

Résistivité électrique spectrale de BTC non stabilisés à base de sédiments de dragage - effet de la contrainte de compaction

Sarah NASSAR¹, Zoubir Mehdi SBARTAÏ¹, Jacqueline SALIBA², Nadia SAIYOURI¹

¹ Université de Bordeaux, UMR 5295, Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), CNRS, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence, France

² College of Engineering and Technology, American University of the Middle East, Egaila, 54200, Kuwait

RESUME Dans l'optique d'une construction plus écologique, les blocs de terre comprimée (BTC) sont de plus en plus recherchés. Ils assurent une économie d'énergie et présentent des avantages par rapport aux autres éléments de maçonnerie (matériaux naturels, réutilisables, etc.). Dans cette étude, des BTC sont fabriqués à base de sédiments de dragage afin d'investiguer la possibilité de leur valorisation dans le domaine des matériaux de construction. Une évaluation non destructive des BTC permet de retrouver de manière qualitative les caractéristiques des blocs sans les endommager. Cette approche peut également être utilisée de manière corrélative afin d'inférer d'autres caractéristiques physiques. La résistivité électrique spectrale des BTC non stabilisés fabriqués à différentes pressions de compactage est mesurée. Le suivi temporel montre l'impact du degré de saturation des blocs sur les mesures. Plusieurs paramètres comme la contrainte de compaction, le séchage et la fréquence du signal peuvent influencer les résultats et des précautions doivent être prises pour éviter toute perturbation due au montage et aux conditions de l'essai.

Mots-clefs bloc de terre comprimée, sédiments, résistivité électrique

I. INTRODUCTION

Le secteur de la construction cherche de plus en plus à réduire l'impact environnemental des matériaux conventionnels et à considérer des solutions alternatives plus écologiques. Les constructions en terre existent depuis plusieurs années mais ont récemment gagné de l'intérêt grâce à leurs nombreux avantages. Entre autres, les blocs de terre comprimée (BTC) sont des éléments de maçonnerie à base de terre. La maçonnerie est couramment utilisée dans la construction (Sathiparan et al., 2023) et pourrait être en pierre, en briques cuites, en blocs de ciment, etc. Les BTC sont des briques crues à base de terre, ne nécessitant pas d'énergie de fabrication importante telle que celle consommée pour la cuisson à haute température, allant jusqu'à 1000°C (Adazabra et al., 2023), des briques cuites ou celle due à la fabrication du ciment (Nhuchhen et al., 2021). En outre, les BTC assurent un confort thermique à l'habitation et absorbent dix fois plus d'humidité que les briques cuites, permettant ainsi une économie d'énergie (Pacheco-Torgal and Jalali, 2012). Les BTC sont un mélange de terre et d'eau compacté et pouvant contenir des stabilisants. Quant au compactage, il peut être dynamique ou statique et la pression peut avoir une influence sur la performance du bloc.

Taallah et al. (Taallah et al., 2014) ont trouvé une meilleure résistance à la compression pour une augmentation de la pression de compactage. D'autre part, la terre utilisée dans la fabrication des blocs pourrait être une terre locale ou même des sédiments dragués ou une combinaison des deux. Serbah et al. (Serbah et al., 2018) ont réutilisé des sédiments d'un barrage en Algérie, mélangés avec du sable naturel, pour la fabrication de BTC. Mymrin et al. (Mymrin et al., 2017) ont valorisé des sédiments portuaires au Brésil et Larbi et al. (Larbi et al., 2021) des sédiments portuaires en Algérie pour confectionner des BTC. En effet, pour maintenir l'activité des ports, des opérations de dragage sont nécessaires et produisent de grandes quantités de sédiments. En France, avec l'évolution de la réglementation sur le dragage, des voies de réutilisation doivent être prêtes pour que les sédiments soient considérés comme une ressource pour les constructions en terre (Hamer and Karius, 2002).

