



Revue des Matériaux et Energies Renouvelable

Journal homepage: <https://icmre.000webhostapp.com>

ISSN: 507-554



Etude de la corrosion des rideaux de palplanche en acier dans le sol.

Open
Access

B. Balegh ^{*1}, **A. Hadj Mostefa** ¹, **H.Sellaf** ¹, **H. Trouzine** ², **Y. Houmadi** ²

¹Laboratoire de Génie Civil & Environnement, Université de Djillali Liabès, Université d'Adrar, 01000, Algérie

¹Laboratoire de génie industriel et développement durable, Centre universitaire de Relizane, 48000, Algérie

¹Laboratoire de Génie Civil & Environnement, Université de Djillali Liabès, Université de Saida, 20000, Algérie

²Laboratoire de Génie Civil & Environnement, Université de Djillali Liabès, Université de Sidi Bel Abbes, 22000, Algérie

²Laboratoire de Structures Smart, centre universitaire d'Ain Témouchent, 46000, Algérie

ABSTRACT

Le but de ce travail est le calcul et l'analyse de la corrosion d'un rideau de palplanches en acier battu dans le sol. La modélisation du rideau de palplanche soumis à la corrosion dans le temps à 0, 25, 50 et 100 ans est présentée. Les résultats obtenus montrent qu'il faut veiller à ce que les moments de flexion maximum ne se produisent pas au même niveau que les zones de corrosion principales. Aussi, il est indispensable de définir des limites exactes correspondantes aux sols, afin de prédire la perte d'épaisseur due à la corrosion. Une série de figures qui illustrent les effets de la corrosion sur les déplacements et les déformations du sol ont été générés.

Article history:

Received in revised form 19 March 2020

Accepted 12 april 2020

Keys word: Palplanches, Sol, Corrosion;
Prédiction, Modélisation

Copyright © 2020 - All rights reserved

* Corresponding author. Tel.: +213 655967842.

E-mail address: balegh_b@yahoo.com

1. Introduction

Les rideaux de palplanches sont largement utilisés dans les systèmes de soutien d'excavation, batardeaux, les barrages, la stabilisation des talus, des structures riveraines, et endiguement. Ils présentent aussi d'énormes avantages dans l'économie de matériaux de construction et sont largement utilisées notamment dans le domaine des travaux maritimes [1,2,3]. Bien que les palplanches peuvent être en bois, béton armé ou plastiques; les rideaux de palplanches en acier sont les plus utilisés. Les rideaux de palplanches sont considérés comme des murs flexibles avec une rigidité relativement plus faible par rapport à d'autres murs in situ, tels que les parois [4,5]. Ils sont également exposés à un environnement marins ou aux sols agressifs, et le risque de corrosion est significatif, surtout après une durée de service (au-delà de 5 à 100 ans). La durée de vie utile de la nouvelle structure en tôle est habituellement assurée par un surdimensionnement de l'épaisseur ou par galvanisation de l'acier.

La perte due à la corrosion atmosphérique peut être de 0,01 mm par an en atmosphères normales et de 0,02 mm par an dans des endroits où des conditions marines peuvent affecter la performance de la structure selon l'Eurocode 3 [6]. La connaissance de la vitesse de corrosion est également importante pour vérifier la capacité de charge des structures existantes et estimer la durée de vie utile restante. En termes de surdimensionnement de la structure, on suppose une certaine vitesse de corrosion de quelques mm / an. La corrosion est également supposée être la même sur toute la surface, alors que la corrosion localisée ou d'autres types de corrosion inégale ne sont pas pris en compte. En pratique, la vitesse de corrosion est également supposée être une fonction linéaire du temps [7].

