetes	Tensió(Mpa)
1.M1	2,98	1.M1F3	1,92
3.M1	2,27	4.M1F3	0,65
1.M1G1	3,55	5.M1F3	0,56
4.M1G1	0,70	6.M1F3	0,42
5.M1G1	0,95	1.M2G1	7,04
6.M1G1	0,29	2.M2G1	5,70
2.M1G2	2,13	1.M2G3	4,17
4.M1G2	1,54	2.M2G3	4,52
5.M1G2	0,98	1.M3	6,71
1.M1G3	1,61	2.M3	8,03
3.M1G3	1,89	3.M3	9,28
4.M1G3	2,28	1.M3G1	11,83
4.M1F1	0,82	2.M3G1	9,70
5.M1F1	1,21	3.M3G1	14,11
6.M1F1	0,55	1.M3G3	16,10
1.M1F2	1,39	2.M3G3	11,53
3.M1F2	1,40	3.M3G3	10,52

Taula 2 Tensió compressió màxima resistida

El primer valor a tractar a partir, de forma conseqüent a l'assaig de compressió realitzat, és la tensió de compressió màxima que han suportat les provetes. En el cas de les propietats mecàniques era esperable que fossin menors quan més canemuixa s'utilitzés com s'ha mencionat als antecedents, a l'apartat d'ús de fibres. En el cas de els dos primers volums de ciment, el 20% (Gràfic 2) i el 40%(Gràfic 3), els resultats són els suposats, reduint la tensió quan més volum de canemuixa s'utilitza, destacant que aquest efecte es potencia amb la utilització de les fibres de canemuixa fines.



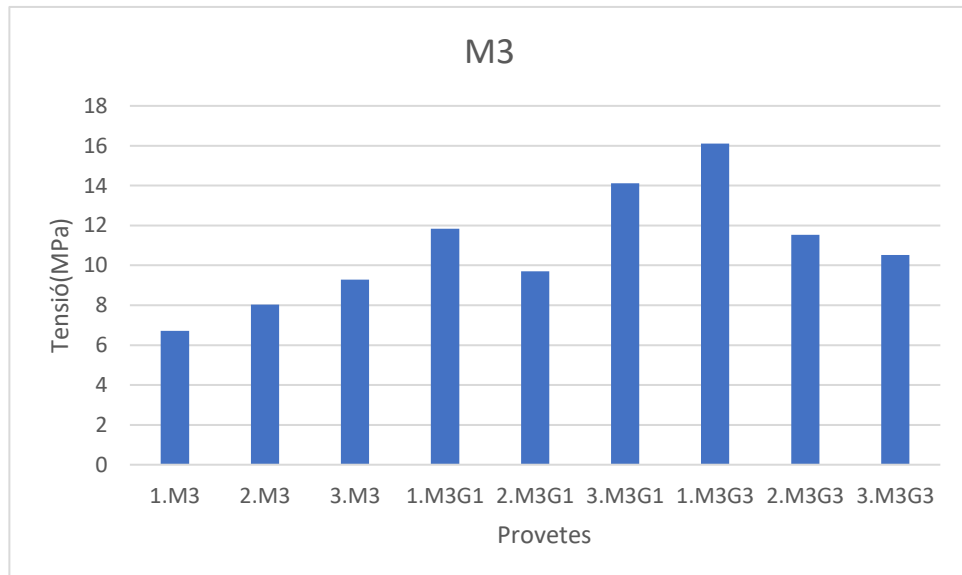
Gràfic 2 Tensió de compressió de provetes M1



Gràfic 3 Tensió de compressió en provetes M2

De forma inesperada, aquesta tendència negativa de la tensió es reverteix a l'hora d'avaluar el comportament de les series amb un 60% de morter (Gràfic 4), en aquest cas podem apreciar una clara tendència creixent, on les provetes amb més volum de canemuixa arriba a duplicar el valor de les provetes sense canemuixa.

Cal destacar que la proporció de morter del 60% és realment la proporció idònia utilitzada per fer la tàpia reforçada, amb un 30% de ciment, ja que el morter utilitzat, com hem mencionat anteriorment té un 50% de ciment.