La caractérisation des BTC consiste à investiguer les propriétés mécaniques et hygrothermiques et la durabilité qui s'avèrent des paramètres clés pour l'usage d'un matériau en construction. Ces essais consistent à imposer des contraintes jusqu'à la rupture ou des expositions à des conditions sévères ou pour de longues durées. En revanche, les résultats des essais non destructifs peuvent être des indicateurs rapides de la qualité des blocs sans les endommager. Teixeira et al. (Teixeira et al., 2020) ont caractérisé leur BTC par des essais de Résistivité Electrique (RE) et de vitesse d'impulsion ultrasonique (UPV) et ont trouvé des résultats cohérents avec l'essai d'absorption capillaire qui révèle la porosité du matériau. En effet, ces deux essais non destructifs donnent une idée sur la porosité, l'humidité du matériau voire son état d'endommagement (fissuration). De même, Raavi et Tripura (Raavi and Tripura, 2021) ont trouvé une bonne corrélation entre la résistance à la compression et les résultats de l'UPV qu'ils trouvent utile pour la prédiction de la résistance de leurs blocs en pisé. Sathiparan et al. (Sathiparan et al., 2023) ont fait une revue bibliographique sur les corrélations de RE et UPV avec la résistance à la compression du béton et proposent des modèles empiriques pour les BTC stabilisés avec du ciment. Ils confirment de même l'efficacité de ces méthodes pour l'évaluation qualitative de la performance des blocs.

Dans cet article, des blocs de terre comprimée fabriqués à base de sédiments de dragage sont caractérisés de manière non destructive par l'essai RE spectral (balayage en fréquences). En particulier, l'effet de la pression de compactage de blocs non stabilisés est étudié. Les mesures sont réalisées le jour de fabrication des blocs avec un suivi de l'évolution de la RE avec le temps.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Blocs de terre comprimée

Les blocs de terre comprimée sont à base de sédiments de dragage prélevés du port d'Audenge situé sur le bassin d'Arcachon au sud-ouest de la France. Le tableau 1 présente les caractéristiques granulométriques et limites d'Atterberg du sol investiguées au laboratoire (Nassar et al., 2023).

Des blocs cubiques de 10 cm de côté sont fabriqués à l'aide d'une presse hydraulique assurant un compactage statique. Une teneur en eau de 18% est trouvée optimale pour correspondre à une densité maximale du bloc. Des blocs non stabilisés de pressions de compactage de 2, 6 et 10 MPa sont fabriqués. Trois éprouvettes de chaque pression sont confectionnées. Les blocs sont conservés dans une salle conditionnée à une température de 20°C et une humidité relative de 50%. Le tableau 2 montre des propriétés des BTC fabriqués.

TABLEAU 1. Caractéristiques des sédiments

Caractéristiques	Propriétés	Sédiments d'Audenge
Granulométrie (NF EN ISO 17892-4)	Gravier (%)	2,7
	Sable (%)	50,9
	Limon (%)	23,2
	Argile (%)	23,2
Limites d'Atterberg (NF EN ISO 17892-12)	Limite de liquidité (%)	36
	Limite de plasticité (%)	26
Argilosité	Indice de plasticité (%) (NF EN ISO 17892-12)	10
	Valeur de bleu de méthylène VBS (g/100g sol) (NF EN 17542-3)	2,6

TABLEAU 2. Propriétés des BTC non stabilisés

Pression de compactage	Masse volumique sèche (g/cm ³)	Résistance à la compression moyenne (MPa)
2 MPa	1,6	1,7
6 MPa	1,7	3,0
10 MPa	1,8	3,3

B. Résistivité électrique

La résistivité électrique, notée (ρ), est mesurée à l'aide d'un analyseur d'impédance de fréquence variable de quelques Hz à 5 MHz. Elle est évaluée pour les BTC dès leur fabrication et son évolution avec le temps est étudiée. Il s'agit de mesurer la résistance électrique du matériau au passage d'un courant alternatif (R) pour une fréquence (f) et de calculer la résistivité à une fréquence selon l'équation (1) où A est l'aire de la section du matériau et L est sa longueur séparant les deux plaques de mesure qui représentent des électrodes. La résistivité est exprimée en [$\Omega \cdot m$].

$$\rho(f) = \frac{R(f) \times A}{L} \quad (1)$$

Le principe de mesure de la résistance est d'appliquer une tension sinusoïdale et de mesurer l'intensité du courant qui en résulte. La réponse de l'échantillon à différentes fréquences est étudiée, allant de 10 kHz jusqu'à 5 MHz. En effet, la fréquence du signal a une influence significative sur les mesures (Cosoli et al., 2020).