Les taux de corrosion du sol sont influencés par le type de sol, la variation du niveau de la nappe phréatique, la présence d'oxygène, les contaminants et la matière organique. L'effet de corrosion des matières organiques dépend de leurs compositions et concentrations [8], tandis que la perte d'épaisseur de l'acier au carbone dans les sols argileux rouges, par exemple, est supérieure à 1 mm / an [9]. L'étude des rideaux de palplanches existants nécessite généralement de mesurer la vitesse de corrosion uniforme sur une certaine zone de la structure. Ainsi, plusieurs études s'intéressent aux caractéristiques de résistance ultime des structures en acier avec des pertes uniformes des corrosions pour définir les durées de vie [10,11].

Il est également fréquent de constater que la corrosion la plus sévère des structures de pieux apparaît dans la zone d'éclaboussure, alors que des taux de corrosion beaucoup plus faibles se trouvent à quelques mètres au-dessous du niveau moyen d'eau [12]. Melchers et al ont constaté que pour les rideaux de palplanches ayant des profils d'épaisseur de paroi similaires dans toute la perforation antérieure des bacs d'entrée et de sortie de palplanches en U, les bandes de forme Z et en forme de I [13-14]. Plusieurs études portent sur la corrosion sous-marine et la mesure de la vitesse de corrosion dans les rideaux de palplanches en acier dans un milieu marin, et beaucoup de débat sur la question était de savoir si un modèle de corrosion doit s'appuyer sur des principes mécaniques ou sur des données réelles de corrosion [15].

L'objectif du présent travail est d'analyser les résultats d'une modélisation numérique afin d'indiquer l'effet de la corrosion par réduction d'épaisseur des rideaux de palplanches dans le sol naturellement agressif ainsi que les scénarios de déplacements et la présence de zones plastiques au cours du temps.

2. Rideau de palplanche

Pour la conception d'un rideau de palplanche, le concepteur doit tenir compte de la possibilité de détérioration du matériau et de son effet sur l'intégrité structurale du système. Sachant que la plupart des structures sont construites en acier, des observations sur le terrain à long terme indiquent que la pose de tôles d'acier offre une longue durée de vie lorsqu'elle est correctement conçue. Les installations permanentes devraient permettre la pose ultérieure d'une protection cathodique en cas de corrosion excessive. L'acier est le matériau le plus courant utilisé pour les murs de soutènements en raison de sa résistance et sa longue durée de vie.

Ces rideaux de palplanches sont constituées de plaques et verrouillage réalisées soit par laminage à chaud, soit par formage à froid, et répondent aux exigences des différents codes [6]. Les palplanches de type U, Z sont principalement utilisées dans les applications en BTPH, la résistance à la flexion régit la conception.

Les rideaux de palplanches sont livrées avec des nuances d'acier dont la limite d'élasticité minimale varie entre 240 et 460 MPa. L'épaisseur des profilés standards varie entre 6 et 20 mm dans les brides et entre 8 et 16 mm dans la bande. Les longueurs standard maximales de laminage dépendent du type de profilés choisie et varient entre 16 et 33 m. Les compositions sont comme suit (Tableau 1) [14].

Tableau 1- Composition des palplanches d'acier utilisées dans l'étude mesurée par spectroscopie d'émission optique (% en poids) [14].

Prof	C	P	Mn	si	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	V	Ti	Sn	Pb	Fe
U	0.1	0.069	0.87	0.173	0.021	0.47	0.09	0.05	0.55	0.003	0.021	0.004	0.019	-	Bal.
Z	0.1	0.073	0.86	0.165	0.023	0.47	0.08	0.04	0.58	≤0.005	0.021	0.002	0.017	0.01	Bal.

3. Modèles de corrosion à base d'expériences

La durée de vie des palplanches dépend des contraintes imposées en service et de l'effet de corrosion générale ou uniforme et locale (voir figure 1), que ce soit en acier doux ou en acier à haute résistance (par exemple, dans les grades 43A et 50A, BS 4360 ou en acier au carbone des grades A36, A36M, A328, A328M, A690, A572). La durée potentielle des sections varie de plus de 120 ans.