Gràfic 4 Tensió màxima de les provetes M3

3.3 Mòdul de Young

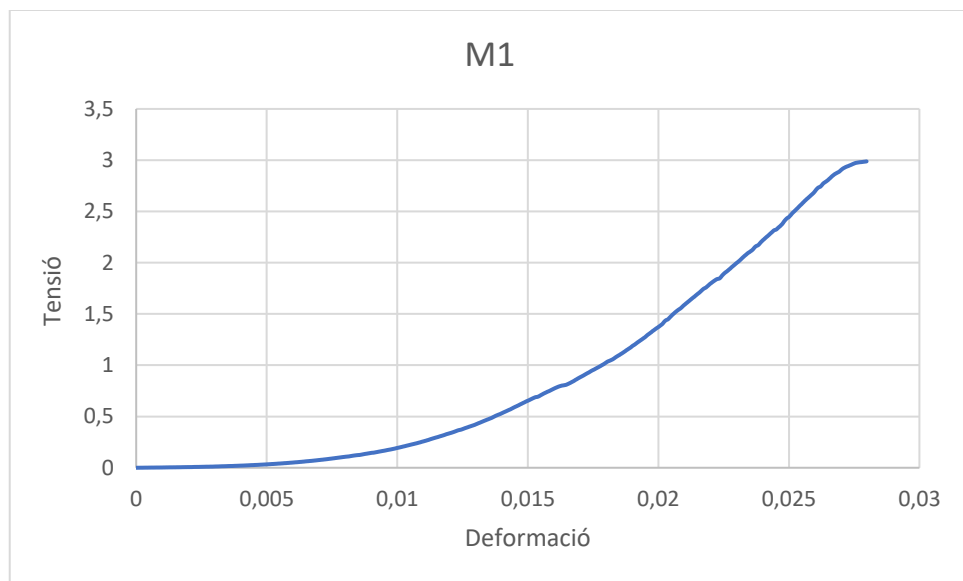
Provetes	E(Mpa)	Provetes	E(Mpa)
1.M1	207	1.M1F3	68
3.M1	129	4.M1F3	21
1.M1G1	195	5.M1F3	26
4.M1G1	16	6.M1F3	15
5.M1G1	25	1.M2G1	360
6.M1G1	17	2.M2G1	372
2.M1G2	138	1.M2G3	169
4.M1G2	100	2.M2G3	198
5.M1G2	37	1.M3	402
1.M1G3	131	2.M3	478
3.M1G3	136	3.M3	259
4.M1G3	126	1.M3G1	367
4.M1F1	34	2.M3G1	397
5.M1F1	47	3.M3G1	650
6.M1F1	37	1.M3G3	542
1.M1F2	93	2.M3G3	378
3.M1F2	108	3.M3G3	334

Taula 3 Mòdul de Young

Una propietat imprescindible per l'avaluació d'un element de construcció és l'elasticitat de la mostra, per això es necessita calcular el mòdul de Young un valor que relaciona la tensió resistida i la deformació de la proveta. Per calcular-ho s'ha necessitat la tensió resistida (Equació 1) i la deformació longitudinal (Equació 2) de la proveta, a la localització linear de la gràfica de tensió deformació (Gràfic 5).

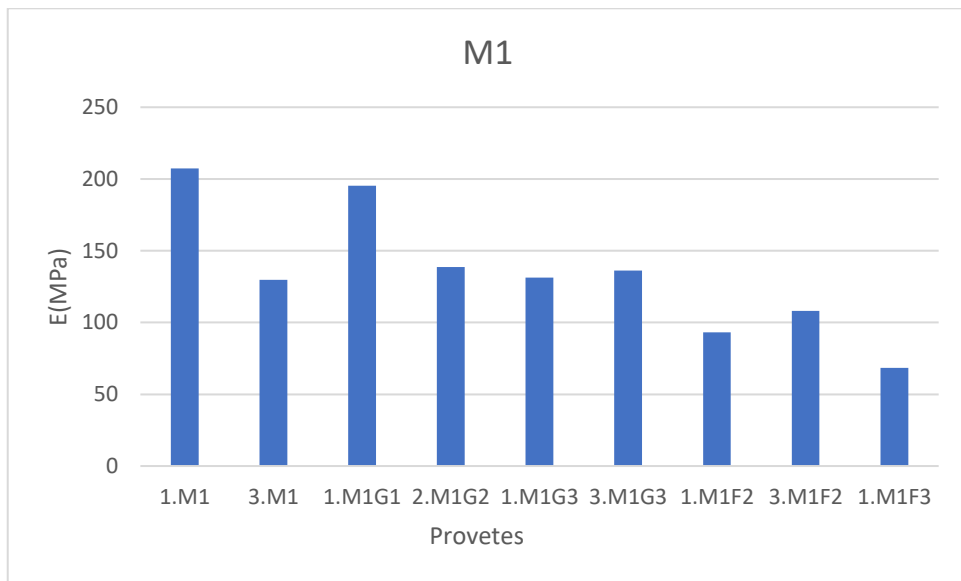
$$(Equació 1) \text{ Tensió} = \frac{\text{Força}}{\pi * \left(\frac{\text{Diametre}}{2}\right)^2}$$