La méthode de mesure choisie est uniaxiale et le montage est montré dans la figure 1. Elle est effectuée dans la direction perpendiculaire à celle du compactage. Le bloc est placé entre deux plaques métalliques assurant le passage du courant et couvertes d'en haut et d'en bas par des pièces en bois. Une éponge humide, ayant une épaisseur de quelques millimètres, est placée entre l'échantillon et la plaque (Ghosh and Tran, 2015; Hou et al., 2017) avec une pression extérieure imposée pour assurer un bon contact avec les plaques. Comme la pression de serrage du montage pourrait affecter les mesures (Newlands et al., 2008), une masse fixe de 3kg est placée sur le haut pour une meilleure répétabilité.

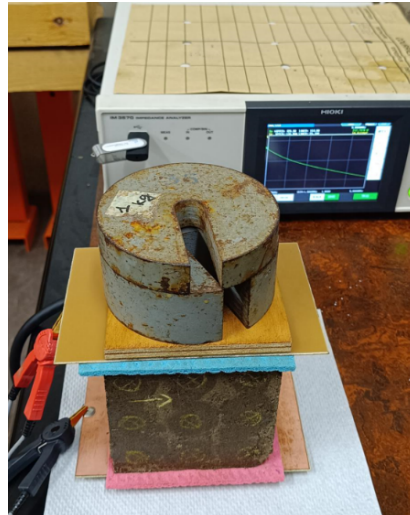


FIGURE 1. Montage de mesure

Des fréquences supérieures à 1 kHz sont recommandées (Cosoli et al., 2020; Hou et al., 2017) pour éviter l'effet d'alignement des dipôles, notamment dans le cas de matériaux anisotropes. Ajoutons que le choix de la fréquence devrait aussi être adapté à l'échantillon et sa composition. Par exemple, la conductivité des fibres de fer est visible pour des hautes fréquences (Berrocal et al., 2018). A noter que des fréquences ne dépassant pas des centaines de mégahertz sont conseillées pour empêcher des phénomènes indésirables de perturbations et de tensions de mode parasite (Cosoli et al., 2020).

Il est important de mentionner que les valeurs de résistance sont largement dépendants de la température et de l'humidité relative (Su et al., 2022). En effet, l'augmentation de l'humidité engendre plus d'eau dans le matériau ce qui facilite le passage du courant. Quant à la température, son augmentation favorise le déplacement des ions chargés et par conséquent réduit la résistivité du matériau. Afin de minimiser ces effets externes et d'éviter leurs fluctuations, les mesures sont réalisées dans la salle de conservation des éprouvettes (température de 20°C et humidité relative de 50%).

III. RESULTATS

Les résultats de résistivité sont présentés dans la figure 2 où trois fréquences du signal électrique sont retenues pour comparaison : 10 kHz, 2 MHz et 5 MHz.

La figure 2a présente les résistivités des BTC le jour même de leur fabrication. On remarque que l'augmentation de la pression de compactage entraîne une augmentation de la résistivité pour chacune des fréquences présentées. Une meilleure résistivité révèle un matériau plus dense avec une porosité moins importante. En effet, pour un même volume final, la masse de terre compactée par des pressions plus importantes sera plus grande. De plus, le bloc étant humide le jour de fabrication, la présence de l'eau dans les porosités facilitera le passage du courant.

D'autre part, après 10 jours de conservation des éprouvettes, les mesures montrent des tendances assez différentes, comme présenté dans la figure 2b. On se rend compte qu'avec une pression de

compactage plus importante, la résistivité est de moins en moins importante, ce qui est exactement l'inverse de ce qui a été trouvé au départ.

