

Renforcement des maçonneries par TRM à base de fibres de lin : de la caractérisation au comportement structurel

Giuseppe FERRARA¹

¹ *Laboratoire des Matériaux Composites pour la Construction (LMC2), Université Claude Bernard Lyon 1, 82 bd Niels Bohr, Doua, 69622 Villeurbanne Cedex.*

RESUME L'utilisation de matériaux composites TRM (Textile Reinforced Mortar) représente aujourd'hui une technique innovante et efficace pour le renforcement des structures en maçonnerie. Au cours des dernières années, l'utilisation de fibres végétales dans le composite, en remplacement des fibres synthétiques à haute résistance, est apparu comme une solution efficace pour réduire l'impact environnemental du système de renforcement. Dans le but d'encourager l'utilisation de systèmes composites TRM à base de fibres naturelles, la présente recherche propose une étude de la caractérisation mécanique d'un système TRM à base de fibre lin pour le renforcement des maçonneries. En premier lieu, les caractéristiques physiques et mécaniques des éléments constitutifs du composite, c'est-à-dire le tissu et la matrice, ont été déterminées. Dans un second temps, le comportement en traction du système TRM et l'étude de l'adhérence avec le support de maçonnerie ont été étudiés. La troisième étape vise à caractériser, par des essais à l'échelle structurelle, la contribution du système de renforcement à la résistance au cisaillement de murs en maçonnerie. Finalement, des solutions innovantes visant à améliorer les performances du système de renforcement à l'étude ont été proposées. L'étude confirme le grand potentiel de l'utilisation des fibres végétales comme renforcement dans les composites TRM.

Mots-clefs TRM/FRCM, fibres naturelles, maçonnerie, résistance au cisaillement de murs en maçonnerie, systèmes composites durables.

I. INTRODUCTION

Des tremblements de terre fréquents associé à une présence massive de bâtiments vulnérables, font du bassin méditerranéen une zone à haute risque sismique qui nécessite des solutions urgentes visant à réduire à la fois les pertes de vies humaines et les endommagements des constructions (Ambraseys, 2009).

Dans les dernières années une croissante prise de conscience des problématiques de nature environnementale a eu lieu dans tous les domaines. Dans le secteur du génie civil ce tournant historique a mené à la naissance d'une nouvelle classe des matériaux de construction écologiques, qui respectent des critères à la fois de résistance mécanique et de durabilité (Ramesh et al., 2017).

Les matériaux composites à matrice inorganique (nommées Textile Reinforced Mortar, TRM), composés de tissu de fibres à haut résistance insérées dans des mortiers de nature cimentaires, représentent une valable technique de renforcement de structures en maçonnerie (Kouris et Triantafillou, 2018).

L'utilisation de tissu à base de fibres naturels pour la production de composites du type TRM, visé à combiner les aspects mécaniques et écologiques, a montré un important potentiel (Codispoti et al., 2015). Cependant, ça a aussi montré des enjeux qui entravent la diffusion de ces matériaux sur le marché. Par conséquent, il est nécessaire d'intensifier la recherche dans ce domaine à fin d'améliorer l'efficacité des systèmes composites TRM à base de fibres naturelles en conformité à les performances requis dans les applications structurales.

L'étude vis à fournir une caractérisation globale d'un système composite innovant du type TRM réalisé par l'utilisation de tissu naturelle en lin (Flax TRM) afin de définir le comportement mécanique du matériel, son efficacité, et les limitations qu'il présente pour les applications dans les systèmes structurelles en maçonnerie. En outre, des techniques innovantes visés à améliorer le système composite, et donc surmonter ces limites, sont aussi pris en compte.

II. Programme expérimental

Le système composite Flax TRM étudié dans la thèse est caractérisé par une matrice à base de chaux hydraulique et par un tissu de renforce en lin (Figure 1 a). Afin d'obtenir une caractérisation globale du comportement mécanique du système composite, un large programme expérimental a été prévu à différentes échelles d'analyse. Celui comprend la caractérisation du tissu de renforce, du composite Flax TRM, des murs en maçonnerie renforcé par le système Flax TRM, des systèmes Flax TRM améliorés grâce à l'utilisation de techniques innovantes. La caractérisation du système composite a été menée conformément aux normes et directives dans le domaine afin de mettre en évidence à la fois l'efficacité et les limites du système de renforcement pour les maçonneries.



FIGURE 1. (a) Tissu en lin utilisé dans la recherche.