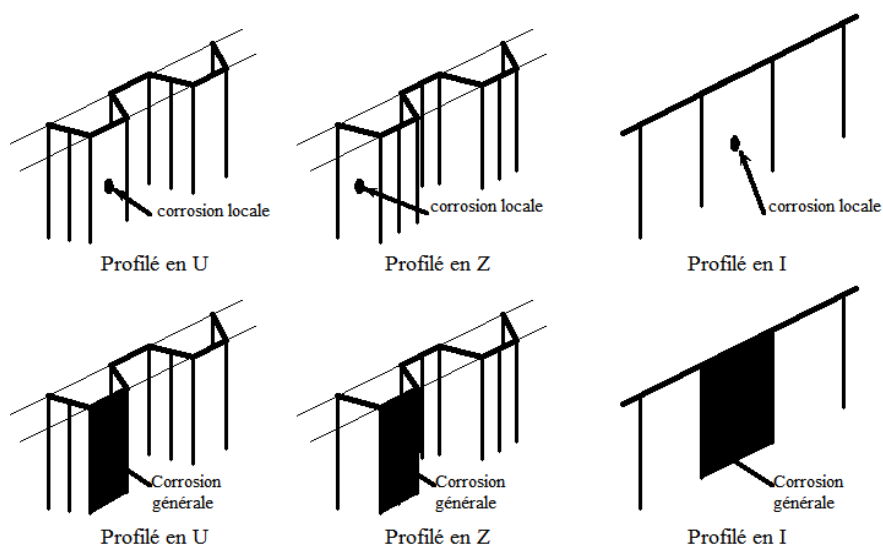


Figure 1- Type de corrosion dans les rideaux de palplanches.

Des développements récents adoptant les stratégies de modélisation mathématique, en association avec les mesures d'épaisseur in situ, ont permis l'amélioration de la compréhension qualitative des processus de corrosion à divers endroits dans les milieux de contact de structures, soit dans l'eau, le sol ou l'air. Sur la base de la prévision de la corrosion, des méthodes expérimentales et numériques [15-25] ont été adoptées pour évaluer de manière réaliste la résistance ultime de ces structures en acier corrodés, afin d'améliorer en fin de compte les stratégies d'enquête et de réparation.

4. La corrosion dans le sol selon l'Eurocode 3

Lorsque les rideaux de palplanches sont en contact avec le sol ou l'eau des deux côtés, les taux de corrosion sont appliqués de chaque côté. Si l'agressivité du sol ou de l'eau est différente sur les côtés opposés d'une paroi, les taux de corrosion indiqués dans cette section doivent être considérés pour la conception uniquement. La perte d'épaisseur due à la corrosion atmosphérique peut être de 0,01 mm par an en atmosphères normales et de 0,02 mm par an dans des endroits où des conditions marines peuvent affecter la performance de la structure. Les facteurs suivants ont une influence majeure sur les taux de corrosion dans les sols selon l'Eurocode 3 [6]: le type de sol, la variation du niveau de la nappe phréatique, la présence d'oxygène et la présence de contaminants.

Selon l'Eurocode 3, les valeurs recommandées de la perte d'épaisseur due à la corrosion des rideaux de palplanches dans les sols ou l'eau sont estimées à 5, 25, 50, 75 et 100 ans pour les cas suivants [6] :

- Les sols naturels non perturbés (sable, limon, argile, schiste ...)
- Sols pollués et sites industriels pollués
- Les sols naturels agressifs

- Remblais non compactés et non agressifs (argile, schiste, sable, limon, ...)
- Remblais non compactés et agressifs (cendres, scories, ...).