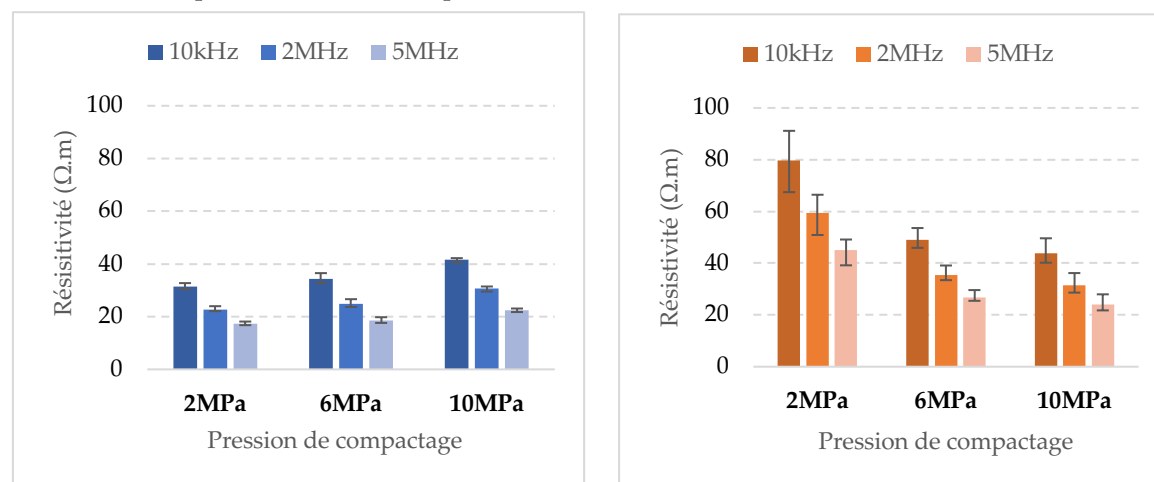


FIGURE 2. Résistivité des BTC a) le jour de leur fabrication et b) 10 jours après fabrication

En effet, pendant ces 10 jours, les éprouvettes ont séché et ont donc perdu une quantité d'eau interstitielle qui comblait la porosité, en plus des fissurations qui se forment. Concrètement, les blocs ont connu une perte de leur masse. L'eau qui était un bon conducteur s'est partiellement ou complètement évaporée et le matériau présente une résistivité plus élevée. Les blocs à faible compactage présentent une porosité plus importante et par suite la perte d'eau a affecté leurs propriétés de manière plus importante. Ceci explique le fait que la résistivité des blocs compactés à 2 MPa a largement augmenté, passant de 17 $\Omega.m$ pour la fréquence de 5 MHz à 45 $\Omega.m$ après 10 jours, soit environ 2.5 fois la valeur de départ. Ceux compactés à 6 MPa sont passés de 19 à 27 $\Omega.m$, soit une augmentation de 1.4 fois. Alors que les blocs ayant une pression de compactage de 10 MPa ont connu une augmentation de 22 à 24 $\Omega.m$.

La porosité des blocs est aussi montrée par les valeurs de masse volumique et résistance à la compression montrées dans le tableau 2. Ces valeurs sont corrélées étant donné que la présence d'une plus grande porosité entraîne plus de vides dans le bloc qui sera alors moins dense et par la suite moins résistant. D'après le tableau 2, les blocs compactés à 2 MPa sont moins denses et moins résistants que ceux compactés à 10 MPa, révélant ainsi une porosité plus importante.

L'évolution de la résistivité est suivie pendant dix jours et la figure 3 montre les résultats pour une fréquence du signal de 5 MHz. Les allures des courbes sont les mêmes pour toutes les fréquences avec une différence de valeurs comme montré dans la figure 2. La perte de masse progressive des blocs par séchage se traduit par une évolution de leur conductivité électrique petit à petit au cours du temps comme dans la figure 3 pour chacune des pressions de compactage. En effet, comme ces blocs ne sont pas stabilisés, il n'y a pas de réaction chimique en cours comme la réaction d'hydratation du ciment (Sathiparan et al., 2023) ou autres. Les valeurs de résistivité globale obtenues varient entre 20 et 45 $\Omega.m$. Typiquement, pour un béton, les valeurs varient entre 10 $\Omega.m$ s'il est saturé et arrive jusqu'à 10^6 $\Omega.m$ quand il est sec (Azarsa and Gupta, 2017). Palacky (Palacky, 1988) présente les résistivités de plusieurs couches géologiques et montre une résistivité comprise entre 10 et 100 $\Omega.m$ pour les argiles et qui augmentent de plus en plus avec le sol grossier. Hou et