Le programme expérimental s'articule en trois parties principales :

- Caractérisation mécanique du composite : cette partie comprend des tests de traction sur le tissu en lin ; des tests de traction sur le composite Flax TRM conformément

aux directives RILEM (RILEM TC, 2016) ; des tests d'adhérence entre le composite Flax TRM et le substrat en maçonnerie conformément aux directives RILEM (de Felice et al., 2018) ; des tests de vieillissement du composite Flax TRM conformément à la norme de compétence (AC 434-1011-R1, 2018).

- Essais mécaniques à l'échelle structurelle : cette partie comprend des essais de compression diagonal effectués sur des éléments en maçonnerie sans le renforcement et sur des éléments en maçonnerie renforcés par le système composite Flax TRM conformément à la norme ASTM E519-2, 2003.
- Etude expérimental de techniques innovantes amélioratives : cette partie comprend des essais de traction mènes sur des systèmes composites hybrides Flax TRM fabriqués en utilisant du tissu de lin imprégné et des fibres courtes en curaua.

III. Résultats

L'étude préliminaire du comportement mécanique du tissu a confirmé que les fibres de lin, avec des discrets propriétés de résistance, peuvent être utilisé comme renforcement dans les systèmes composites du type TRM. Les propriétés mécaniques du tissu de lin sont incluses dans le Tableau 1.

TABLEAU 1. Propriétés physiques et mécaniques du tissu en lin adopté.

Propriété	Unité de mesure	Valeur moyenne	Coefficient de variation [%]
Diamètre du filament	[μm]	16.78	30
Masse volumique	[g/cm^3]	1.19	3
Densité linéaire	[Tex]	302	15
n° de fils /cm	[fils/cm]	4.3	-
Section du fil	[mm^2]	0.25	17
Module de Young du fil	[GPa]	9.4	11
Déformation à rupture	[%]	3.9	13
Résistance	[MPa]	353.7	12

Les essais de traction menés sur le composite Flax TRM ont montrés une réponse caractérisée par un comportement trilineaire qui diffère du comportement des systèmes TRM conventionnels en présentant des importantes chutes de charge en correspondance de l'ouverture d'une fissure (Figure 2, courbe 1). Ce comportement peut être attribué à une inférieure rigidité initiale du tissu en fibre naturel une fois soumis à la traction. Cependant, les éprouvettes ont montré un comportement prometteur avec un taux d'utilise de la résistance maximale à traction du tissu d'environ le 70 %.

La caractérisation expérimentale de la résistance au vieillissement du composite du type Flax TRM montre que le système, exposé à des protocoles de vieillissement conventionnelles, respects le critères d'acceptabilité proposé par la norme de référence.

La caractérisation à l'échelle globale de murs en maçonnerie renforcés par le composite du type Flax TRM a montré que le système de renforcement influence la réponse mécanique des éléments

structurelles soumis à la compression diagonale. Les courbes contrainte de cisaillement-déformation, définies en accord avec la norme (ASTM E519-2, 2003), et concernant les murs sans le renforcement et avec le renforcement du type Flax TRM, sont montré en Figure 3. Le composite confère une augmentation de la résistance maximale de cisaillement et une ductilité complètement absente dans les éléments sans le renforcement. Le mode de ruine concernant les murs renforcés, montré en Figure 4, met en évidence que la présence du renforcement garantit une intégrité du système aussi dans la phase post-rupture.