$$(Equació 2) \text{ Deformació} = \frac{\text{Desplaçament assaig}}{\text{Altura proveta}}$$

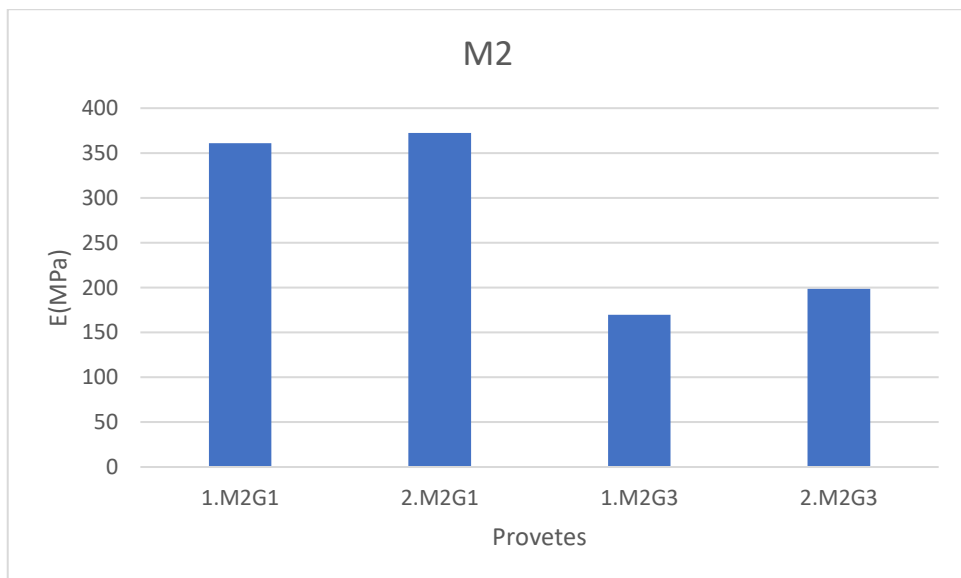


Gràfic 5 Tensió-Deformació proveta M1

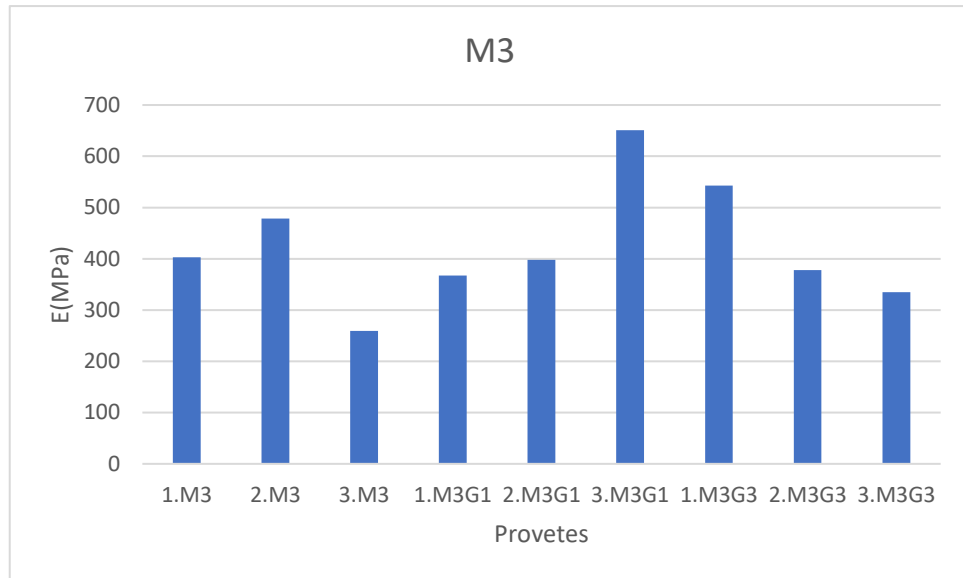
En aquest cas la evolució segons les fibres es molt semblant a la tensió de compressió, amb una tendència descendent en concentracions de morter de 20%(Gràfic 6) i 40%(Gràfic 7). En el cas de la concentració M3, podem definir que la canemuixa no millora les propietats elàstiques del material, però tampoc les perjudica(Gràfic 8).