5. Conception et durabilité de rideau de palplanche

Lors de la conception des rideaux de palplanches, plusieurs aspects doivent être pris en considération: les conditions géotechniques, les systèmes structurels, les critères d'état, les propriétés des matériaux et l'agressivité du milieu. Pour la vérification de la durabilité des rideaux de palplanches on doit calculer le coefficient de sécurité qui est [6] :

$$S_f = M/W_x + (N.e)/W_x \quad (1)$$

Avec :

S_f : Coefficient de sécurité du rideau de palplanche

M : Moment de flexion du rideau de palplanche ($kN.m$)

N : Effort tranchant (kN)

W_x : Moment statique du rideau de palplanche (mm^3)

e : Déplacement maximum de rideau de palplanche (mm)

La vérification de la durabilité simplifie le choix d'une palplanche en acier suivant la norme prenant par considération la corrosion durant la durée de service. Les caractéristiques géométriques tel que le module de section réduit, moment d'inertie réduit, surface d'acier réduite et moment de capacité réduit sont diminuées au cours du temps de service à cause de réduction d'épaisseur de rideau de palplanche.

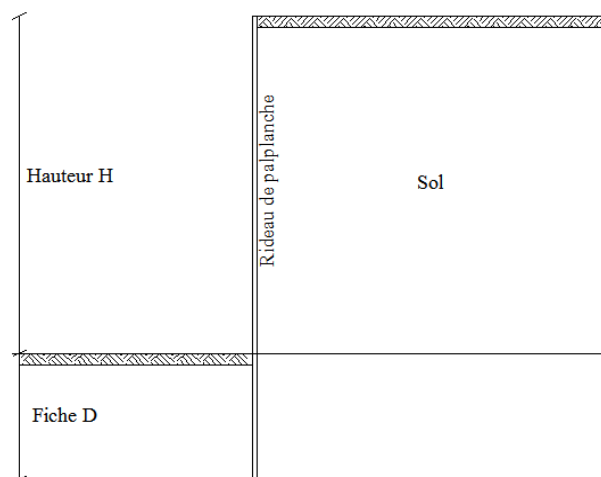


Figure 2 - Le modèle de rideau de palplanche étudié

6. Modélisation de rideau de palplanche corrodé

Pour mener notre étude, la géométrie de la figure 2 est modélisée numériquement, on a utilisé le logiciel numérique COMSOL [26], qui est l'un des codes de calcul, basé sur la méthode d'éléments finis. Ce modèle est inspiré par un exercice de référence spécifiée par un groupe de travail de la société allemande pour Géotechnique [27-29].

Tableau 2 - Données et paramètres

Désignation	valeurs	Description
X_contraintes	10 kN/m^2	Composante suivant xx de la contrainte in-situ
Y_ contraintes	12 [kPa]	Composante suivant yy de la contrainte in-situ

<i>Désignation</i>	<i>valeurs</i>	<i>Description</i>
Z_ contraintes	10 kN/m ²	Composante suivant zz de la contrainte in-situ
U_max	10 mm	Déflexion maximale du rideau
Profondeur	10 m	Profondeur

On utilise pour le couplage le type extrusion générale en zone de contact rideau de palplanche et sol. Les Matériaux utilisés dans cette étude sont l'acier et le sol dont les caractéristiques données dans le tableau 2.

Tableau 3- Paramètres du sol et du rideau de palplanche

	Sol	Rideau de palplanche
Module de Young	20e6 Pa	200e9 Pa
Coefficient de Poisson	0.3	0.3
Masse volumique	1900 kg/m ³	7850 kg/m ³
Cohésion	0 Pa	

Le Critère de rupture de Mohr-Coulomb est utilisé, les surcharges sont appliquées horizontalement et directement sur le sol dans les parties actives et passives ainsi que les contraintes horizontales de poussées sont appliquées perpendiculaires au rideau de palplanches.

Cette étape permet de compiler les équations en utilisant une étude de type stationnaire avec une tolérance relative de 0.1.

