

Ancrage et conception de barres collées internes comme renforcement en cisaillement

Mathieu Fiset¹, Josée Bastien², et Denis Mitchell³

¹ Université du Québec à Chicoutimi, mathieu_fiset@uqac.ca

² Université Laval, josee.bastien@gci.ulaval.ca

³ Université McGill, denis.mitchell@mcgill.ca

Résumé :

Une technique efficace de renforcement en cisaillement consiste à insérer des barres d'acier à l'intérieur d'ouvertures verticales percées dans la section en béton à l'aide d'un adhésif à haute résistance. Cependant, l'efficacité du renforcement dépend grandement de la performance de l'adhésif et de l'ancrage des barres d'armature au béton. Cet article résume la méthode de conception et de calcul de la résistance à l'effort tranchant développés pour les pièces renforcées de ce type de barres. La méthode considère le comportement spécifique en adhérence des barres collées et respecte les exigences du code canadien des ponts en matière de fiabilité et de sécurité.

1. Technique de renforcement par barres collées internes

Une technique efficace de renforcement à l'effort tranchant développée entre autres pour les dalles et les poutres en béton armé consiste à ajouter des barres d'acier transversales collées à l'intérieur de la section existante. Cette technique permet entre autres de maximiser la performance de l'ancrage et peut être utilisée pour des éléments de largeur importante. La mise en place de la technique à l'étude est sommairement illustrée à la Fig. 1. Pour installer les barres à l'intérieur de la structure, des ouvertures préalablement forées (étape 1, diamètre du trou environ 30% supérieur au diamètre de la barre) sont ensuite broisées et nettoyées (étape 2) et injectées d'un adhésif à haute résistance (étape 3). Les barres de renforcement en acier sont ensuite insérées (étape 4) et, au besoin, des têtes d'ancrage peuvent être ajoutées afin d'accroître l'efficacité de l'ancrage adhésif (étape 5). Les détails d'installation sont généralement donnés par les fabricants de l'adhésif utilisé.

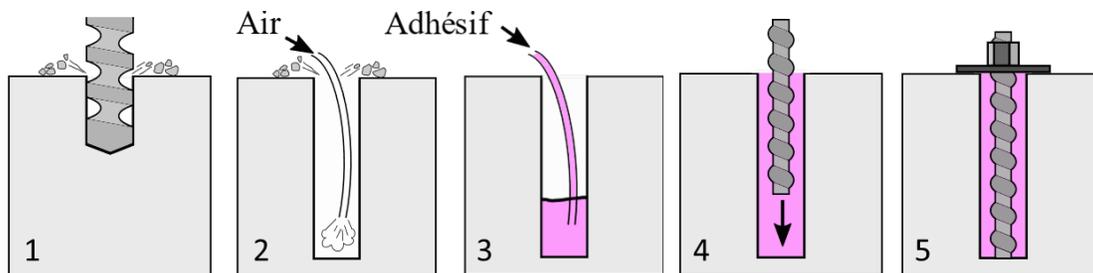


Fig. 1 : Sommaire des étapes d'installation de la technique de renforcement à l'effort tranchant à l'aide de barres collées internes

Bien que l'ajout de barres d'acier collées internes s'avère efficace pour augmenter la capacité structurale, l'ancrage des barres collées affecte la résistance à l'effort tranchant [1-4]. En effet, les fissures diagonales de cisaillement définissent la longueur d'ancrage des barres collées. Bien que les barres interceptées en leur centre puissent plastifier, les barres interceptées près de leur extrémité peuvent subir une rupture de leur ancrage. D'un côté, une diminution de la contribution de l'armature transversale (V_s) est attendue lorsque la capacité de la barre est contrôlée par la résistance de l'ancrage. D'un autre côté, le contrôle de la fissuration apporté par une barre adhésive diffère de celle apportée par un étrier, ce qui peut conduire à une diminution de la

contribution du béton (V_c). L'utilisation du code canadien de conception des ponts routiers dans sa forme actuelle [5], considérant des étriers pleinement ancrés, peut donc généralement conduire à une surestimation de la capacité structurale [2].