Gràfic 6 Mòdul elàstic de les provetes M1



Gràfic 7 Mòdul elàstic de les provetes M2



Gràfic 8 Mòdul elàstic de les provetes M3

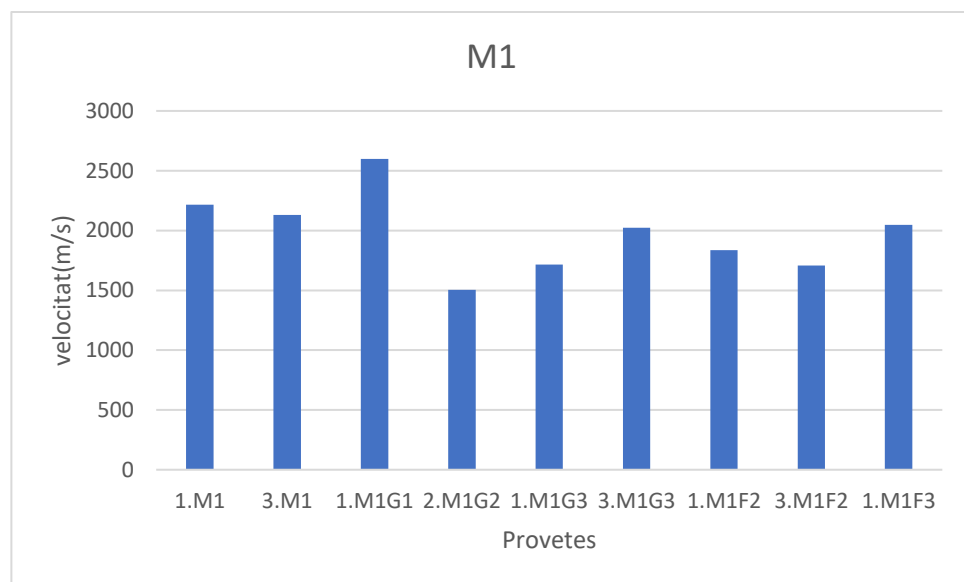
3.4 Humitat.

Provetes	Velocitat(m/s)	Provetes	Velocitat(m/s)
1.M1	2216	1.M1F3	2047
3.M1	2130	4.M1F3	1184
1.M1G1	2598	5.M1F3	1365
4.M1G1	1394	6.M1F3	1137
5.M1G1	1077	1.M2G1	2548
6.M1G1	1029	2.M2G1	2582
2.M1G2	1505	1.M2G3	2286
4.M1G2	1637	2.M2G3	2424
5.M1G2	1565	1.M3	2901
1.M1G3	1714	2.M3	2944
3.M1G3	2022	3.M3	3084
4.M1G3	2304	1.M3G1	3186
4.M1F1	1467	2.M3G1	3154
5.M1F1	1246	3.M3G1	3312
6.M1F1	1400	1.M3G3	2969
1.M1F2	1835	2.M3G3	3371
3.M1F2	1708	3.M3G3	3502