7. Résultats et discussions

La résistance de la section doit être vérifiée pour le moment de flexion maximum, en tenant compte des moments de flexion positifs et négatifs, des forces combinées éventuelles et du moment de flexion afin de s'assurer que le sol est capable de résister à ces effets combinés. La conception d'un rideau de palplanche nécessite de veiller est-ce que les moments de flexion maximum ne se produisent pas au même niveau que les zones de corrosion principales.

Le tableau 4 donne les valeurs recommandées pour la perte d'épaisseur selon l'Eurocode 3 pour différents types de sols, par rapport à la durée de vie de conception requise de 5 à 100 ans, les valeurs dépendent de l'agressivité des sols.

Tableau 4 - Valeur recommandée pour la perte d'épaisseur des rideaux de palplanches, dues à la corrosion dans le sol, selon l'Eurocode 3 [6]

Nature du sol	Perte d'épaisseur en mm				
	5 ans	25 ans	50 ans	75 ans	100 ans
Sols naturels non perturbés	0	0.3	0.6	0.9	1.2
Sols naturels pollués et sols Industriels	0.15	0.75	1.5	2.25	3.00
Sols naturels agressifs (marais, tourbières, tourbe...)	0.2	1	1.75	2.5	3.25
Remblais non-compactés et non agressifs (argile, schiste, de sable, de limon ...)	0.18	0.7	1.2	1.7	2.2
Remblais non compactés et agressifs (cendre...)	0.5	2	3.25	4.5	5.75

La perte d'épaisseur due à la corrosion à 5 ans est de 0,00 à 0,50 mm, sont respectivement pour les sols naturels non perturbés dans un climat tempéré dans la zone d'attache élevée. La vitesse de corrosion la plus élevée se trouve généralement dans les sols de nature remblais non compactés. Cependant, dans la plupart des cas, la perte d'épaisseurs due à la corrosion des rideaux de palplanche varie linéairement pour un même type de sol.

Les modèles étudiés sont des soutènements de sol naturellement agressif avec des pertes d'épaisseurs du rideau de palplanche dues à la corrosion varie entre de 0mm, 1mm, 1.75mm, 3,25mm pour une période allant respectivement de 0, 25, 50 et 100 ans selon Eurocode 3.