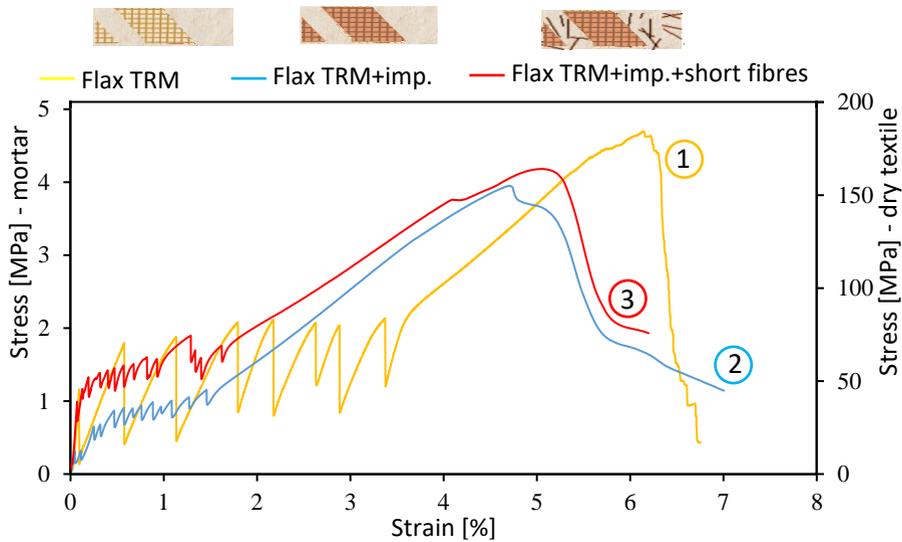
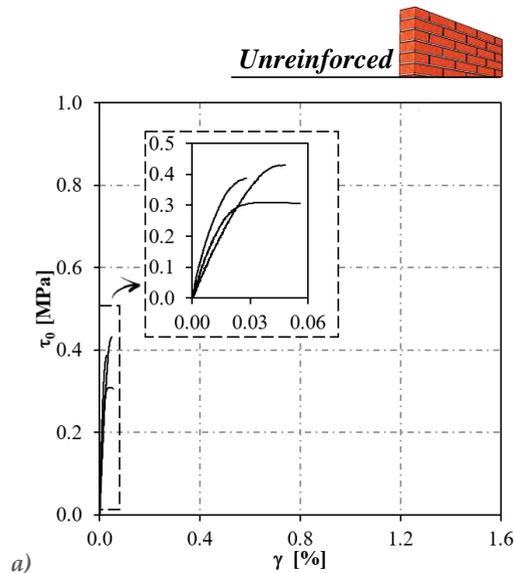


FIGURE 2. Courbes contrainte-déformation concernant les essais de traction des éprouvettes : (1) Flax TRM ; (2) Flax TRM avec tissu imprégné ; (3) Flax TRM avec tissu imprégné et fibres courtes de curaua.



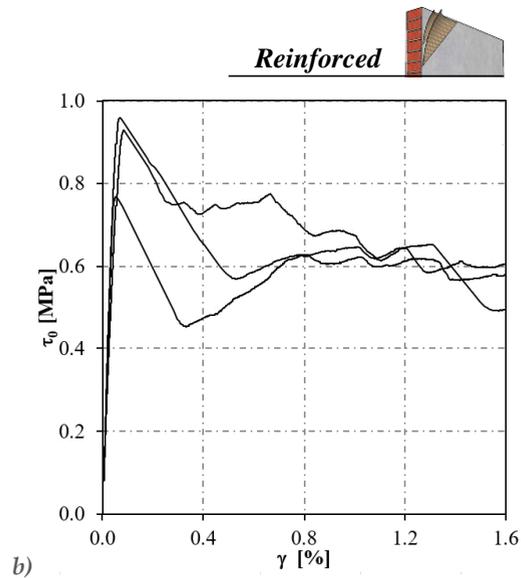


FIGURE 3. Courbes contrainte de cisaillement-déformation concernant les essais de compression diagonale des murs en maçonnerie : (a) sans le renforcement ; (b) renforcés par le système composite du type Flax TRM.

En outre, les courbes concernant les essais caractérisés par le système de renforcement (Figure 3 b), montrent une importante chute de résistance en correspondance de la charge maximale, lors que la fissuration de la matrice du composite a lieu. Ce comportement est attribué à une forte déformabilité du tissu de lin en correspondance de petites déformations.



FIGURE 4. Mode de ruine des murs en maçonnerie renforcé par le system composite Flax TRM.

L'utilisation d'une technique d'imprégnation du tissu en lin a mené à un amélioration de la réponse mécanique du système composite. En fait, même si caractérisé par une résistance à traction légèrement inférieure, les éprouvettes du type Flax TRM avec imprégnation montrent une phase de fissuration avec une évidente réduction dans la chute de résistance en correspondance de l'ouverture des fissures, par rapport au système composite de référence Flx TRM (Figure 2, courbe 2). En outre, la présence de l'imprégnation mène à une réduction considérable de la déformabilité du système, avec des valeurs de déformation correspondants à la fin de la phase de fissuration, environ de la moitié par rapport au comportement de référence.

Le système composite Hybride Flax TRM, caractérisé par un tissu en lin imprégné et des fibres courtes en curaua dans la matrice, a mené à des ultérieures améliorations du comportement mécanique avec une augmentation de la valeur moyenne de la charge dans la phase de fissuration (Figure 2, courbe 3). En outre, le système composite Hybrid Flax TRM a développé un cadre de fissuration plus dense par rapport à celui montré par le système de référence, et avec une ouverture moyenne des fissures plus faible (Figure 5a et 5b).