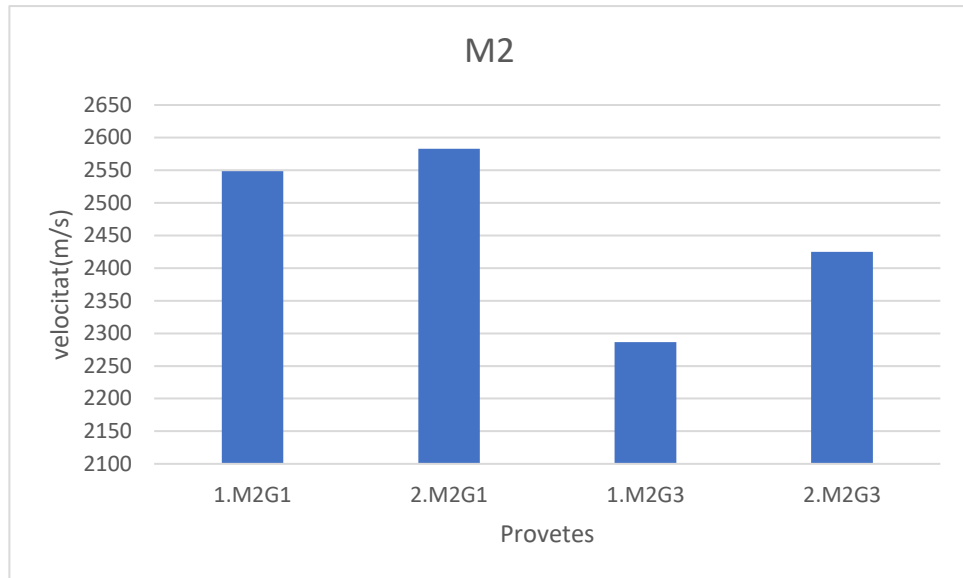
Taula 4 Mitjana de velocitat de propagació estabilitzada

La humitat es una propietat important en aquest estudi ja que la canemuixa destaca per les seves propietats aïllant i higromètriques . s. S'obté aquesta

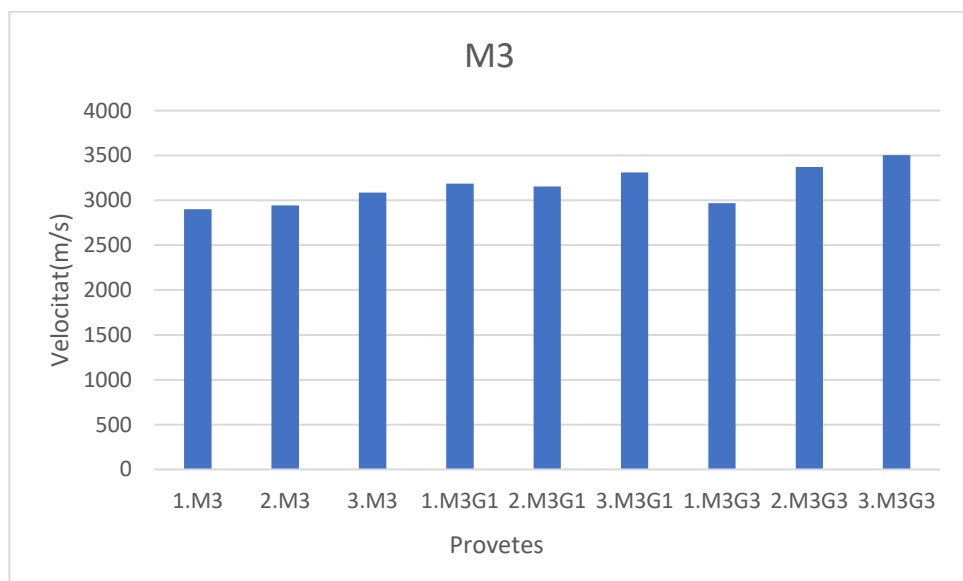
relació amb els segons que tarda en travessar la mostra els ultrasons, i utilitzant el diàmetre de la mostra per calcular la velocitat, la evolució de la qual es pot revisar al apartat 3 del annex. Les propietats han repetit el mateix esquema que les anteriors, en el cas de les concentracions de morter 1(Gràfic 10) i 2(Gràfic 11) la canemuixa afecta negativament a la velocitat de les mostres, disminuint la velocitat de propagació i en el cas de la tercera concentració de morter la canemuixa ha millorat aquesta propietat, encara que de manera molt lleugera(Gràfic 9). Per avaluar la humitat ens basem en l'estudi d'ultrasons mencionat anteriorment, en el qual s'especifica que quan la velocitat de propagació de les ones és superior a 1100 m/s, velocitat a partir de la qual s'arriba al equilibri d'humitat a la mostra, encara que en que totes arriben a l'equilibri d'humitat superant-la, en el cas de les fibres fines encara que la velocitat de propagació és la més baixa de totes, les mostres amb fibres de canemuixa fines arriben a l'equilibri d'humitat abans que les mostres amb canemuixa gruixuda.