2. Méthode de conception

La méthode de conception résumée ci-après et détaillée dans Fiset et al. [1] considère les propriétés de l'ancrage sur la détermination de V_c et de V_s ainsi que sur les autres critères de conception recommandés par le code canadien des ponts [5].

2.1 Propriétés de l'ancrage

La résistance de l'ancrage est donnée par le moindre de la résistance propre de l'adhésif, f_{b0} , la capacité du béton à retenir l'ancrage et la limite d'élasticité de l'acier d'armature, f_y [3]. Cette approche recommandée par plusieurs auteurs [6-10] est similaire à celle proposée pour les ancrages adhésifs par la norme CSA A23.3 [11]. La Fig. 2 représente qualitativement la résistance axiale d'une barre obtenue de cette approche en fonction de la longueur d'ancrage. Comme présenté, la résistance d'une barre s'accroît lorsque la longueur d'ancrage augmente, sans toutefois dépasser f_y . D'après cette approche, la résistance en adhérence f_{by} qui correspond à la plastification de la barre peut ainsi être déterminée par l'Éq. (1).

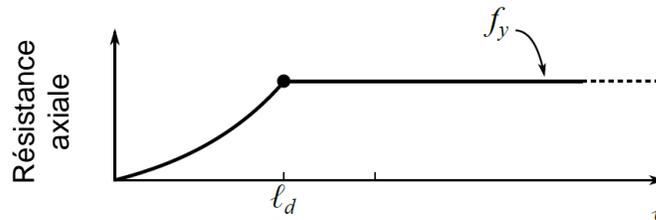


Fig. 2 : Représentation de la résistance axiale d'une barre collée en fonction de la longueur d'ancrage, ℓ

$$f_{by} = \sqrt[3]{\frac{\Omega_\theta^2 k_c^2 f'_c f_y}{40 d_b}} \leq f_{b0} \quad (1)$$

Dans cette équation, Ω_θ est un paramètre considérant l'effet de l'inclinaison des barres et de la fissure de cisaillement sur la résistance de l'ancrage (typiquement $\Omega_\theta = 1$ lorsque l'angle du champ de compression, θ , $\leq 37^\circ$ [12]), k_c est le coefficient d'éclatement du béton en traction [8, 11, 13], f'_c est la résistance à la compression du béton déterminé sur cylindre, f_y la limite élastique de la barre d'acier à ancrer, d_b son diamètre et f_{b0} la résistance en adhérence de l'adhésif. Typiquement, les valeurs caractéristiques recommandées en conception [11, 13, 14] sont $k_c = 7,0$ et $f_{b0} \approx 14$ MPa, ce dernier pouvant varier selon l'adhésif utilisé, la résistance du béton, le diamètre de la barre et les conditions d'installation. La valeur de k_c et f_{b0} peuvent être réduites selon d'autres facteurs affectant la performance des ancrages adhésifs [8, 9]. À partir de la résistance en adhérence, f_{by} , la longueur de développement, ℓ_d , d'une barre d'acier collée est donnée par l'Éq. (2) :

$$\ell_d = \frac{f_y d_b}{4 f_{by}} \quad (2)$$

Cette longueur de développement calculée à l'extrémité d'une barre collée peut être réduite du facteur $(1 + 0,67 d_a / \ell_d)^{-0,67}$ lorsqu'une plaque d'ancrage de diamètre, d_a , y est ajoutée.