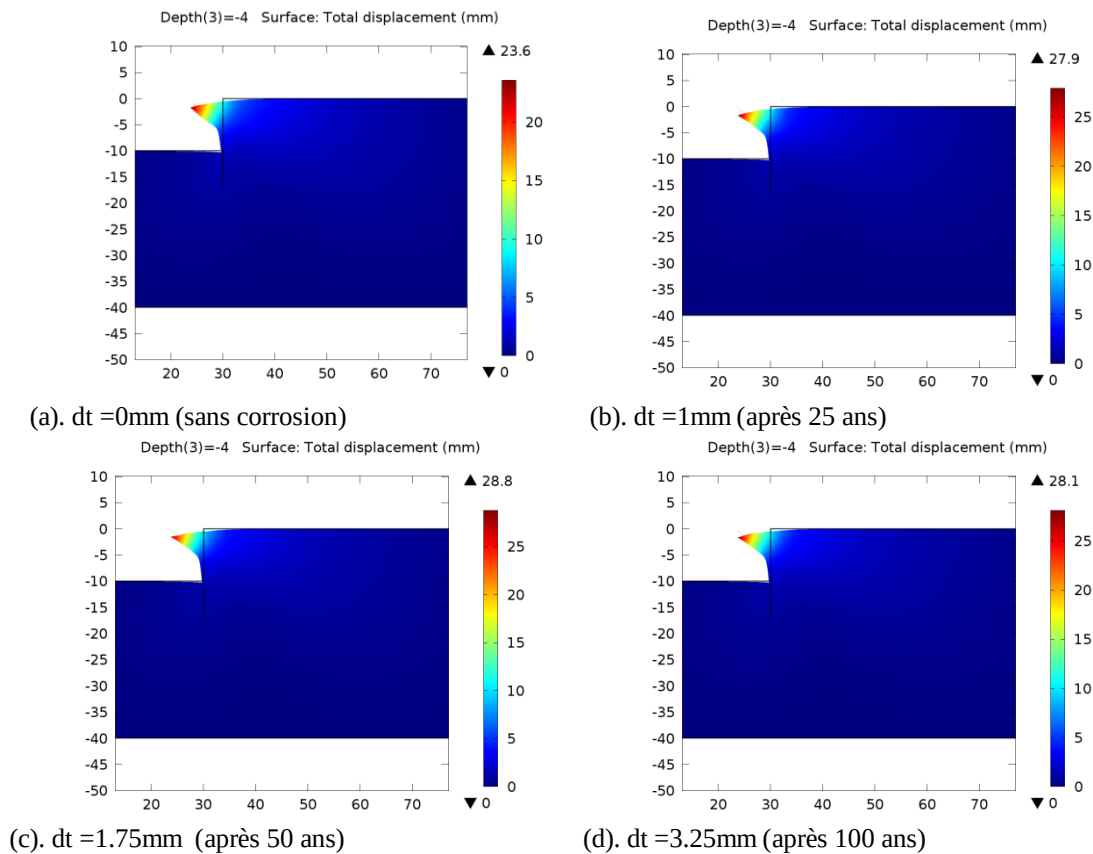
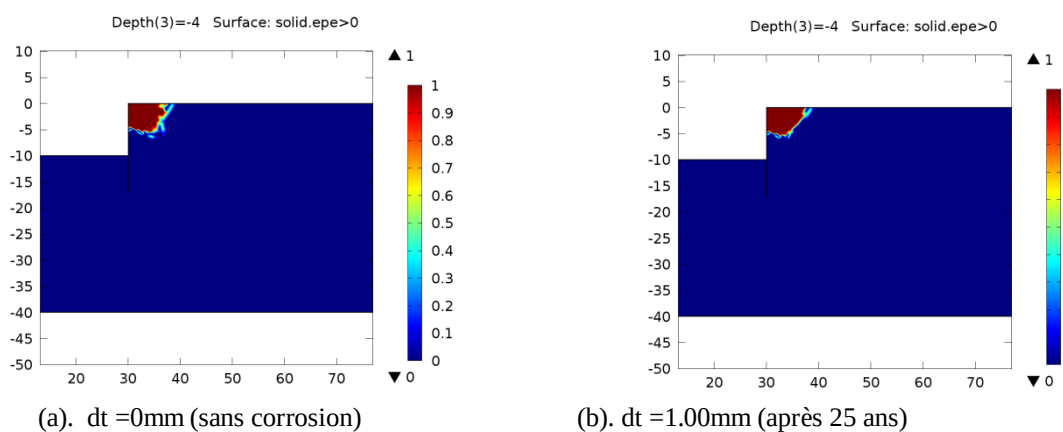


Figure 3 - Déplacements totaux de rideau de palplanche

La figure 3 montre que les déplacements totaux du modèle étudié selon le critère de rupture du sol de Mohr-Coulomb avec diverses épaisseurs réduites de palplanches (sans corrosion pour une épaisseur de 18mm et avec corrosion pour des épaisseurs de 17mm, 16.25mm et 14.75mm consécutivement), toutes les propriétés du sol et de la palplanche sont supposée constante. On voit que la présence relativement croissante des déplacements commençant à 50 ans, après quoi les déplacements totaux reviennent à augmenter après 100 ans de service.