al. (Hou et al., 2017) ont étudié l'effet de la taille d'agrégats dans son béton sur la résistivité. Pour un mortier, une résistivité de 33 $\Omega.m$ est obtenue et augmente à 49 $\Omega.m$ avec 30% d'agrégats.

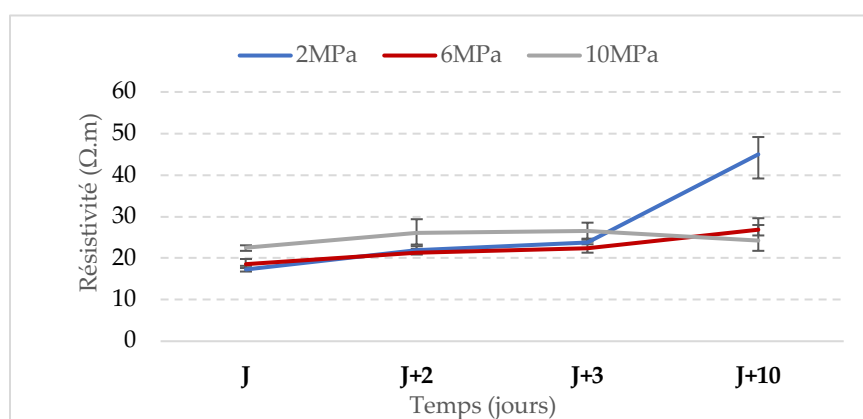


FIGURE 3. Evolution de la résistivité des blocs au cours du temps pour une fréquence de 5 MHz

D'autre part, s'agissant de blocs de terre, il faut être vigilant quant à la comparaison des valeurs à d'autres sols. En effet, en plus des paramètres déjà mentionnés, la résistance est aussi fonction de la taille des particules et de la fraction argileuse du sol. Sathiparan et al. (Sathiparan et al., 2023) ont testé trois types de sol et ont trouvé une résistivité moins importante pour le sol comportant le plus de particules fines. Etant à base de sédiments marins, la composition des blocs étudiés est alors encore plus complexe. La présence de sels qui constituent une force ionique dans ces sols affecte la résistivité (Tang et al., 2018). De plus, les sédiments peuvent contenir des traces de métaux pouvant également influencer cette résistivité de manière plus limitée. Des essais de caractérisation minéralogique (spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS) et diffraction de rayons X (DRX)) sur les sédiments de cette étude ont confirmé la présence d'une variété de minéraux argileux comme la smectite et la muscovite et des ions comme le calcium, le sodium et le potassium (Nassar et al., 2023). En effet, la matrice argileuse a un impact important sur la résistivité du fait des charges électriques naturellement présentes à la surface des feuillets argileux en plus de leurs très petites dimensions qui affecte la taille des pores. Toutefois, il ne faut pas oublier l'importance de l'effet de la distribution de la porosité, des connections entre les pores et de la tortuosité (Tang et al., 2018). Il serait aussi intéressant d'effectuer les mesures dans la direction de compactage (Teixeira et al., 2020) afin d'inspecter le caractère isotrope du bloc.

Concernant l'effet de la fréquence du signal qui a visiblement impacté les valeurs de la résistivité. Prenons l'exemple des mesures le jour de fabrication, montré dans la figure 4. La résistivité obtenue pour les faibles fréquences est plus importante d'environ 1,8 fois que la résistivité de la fréquence maximale (5 MHz) étudiée dans le cadre de ces essais. Ceci est observé pour les trois pressions de compactage et pour toutes les mesures sur les dix jours de séchage. On pourrait dire que les résultats sont surestimés suite à une polarisation au niveau des interfaces. Une accumulation de charges peut se produire à l'interface entre les plaques et l'échantillon ce qui pourrait affecter les mesures et les surestimer. Pour éviter ces influences, la méthode de mesure par sonde quatre

pointes pourrait être envisagée en perspectives (Cosoli et al., 2020) pour minimiser les erreurs liées au contact électrique.