2.2 Calcul de la résistance à l'effort tranchant

De la même façon que définie par le code canadien des ponts [5], la contribution à la résistance à l'effort tranchant du béton (V_c) et de l'armature de cisaillement (V_s) peut s'additionner de la façon suivante afin de déterminer la résistance pondérée V_r .

$$V_r = V_c + V_s \leq 0.25\phi_c f'_c b_v d_v \quad (3)$$

À cette équation peut s'additionner le terme de précontrainte (V_p) lorsque présent. Le coefficient de tenue du béton, ϕ_c , la largeur qui résiste au cisaillement, b_v , la profondeur en cisaillement, d_v , sont définis par le code canadien des ponts [5]. La contribution du béton s'exprime en fonction de la résistance à la fissuration du béton, f_{cr} , et du coefficient d'efficacité du béton en cisaillement β , comme suit :

$$V_c = 2.5\phi_c \beta f_{cr} b_v d_v \quad (4)$$

Le coefficient β donné à l'Éq. (5) traduit la capacité du béton à transmettre les contraintes de traction et de cisaillement entre les fissures lorsque des barres collées sont utilisées. Ce coefficient est similaire à celui donné par le code des ponts pour une membrure contenant des étriers conventionnels, mais est réduit en raison du contrôle de la fissuration apporté par la présence de barres internes collées qui peut être moindre que celui apporté par des étriers. Cette réduction est évaluée en fonction de la probabilité, p , de rencontrer une fissure plus large d'une valeur, Δ_w . Ces deux paramètres sont donnés aux équations (6) et (7) pour des barres d'acier collées installées verticalement.

$$\beta = \frac{0.4}{1 + 1500\varepsilon_x + 1.5k_{dg}p\Delta_w} \quad (5)$$

$$p = \left(\frac{\sum \ell_d - \sum \ell_a}{s} \right) k_p \cot \theta \begin{cases} \geq 0 \\ \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\Delta_w = 1,1 \left(s_1 + 0,05k_{db} \left(1 + 1,5 \frac{\sum \ell_a}{\sum \ell_d} \right) - \frac{k_{db}^2}{f'_c{}^{2/3}} \right) \geq 0 \quad (7)$$

Dans ces équations, ε_x et θ sont respectivement la déformation longitudinale de la membrure et l'angle des contraintes principales de compression donnés par le code canadien des ponts [5]. Le paramètre s_1 correspond au glissement d'une barre collée au moment de la rupture de l'ancrage (s_1 caractéristique est d'environ 1,5 mm [3, 15-17]), k_p considère l'effet d'une plaque d'ancrage lorsqu'utilisée à l'extrémité d'une barre (k_p prend les valeurs de 1, 0,5 et 0 si l'ancrage à aucune, une ou les deux extrémités des barres collées peuvent être considérés équivalent à l'ancrage d'un étrier, tel que l'ajout de plaque ou d'autres dispositifs équivalents [3, 18, 19]), $\sum \ell_d$ correspond à la somme des ℓ_d calculées pour les deux extrémités des barres collées et $\sum \ell_a$ est la longueur d'ancrage des barres excédant d_v ($\sum \ell_a = \ell_{bar} - d_v$ pour des barres verticales, $\sum \ell_a \geq 0$, sans excéder $\sum \ell_d$). Le facteur k_{dg} reflète l'influence de la taille nominale du granulat, a_g , ($k_{dg} = 35/(15 + a_g)$) et le facteur k_{db} considère les propriétés des barres collées ($k_{db} = 0.58(f_y/400)\sqrt{d_b}$). Les équations (6) et (7) doivent être ajustées dans le cas où les barres collées sont inclinées (voir Fiset et al. [1] pour plus de détails).

La résistance à l'effort tranchant apportée par les barres d'acier collées est déterminée à partir de leur résistance moyenne. Cette résistance moyenne caractérise la performance de l'ancrage et le profil de résistance illustré à la Fig. 2. La résistance V_s pour des barres d'acier collées verticales est ainsi donnée par l'Éq. (8)

$$V_s = \frac{\phi_s(\eta f_y)A_v d_v \cot \theta}{s} \quad (8)$$

Dans cette équation, le coefficient de tenue de l'acier, ϕ_s est défini par le code des ponts [5]. Le paramètre A_v correspond à l'aire totale des barres collées comprises à l'intérieur d'un espacement longitudinal, s . Pour des barres d'acier collées installées verticalement, le paramètre d'efficacité, η , est donné par l'Éq. (9).