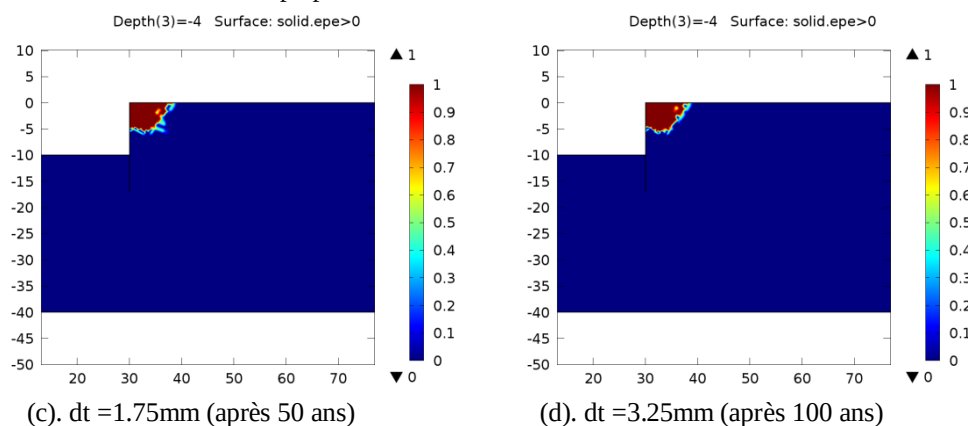


Figure 4- Zones plastiques du sol.

La figure 4 présente les zones plastiques du sol pour les quatre modèles. La zone plastique s'élargit et avance en profondeur dans le temps.

8. Conclusion

Les grands déplacements des rideaux de palplanche et la répartition des contraintes dépendent des conditions d'appuis, il faut aussi veiller est-ce que les moments de flexion maximum ne se produisent pas au même niveau que les zones de corrosion de grande agressivité.

Généralement, La corrosivité potentielle des expositions au sol dépend principalement de la présence des remblais ou des agents agressifs, oxygène,..etc. Certains sols peuvent être plus ou moins corrosifs que d'autres.

Des modèles mathématiques de corrosion des aciers à base d'expérience ont été étudiés afin d'estimer les pertes d'épaisseurs des aciers en fonction du temps, il est à remarquer que certains sont appliqués aux ouvrages spécifiques dans des milieux marins.

Les déplacements et les zones plastifiées dans le sol montrent que les variations du poids du sol, les forces actives et les surcharges ont une influence sur la stabilité et la résistance du rideau de palplanche. Le mode de ruine est sensiblement modifié pendant la durée de service.

Remerciements : Ce projet est réalisé dans le cadre d'un projet CNEPRU. Nos vifs remerciements vont au Laboratoire de Génie Civil & Environnement de l'Université Djillali Liabès à Sidi Bel Abbès pour la réalisation de ce travail.

REFERENCES

- [1] Bilgin Ö. (2010). Numerical studies of anchored sheet pile wall behavior constructed in cut and fill conditions. *Computers and Geotechnics*, vol. 37, p. 399–407.
- [2] Kristian K, Lars D, Sven K. (2005). Ultimate limit state design of sheet pile walls by finite elements and nonlinear programming. *Computers and Structures*, vol. 83, p. 383–393.
- [3] Kasinathan M, Ranganathan S. (2007). Numerical modeling of dredging effect on berthing structure *Acta Geotechnica*, vol. 2, p. 249–259.
- [4] Clough G.W. and O'Rourke T.D. (1990). Construction induced movements of in situ walls. In: *ASCE specialty conference on design and performance of earth retaining structures, Ithaca (NY)*, p. 439–70.
- [5] Zekri A, Ghalandarzadeh A, Ghasemi P and Aminfar M.H. (2015). Experimental study of remediation measures of anchored sheet pile quay walls using soil compaction. *Ocean Engineering*, vol. 93, pp. 45–63.
- [6] Eurocode 3. (2007). Design of steel structures - Part 5: Piling, EN 1993-5:2007 (E), *European Committee for Standardization, Brussels*.
- [7] Wall H, Wadsö L. (2013). Corrosion rate measurements in steel sheet pile walls in a marine environment. *Marine Structures*, vol. 33, p. 21–32.
- [8] Soriano C, Alfantazi A. (2016). Corrosion behavior of galvanized steel due to typical soil organics", *Construction and Building Materials*, vol. 102, p. 904–912.
- [9] Yan M, Sun C, Xu J, Dong J, Ke W. (2014). Role of Fe oxides in corrosion of pipeline steel in a red clay soil. *Corrosion Science*, vol. 80, p. 309–317.
- [10] Sharifi Y, Tohidi S. (2014). Ultimate capacity assessment of web plate beams with pitting corrosion subjected to patch loading by artificial neural networks. *International Journal of advanced Steel Construction*, vol. 10, n° 3, p. 325–350.