Gràfic 9 Velocitat de propagació de les provetes M1



Gràfic 10 Velocitat de propagació de les provetes M2



Gràfic 11 Velocitat de propagació de les provetes M3

4 Conclusions

L'objectiu d'aquest estudi era la avaluació de com afecta la implantació de les fibres de cànem a la tàpia en quant algunes de les seves propietats mecàniques i les seves propietats higromètriques, degut a les propietats aïllants i d'impacte de carboni negatiu que té la canemuixa. L'estudi ampliaria el camp de coneixement i d'utilització de la terra compactada com material comercial de construcció, en un món on cada vegada més la sostenibilitat i el consum energètic són temes de molta rellevància.

L'estudi llavors valoraria l'impacte que les fibres de canemuixa produïen a les provetes de terra compactada. Els resultats en un principi han sigut els esperables, ja que com es menciona a l'Estat de l'Art, de forma generalitzada les fibres impacten de forma negativa a les propietats mecàniques de la tàpia, però proporcionant millores en les propietats aïllants i higromètriques.

Ha sigut en el cas de les provetes amb concentracions de 20% i 40% de morter, que propietats com l'esforç de compressió i l'elasticitat de les mostres han sigut perjudicades, per volums de morter del 20% la addició de un 5% de canemuixa gruixuda empitjora el rendiment un 23%, afegint 10% augmenta a un 28%, i en el volum màxim de canemuixa gruixuda el rendiment l'esforç de compressió arriba al 40%, i en el cas de la canemuixa gruixuda arriba a una reducció de més del 50%, una tendència que es repeteix a les dades sobre elasticitat, com en les provetes amb un 40% de morter, que segueixen aquesta tendència amb un petit alleugeriment, sofrint reduccions de l'ordre del 10-15% del rendiment. Creiem que aquest comportament es dona per la humitat, ja que la poca concentració de ciment de la mescla ha humidificat les fibres, reduint el seu rendiment, a més de creació de petites cavitats que redueixen el rendiment de les mostres.

Es en el cas de les provetes amb un 60% de morter que aquesta situació es reverteix. Amb l'addició de 5% de canemuixa augmentem el rendiment a compressió un 50%, i amb el 15% un 60%, en el cas de l'elasticitat la tendència també es ascendent però no tan pronunciat, amb una millora del 25% pel volum

petit de canemuixa, i un 40% per el major volum. En aquest cas, creiem que el morter a augmentat el seu rendiment al poder prendre la humitat que les fibres de canemuixa van absorbir al produir la proveta, de manera que alhora de necessitar més aigua per assecat-se, les fibres han sigut la solució per poder funcionar a ple rendiment, a més, al prendre la humitat de les fibres, aquestes han assecat i han millorat el seu rendiment.

En quant la humitat de les mostres i la velocitat de propagació, només les fibres fines de canemuixa han millorat la velocitat de propagació de les mostres, la addició de les fibres ha augmentat a casi la majoria dels casos la velocitat de propagació al doble del valor que les provetes amb la mateixa quantitat de morter i sense canemuixa fina, això es podria donar ja que la mida reduïda de aquestes fibres permet que ocupi el volum de la proveta omplint els buits dins de la mateixa que es formen en la producció. Hem de destacar que els resultats obtinguts mostren com aproximadament a partir de la setmana de producció les provetes arriben al equilibri d'humitat de forma molt pronunciada.

Recomanem doncs continuar l'estudi posant el focus en variar les fibres de canemuixa gruixudes i fines per tàpia amb una concentració del 60%, i posteriorment continuar amb l'estudi per la producció de provetes a grandària comercial i avaluar les seves propietats, veient el seu futur potencial, on es podrà mantenir i inclús millorar les propietats mecàniques de la tàpia afegint millores en propietats tèrmiques i higromètriques, i on es podrà considerar la canemuixa i la terra compacta part del futur de la construcció sostenible i accessible.