$$\eta = \frac{\ell_{\text{bar}} - \sum \ell_d (1 - 0.4k_d k_a)}{d_v} \leq 1 \quad (9)$$

Dans cette équation, le facteur k_d caractérise le décollement d'une barre à la suite d'une rupture par adhérence (typiquement $k_d = 1$ lorsque $\varepsilon_x < 0,0015$) et le facteur k_a donné par l'Éq. (10) caractérise l'effet bénéfique de la longueur d'ancrage ℓ_a excédant d_v ,

$$k_a = 1 - (\sum \ell_a / \sum \ell_d)^{2,5} \quad (10)$$

Pour les pièces contenant des étriers et qui sont renforcées à l'effort tranchant par l'ajout supplémentaire de barres transversales en acier collées, les équations (1) à (10) peuvent être utilisées. Dans un tel cas, la valeur de V_s utilisé dans l'Éq. (1) correspond à la somme des contributions des étriers (Éq. (8) avec $\eta = 1$) et des barres collées (Éq. (8) avec η déterminé de l'Éq. (9)), tel que :

$$V_s = V_{s,\text{étriers}} + V_{s,\text{barres_collées}} \quad (11)$$

2.3 Autres critères de conception

En raison de la performance des barres d'acier collées réduites [1, 2, 4], il convient d'ajuster les critères d'armature de cisaillement minimale et d'espacement longitudinal, s , et transversal, s_t , maximums donnés par les codes [5, 20] comme suit:

$$\frac{A_v \eta f_y}{s} \geq 0,15 f_{cr} b_v \quad (12)$$

$$s/\eta \leq \begin{cases} 0,75d_v \\ 600 \text{ mm} \end{cases} \quad (13)$$

$$s_t/\eta \leq \begin{cases} 1,1d_v \\ 600 \text{ mm} \end{cases} \quad (14)$$

Les équations (12) à (14) peuvent être ajustées afin de considérer la présence d'étriers, en ajoutant la quantité d'étriers $A_v f_y / s$ au terme de gauche de l'Éq. (12) et en considérant un espacement équivalent obtenu par moyenne harmonique aux Éqs. (13) et (14). Les termes de droite des Éqs. (13) et (14) doivent être diminués de moitié pour un effort tranchant supérieur à $0,10 \phi_c f'_c b_v d_v + V_p$ [5]. Bien que la méthode de calcul présentée en section 2.2 ait été validée pour des pièces renforcées de barres collées dont la disposition ne respecte pas les limites données aux équations (12) à (14), il a été montré par Fiset et al. [1] que ces critères permettent d'éviter la formation de zones de faiblesse le long des pièces renforcées et de réduire la variabilité entre les résistances calculées et celles déterminées en laboratoire.

3. Validation de la méthode

Afin de valider la méthode de conception présentée, la résistance à l'effort tranchant prédite est comparée à la résistance obtenue d'un grand nombre (85) de poutres renforcées de barres d'acier collées internes et critique en cisaillement. Les essais de validation comprennent 60 poutres testées en laboratoire et 25 poutres additionnelles modélisées et analysées numériquement. Les détails des essais expérimentaux de validation et les références pertinentes se retrouvent dans Fiset et al. [1], auxquels s'ajoutent les essais présentés aux références [4, 21-24]. Parmi les paramètres mis à l'épreuve expérimentalement et numériquement, les principaux sont :

- La hauteur de la section (h entre 190 et 1200 mm);
- La profondeur en cisaillement (d_v entre 135 et 990 mm);
- L'espacement longitudinal des barres transversales collées ($s = 55$ à 700 mm);
- Le ratio d'espacement (s/d_v entre 0.25 et 1.25);
- Le diamètre des barres collées (d_b entre 6 mm et 20 mm);
- L'inclinaison par rapport à l'axe longitudinal des barres collées (90 ou 45°);
- L'effet de plaque d'ancrage à l'extrémité des barres, lorsque présente;
- La présence ou l'absence d'étriers installés avant la coulée du béton;
- La géométrie de la section, rectangulaire ou en té;
- La précontrainte longitudinale.