- [11] Sharifi Y, Rahgozar R. (2010). Evaluation of the Remaining Shear Capacity in Corroded Steel I-Beams. *International Journal of advanced Steel Construction*, vol. 6, No. 2, pp. 803-816.
- [12] Melchers R.E. (2003). Probabilistic models for corrosion in structural reliability assessment, *Part 2: Models based on mechanics*. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 125, 272–280.
- [13] Melchers R.E. (2008). Condition assessment of aged structures, Wood head Publishing Limited, Newcastle, Australia.
- [14] Melchers R.E, Jeffrey R.J, Usher K.M.. (2014). Localized corrosion of steel sheet piling. *Corrosion Science*, vol. 79, p. 139–147.
- [15] Wang Y, Wharton J.A, Shenoi R.A. (2014). Ultimate strength analysis of aged steel-plated structures exposed to marine corrosion damage. *Corrosion Science*, vol. 86, p. 42–60.
- [16] Southwell C.R, Bultman J.D, Hummer, J.C. (1979). Estimating of service life of steel in seawater. *Seawater Corrosion Handbook*, vol. p. 87–374.
- [17] Melchers R.E (1999). Corrosion uncertainty modelling for steel structures”, *Journal of Construction Steel Research*, vol. 52, p. 3–19.
- [18] Guedes S.C, Garbatov Y. (1999). Reliability of maintained corrosion protected plates subjected to non-linear corrosion and compressive loads. *Marine Structures*, vol. 12, p. 425–445.
- [19] Paik J.K, Kim S.K, Lee S.K. (1998). Probabilistic corrosion rate estimation model for longitudinal strength members of bulk carriers. *Ocean Engineering*, vol. 25, p. 837–860.
- [20] Paik J.K, Thayamballi A.K. (1998). The strength and reliability of bulk carrier structures subject to age and accidental flooding. *SNAME Transactions*, vol. 106, p. 1–40..
- [21] Paik J.K, Thayamballi A.K. (2002). Ultimate strength of ageing ships”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, vol. 216, p. 57–78.
- [22] Yamamoto N, Ikegami K. (1998). A study on the degradation of coating and corrosion of ship's hull based on the probabilistic approach. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 120, p. 121–128.
- [23] Ahmmad M, Sumi Y. (2010). Strength and deformability of corroded steel plates under quasi-static tensile load. *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 15, p. 1–15.
- [24] Qin S, Cui W. (2002). A discussion of the ultimate strength of ageing ships, with particular reference to the corrosion model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, vol. 216, p. 155–160.
- [25] Qin S, Cui, W. (2003). Effect of corrosion models on the time-dependent reliability of steel plated elements. *Marine Structures*, vol. 16, p. 15–34.
- [26] COMSOL. (2011). Comsol Multiphysics User's Guide, *comsol 4.2a edn*, Comsol AB, Tegnérgatan 23, SE-111 40.
- [27] Schweiger H.F. (2002). Benchmarking in Geotechnics 1. Technical Report CGG IR006, *Institute for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Graz University of Technology*.
- [28] Potts D, Zdravkovic L. (2001). Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering. *Thomas Telford Publishing*.
- [29] Neher H.P., Lachler A. (2006). Numerical modeling of a diaphragm wall production process in Rotterdam compared to monitoring data. In: *Sixth European conference on numerical methods in geotechnical engineering, Graz*, p. 417–22.