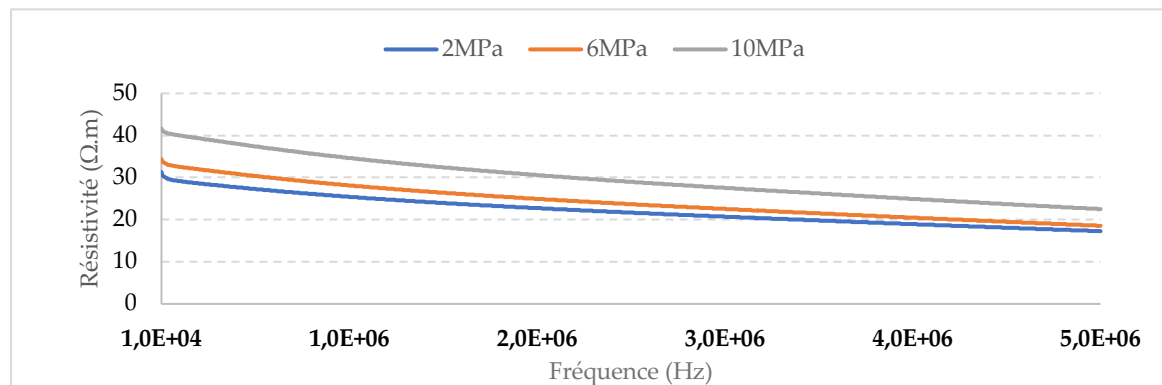


FIGURE 4. Variation de la résistivité des blocs le jour de fabrication en fonction de la fréquence

IV. CONCLUSION

En conclusion, la résistivité électrique d'un matériau est une mesure non destructive qui permet de révéler plusieurs caractéristiques mais aussi de les corrélérer à d'autres propriétés du matériau notamment de durabilité (exemple porosité) et de résistance mécanique. Il existe plusieurs configurations de mesure qu'il faut adapter au matériau étudié. La résistivité permet d'évaluer qualitativement la minéralogie, la porosité, la teneur en eau, voire l'état de fissuration du matériau, etc. Toutefois, elle peut être affectée par des paramètres externes comme la température, l'humidité relative et des incertitudes de mesure. Dans cet article, la résistivité électrique des BTC est étudiée et les effets de la pression de compactage, du séchage et de la fréquence du signal sont discutés. Une pression de compactage importante résulte en des blocs présentant une meilleure résistivité à l'état saturé. En revanche, dans des conditions sèches, on observe l'effet inverse. La fréquence du signal influence également les mesures, avec une possible surestimation des résistivités due à l'accumulation de charges à l'interface de mesure.

Une évaluation de la résistivité dans la direction de compactage pourrait aussi être intéressante et servir de comparaison. Dans la suite des travaux, une prospection aux ultrasons sera également étudiée et une corrélation avec les résultats de porosité au mercure ainsi qu'avec ceux de l'absorption capillaire et de la résistance à la compression sera réalisée.

REFERENCES

- Adazabra, A.N., Viruthagiri, G., Foli, B.Y., 2023. Evaluating the technological properties of fired clay bricks incorporated with palm kernel shell. *J. Build. Eng.* 72, 106673. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106673>
- Azarsa, P., Gupta, R., 2017. Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2017, e8453095. <https://doi.org/10.1155/2017/8453095>