La Fig. 3 présente la comparaison entre les résistances obtenues en laboratoire ou numériquement, V_{test} , et celles de conception calculée à partir de la méthode présentée, V_r .

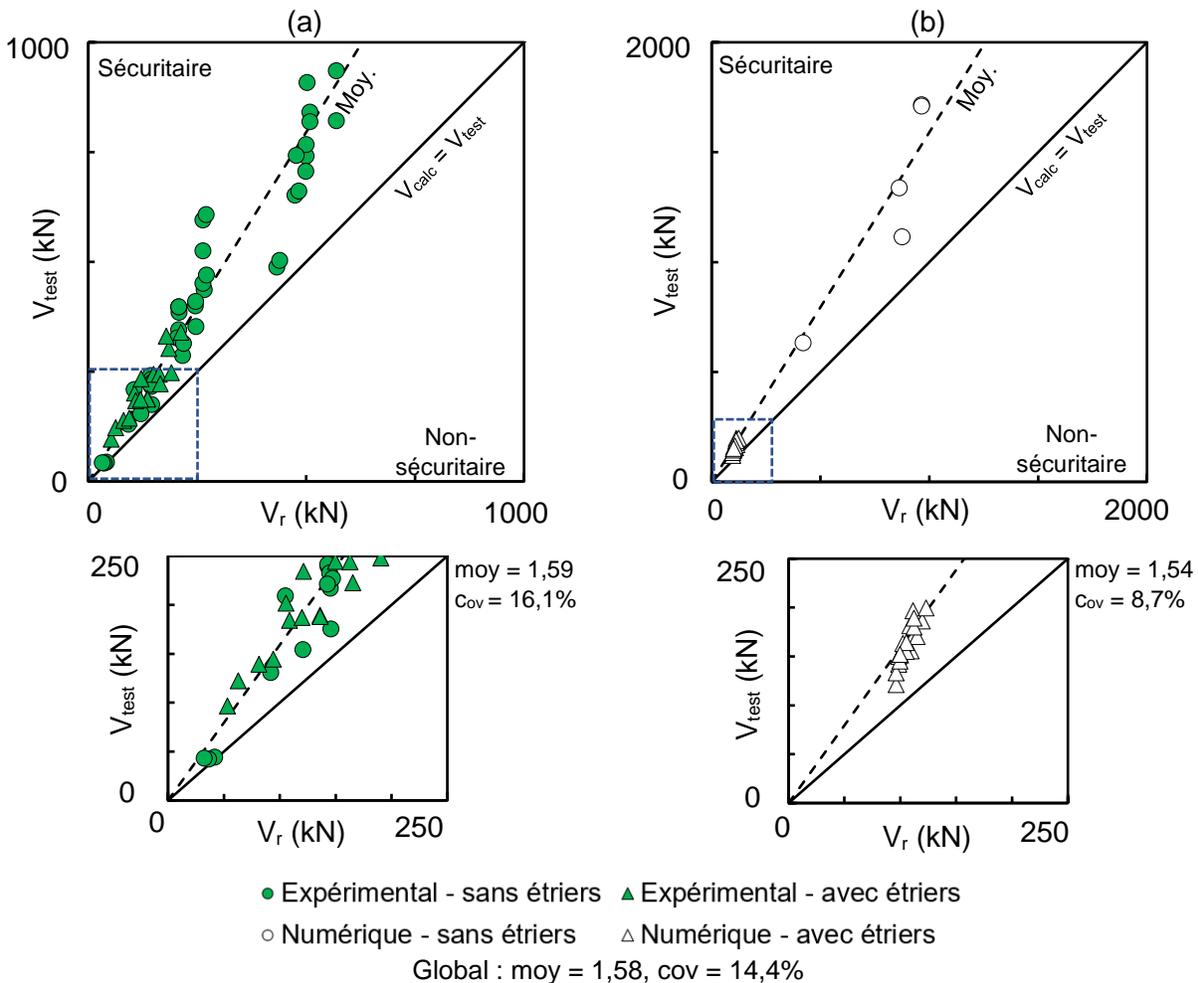


Fig. 3 : Comparaison entre les résistances à l'effort tranchant obtenues (a) expérimentalement et (b) par analyse numérique, et celles déterminées par la méthode de calcul ($\phi_c = 0,75$, $\phi_s = 0,90$, $f_{b0} = 14 (f'_c/20)^{0,1} (10/d_b)^{0,2}$, $k_c = 7$ [11, 13, 14, 25])