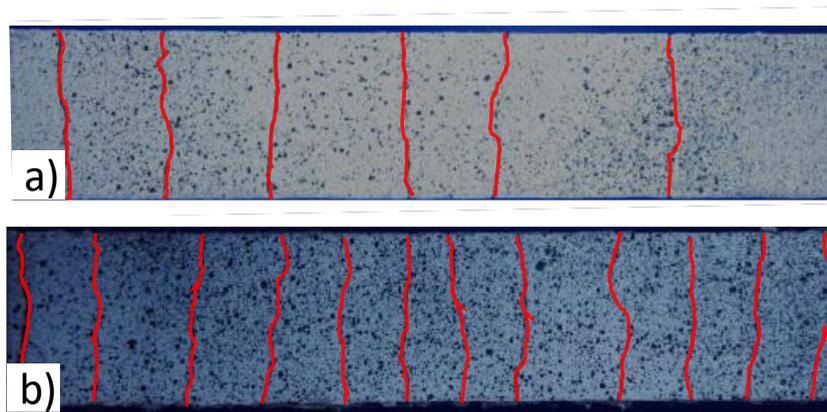


FIGURE 5. (a) Mode de ruine en traction du composite Flax TRM ; (b) Mode de ruine en traction du composite hybride Flax TRM ;

IV. Conclusions

L'étude, avec un grand nombre de résultats expérimentaux, contribue à enrichir les connaissances scientifiques concernant l'utilisation de fibres naturelles dans les composites du type TRM. En outre, il ouvre la voie à des ultérieures recherches finalisées à une amélioration du comportement mécanique du composite TRM écologique.

Les principales conclusions de la recherche sont résumées comme suit :

- Le système composite du type Flax TRM a montré un comportement mécanique prometteur en ligne avec la réponse typique des composites TRM conventionnel, mais avec des importantes déformations ;
- L'utilisation du système composite Flax TRM comme renforcement de maçonneries a mené à une importante augmentation de la résistance au cisaillement des éléments structurels ;

- L'imprégnation du tissu en lin et l'utilisation de fibres courtes de curaua dans la matrice se sont montrés comme des solutions efficaces pour améliorer la réponse mécanique du système composite, en réduisant l'écart avec les systèmes composites TRM conventionnels.

V. Perspectives

L'étude, en confirmant la possibilité de réduire l'impact environnemental des systèmes composites du type TRM grâce à l'utilisation de tissus naturels, ouvre la voie à des études futures finalisées à : la définition de techniques efficaces d'amélioration du système à travers des traitements physiques et/ou chimiques du tissu ; des analyses détaillées sur le comportement au vieillissement des systèmes TRM caractérisés par des tissus naturels ; l'individuation de concrètes applications de ces systèmes composites, en fonction de ses propriétés mécaniques, comme renforcement d'éléments structurels ou d'éléments de seconde importance.

REFERENCES

N. Ambraseys (2009). *Earthquakes in the Mediterranean and Middle East: A Multidisciplinary Study of Seismicity up to 1900*. Cambridge University Press.

M. Ramesh, K. Palanikumar, & K.H. Reddy (2017). Plant fibre based bio-composites: Sustainable and renewable green materials. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 79, 558–584. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.094>

L.A.S. Kouris, & T.C. Triantafyllou (2018). State-of-the-art on strengthening of masonry structures with textile reinforced mortar (TRM). *Construction and Building Materials*, 188, 1221–1233. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.039>

R. Codispoti, D.V. Oliveira, R.S. Olivito, P.B. Lourenço, & R. Figueiro (2015). Mechanical performance of natural fiber-reinforced composites for the strengthening of masonry. *Composites Part B-Engineering*, 77, 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.021>

RILEM Technical Committee 232-TDT (2016). Recommendation of RILEM TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete. *Materials & Structures*, 49(12), 4923–4927. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0839-z>

G. de Felice, et al. (2018). Recommendation of RILEM TC 250-CSM: Test method for Textile Reinforced Mortar to substrate bond characterization. *Materials & Structures*, 51(4), 95. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1216-x>

AC 434-1011-R1: Acceptance Criteria for Masonry and Concrete Strengthening using Fiber-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composite Systems, ICC Evaluation Service, LLC: Birmingham, AL, USA (2018).

ASTM E519-2: 2003. (2003). Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages. *ASTM Committee C15 on Manufactured Masonry Units*, West Conshohocken, PA, United States.