- Berrocal, C.G., Hornbostel, K., Geiker, M.R., Löfgren, I., Lundgren, K., Bekas, D.G., 2018. Electrical resistivity measurements in steel fibre reinforced cementitious materials. *Cem. Concr. Compos.* 89, 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.015>
- Cosoli, G., Mobili, A., Tittarelli, F., Revel, G.M., Chiariotti, P., 2020. Electrical Resistivity and Electrical Impedance Measurement in Mortar and Concrete Elements: A Systematic Review. *Appl. Sci.* 10, 9152. <https://doi.org/10.3390/app10249152>
- Ghosh, P., Tran, Q., 2015. Influence of parameters on surface resistivity of concrete. *Cem. Concr. Compos.* 62, 134–145. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.06.003>
- Hamer, K., Karius, V., 2002. Brick production with dredged harbour sediments. An industrial-scale experiment. *Waste Manag.* 22, 521–530. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(01\)00048-4](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(01)00048-4)
- Hou, T.-C., Nguyen, V.K., Su, Y.-M., Chen, Y.-R., Chen, P.-J., 2017. Effects of coarse aggregates on the electrical resistivity of Portland cement concrete. *Constr. Build. Mater.* 133, 397–408. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.044>
- Larbi, S., Khaldi, A., Maherzi, W., Abriak, N.-E., 2021. Formulation of Compressed Earth Blocks Stabilized by Glass Waste Activated with NaOH Solution. *Sustainability* 14, 102. <https://doi.org/10.3390/su14010102>
- Mymrin, V., Stella, J.C., Scremin, C.B., Pan, R.C.Y., Sanches, F.G., Alekseev, K., Pedroso, D.E., Molinetti, A., Fortini, O.M., 2017. Utilization of sediments dredged from marine ports as a principal component of composite material. *J. Clean. Prod.* 142, 4041–4049. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.035>
- Nassar, S., Saliba, J., Saiyouri, N., 2023. Investigation of the possible valorization of dredged sediments in compressed earth blocks. *Mater. Today Proc.* <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.164>
- Newlands, M.D., Jones, M.R., Kandasami, S., Harrison, T.A., 2008. Sensitivity of electrode contact solutions and contact pressure in assessing electrical resistivity of concrete. *Mater. Struct.* 41, 621–632. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9257-6>
- NF EN 17542-3, 2022.
- NF EN ISO 17892-4, 2018.
- NF EN ISO 17892-12, 2018.
- Nhuchhen, D.R., Sit, S.P., Layzell, D.B., 2021. Alternative fuels co-fired with natural gas in the pre-calciner of a cement plant: Energy and material flows. *Fuel* 295, 120544. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120544>
- Pacheco-Torgal, F., Jalali, S., 2012. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Constr. Build. Mater.* 29, 512–519. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>
- Palacky, G.J., 1988. Resistivity characteristics of geologic targets. *Electromagn. Methods Appl. Geophys.* 1, 52–129.
- Raavi, S.S.D., Tripura, D.D., 2021. Ultrasonic pulse velocity and statistical analysis for predicting and evaluating the properties of rammed earth with natural and brick aggregates. *Constr. Build. Mater.* 298, 123840. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123840>
- Sathiparan, N., Jayasundara, W.G.B.S., Samarakoon, K.S.D., Banujan, B., 2023. Prediction of characteristics of cement stabilized earth blocks using non-destructive testing: Ultrasonic pulse velocity and electrical resistivity. *Materialia* 29, 101794. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2023.101794>

- Serbah, B., Abou-Bekr, N., Bouchemella, S., Eid, J., Taibi, S., 2018. Dredged sediments valorisation in compressed earth blocks: Suction and water content effect on their mechanical properties. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.043>
- Su, T., Wu, J., Zou, Z., Wang, Z., Yuan, J., Yang, G., 2022. Influence of environmental factors on resistivity of concrete with corroded steel bar. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 26, 1229–1242. <https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1670265>
- Taallah, B., Guettala, A., Guettala, S., Kriker, A., 2014. Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers. *Constr. Build. Mater.* 59, 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.058>
- Tang, C.-S., Wang, D.-Y., Zhu, C., Zhou, Q.-Y., Xu, S.-K., Shi, B., 2018. Characterizing drying-induced clayey soil desiccation cracking process using electrical resistivity method. *Appl. Clay Sci.* 152, 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.001>
- Teixeira, E.R., Machado, G., De Adilson, P., Jr., Guarnier, C., Fernandes, J., Silva, S.M., Mateus, R., 2020. Mechanical and thermal performance characterisation of compressed earth blocks. *Energies* 13. <https://doi.org/10.3390/en13112978>