Il est possible de constater que, pour toutes les poutres renforcées de barres d'acier internes testées en laboratoire ou analysées numériquement, la résistance à l'effort tranchant V_{test} est supérieure à la résistance de conception calculée, V_r . De façon générale pour les 85 pièces utilisées pour la validation, le ratio moyen V_{test}/V_r est de 1,58 (coefficient de variation, $c_{ov} = 14,4\%$). Des valeurs statistiques comparables résultent des 60 essais en laboratoire ($V_{\text{test}}/V_r = 1,59$ et $c_{ov} = 16,1\%$) et des 25 analyses numériques ($V_{\text{test}}/V_r = 1,54$ et $c_{ov} = 8,7\%$). Ces valeurs statistiques sont similaires, peu importe si les barres internes collées sont utilisées conjointement avec des étriers, ou non. L'indice de fiabilité, β , de la méthode proposée peut ainsi être estimée à partir de l'équation suivante [5, 16, 26] :

$$\left(\frac{V_{\text{test}}}{V_r}\right)^{-1} = \exp(-0,75 \beta c_{ov}) \quad (15)$$

De façon générale pour les 85 tests de validation disponibles, l'indice de fiabilité calculé est de 4,20. De façon spécifique, cet indice est de 3,84 et 6,58 sur la seule base des essais en laboratoire ou des analyses numériques, respectivement. Dans tous les cas, l'indice de fiabilité obtenu surpasse l'indice de fiabilité cible de 3,50 spécifié par le code canadien des ponts en conception sur 75 ans.

4. Conclusions

La technique de renforcement à l'effort tranchant avec des barres d'acier collées internes à la section présente plusieurs avantages pratiques et structuraux. Néanmoins, il est nécessaire de considérer les propriétés de l'ancrage adhésif sur la résistance des barres et sur le contrôle de la fissuration pour concevoir ce type de renforcement. Ainsi, la méthode de conception présentée permet de considérer ces effets sur le calcul de la résistance V_c et V_s ainsi que sur les critères de conception prescrits par le code canadien des ponts. Il apparaît que la méthode de conception résumée dans cet article respecte les exigences de sécurité et de fiabilité de ce même code.

Remerciements

Les auteurs désirent remercier les étudiants et l'équipe du centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB) qui ont directement ou indirectement travaillé à cette recherche. Les auteurs désirent également souligner le soutien apporté par le CRIB, le ministère des Transports et de la Mobilité Durable, le CRSNG, Create-Foncer Infra, et les Fonds de recherche du Québec - Nature et technologie.

Références

- [1] Fiset M, Bastien J, Mitchell D. Shear design of RC members strengthened with steel reinforcing bars embedded through section. *Engineering Structures*. 2023;285:116050.
- [2] Fiset M, Bastien J, Mitchell D. Design of concrete members strengthened in shear with vertical bonded bars. In: CSCE, editor. 11th International Conference on Short and Medium Span Bridges. Toronto (ON), Canada; 2022. p. 8.
- [3] Fiset M, Villemure F-A, Bastien J, Mitchell D. Behavior of Post-Installed Bonded Bars as Shear Reinforcement. *ACI Structural Journal*. 2020;117:159-68.
- [4] Fiset M. Étude du comportement des éléments en béton armé post-renforcés à l'effort tranchant [Thesis]. Québec, QC: Université Laval; 2019.
- [5] CSA-S6. Canadian Highway Bridge Design Code. 12th ed. Toronto, ON: Canadian Standards Association; 2019. p. 1185.
- [6] Eligehausen R, Blochwitz R, Fuchs W. Behavior and Design of Adhesive Anchors Under Sustained Load. *ACI Special Publication 283* 2012:1-14.

- [7] Eligehausen R, Cook R, Jorg A. Behavior and Design of Adhesive Bonded Anchors. *ACI Structural Journal*. 2006;103:822-31.
- [8] Eligehausen R, Mallée R, Silva JF. *Anchorage in Concrete Construction*. Berlin, Germany: Ernst and Sohn; 2006.
- [9] Cook RA, Konz RC. Factors Influencing Bond Strength of Adhesive Anchors. *ACI Structural Journal*. 2001;98:76-86.
- [10] Cook RA, Kunz J, Fuchs W, Konz RC. Behavior and Design of Single Adhesive Anchors under Tensile Load in Uncracked Concrete. *ACI Structural Journal*. 1998;95:9-26.
- [11] CSA-A23.3. *Design of Concrete Structures*. Toronto, ON: Canadian Standards Association 2019. p. 301.
- [12] Fiset M, Bédard F, Bastien J, Mitchell D. Thick Concrete Slab Bridges: Study of Shear Strengthening. 10th International Conference on Short and Medium Span Bridges. Québec (QC): Canadian Society for Civil Engineering; 2018. p. 10.
- [13] Hilti. *North American Product Technical Guide : Anchor Fastening Technical Guide*. 17 ed. Tulsa, OK; 2016.
- [14] Hilti. *Hilti Fastening Technology Manual B 2.11*. Schaan, Liechtenstein: Hilti Corp.; 2005. p. 384.
- [15] Villemure F-A, Fiset M, Bastien J, Mitchell D, Fournier B. Behavior of Bonded Bars Post-Installed in Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction. *ACI Materials Journal*. 2019;116:179-91.
- [16] fib. *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. fédération internationale du béton: Ernst and Sohn; 2013.
- [17] Mahrenholtz C. *Seismic Bond Model for Concrete Reinforcement and the Application to Column-to-Foundation Connections [Thesis]*. Stuttgart: Universität Stuttgart; 2012.
- [18] Brantschen F. *Influence of Bond and Anchorage Conditions of the Shear Reinforcement on the Punching Strength of RC Slabs [Thesis]*. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne; 2016.
- [19] Brantschen F, Faria DMV, Fernández Ruiz M, Muttoni A. Bond Behaviour of Straight, Hooked, U-Shaped and Headed Bars in Cracked Concrete. *Structural Concrete*. 2016;17:799-810.
- [20] structures Dd. *Manuel de conception des structures*. Québec: Ministère des transports; 2017.
- [21] Raicic V, Tim I, Darby A, Mark E, Orr J. Effectiveness of the Deep Embedment (DE) Technique for Shear Strengthening of Reinforced Concrete Continuous T-beams. 8th International Conference on Advanced Composites in Construction (ACIC 2017). Sheffield, United Kingdom; 2017.
- [22] Fiset M, Bastien J, Mitchell D. Drilled-in Shear Reinforcement for Concrete Thick Slabs: Modelling Aspects. In: (CRIB) RCoCI, editor. *The 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*. Québec, QC: Université Laval; 2014. p. 481-6.
- [23] Bédard F. *Renforcement à l'effort tranchant des dalles de béton épaisses en condition de service [Thesis]*. Québec, QC: Université Laval; 2018.
- [24] Dutta B, Nath Nayak A, Dirar S, Nanda B, Theofanous M. Shear strengthening of continuous RC T-beams with deep embedded CFRP and steel bars: A numerical study. *Structures*. 2023;52:187-204.
- [25] Fernández Ruiz M, Muttoni A, Kunz J. Strengthening of Flat Slabs Against Punching Shear Using Post-Installed Shear Reinforcement. *ACI Structural Journal*. 2010;107:434-42.
- [26] Massicotte B. *Calcul des Structures en Béton Armé: Concepts de Base*. Laval, Québec: da Vinci; 2015.