

# Réparation des murs des écluses en BFUP

Alexandrine Maltais<sup>1</sup>, Nikola Petrov<sup>1</sup>, Michel Thibault<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Béton Provincial, Québec, Canada

<sup>2</sup> Voie maritime de fleuve St-Laurent, Montréal, Canada

## Résumé

À l'hiver 2017, la Voie maritime du Saint-Laurent a procédé à la réparation de 5 sections des murs adjacents aux portes des écluses. Ces réparations ont été réalisées en béton fibré à ultra hautes performances (BFUP).

Dans le cadre de l'entretien des écluses de la Voie maritime du Saint-Laurent, la pratique courante consistait à effectuer des réparations entièrement en béton armé en utilisant une formulation de béton traditionnel ou une formulation de béton à haute performance (BHP). Les récents progrès dans le domaine du BFUP prouvent que ce nouveau matériau permet d'améliorer la performance globale des réparations. L'objectif est de mettre en œuvre des réparations capables de dissiper l'énergie avant de se rompre lorsqu'un navire heurte le mur de l'écluse. De nombreux matériaux et de nombreuses méthodes de réparation ont été expérimentés dans le passé. Ceux-ci n'ont pas permis d'obtenir des réparations durables en raison de caractéristiques inadéquates de résistance au cisaillement et de résistance aux chocs du matériau utilisé pour la réparation. Ces besoins peuvent être efficacement satisfaits avec les BFUP grâce à leurs excellentes propriétés mécaniques et leur capacité de dissipation d'énergie. Pour analyser le comportement *in situ* des BFUP, deux formulations ont été étudiées: une formulation de 160 MPa en compression contenant 3% de fibre d'acier unidimensionnelle et une formulation de 120 MPa contenant 3,5% de fibres d'acier de deux longueurs différentes. Des réparations avec une profondeur moyenne de 700 mm ont été réalisées pendant la période de fermeture hivernale. La performance des réparations après une année complète démontre que les BFUP peuvent supporter efficacement les impacts des navires.

## 1. Introduction

L'Utilisation des BFUP est encore limitée aujourd'hui. Ce matériau est principalement utilisé pour la construction de nouveaux éléments d'une épaisseur maximale de 200 mm ou pour des réparations minces. Ce qui contraste avec le type de réparations effectuées aux écluses de la Voie Maritime du St-Laurent. Ces réparations ont une épaisseur minimale d'environ 500 mm.

Le réseau Grands Lacs-Voie maritime du Saint-Laurent est une voie navigable profonde qui s'étend sur 3 700 km (2 340 milles) entre l'océan Atlantique et la tête des Grands Lacs. La portion Voie maritime du Saint-Laurent s'étend de Montréal au milieu du lac Érié. Considérée comme une des plus grandes réalisations techniques du 20e siècle, la Voie maritime du Saint-Laurent comprend 13 écluses canadiennes et deux écluses américaines.

L'ensemble des écluses constitue le système de levage le plus spectaculaire au monde. Des navires mesurant jusqu'à 225,5 mètres de long (ou 740 pieds) et 23,8 mètres de large (ou 78 pieds) sont élevés régulièrement à plus de 180 mètres au-dessus du niveau de la mer, soit la hauteur d'un immeuble de 60 étages. Les navires sont deux fois plus longs et une fois et demie plus larges qu'un terrain de football et transportent l'équivalent de 25 000 tonnes métriques chacun.

Chaque écluse mesure 233,5 mètres de longueur (766 pieds), 24,4 mètres de largeur (80 pieds) et 9,1 mètres de profondeur (30 pieds). Une écluse se remplit d'environ 91 milles m<sup>3</sup> d'eau (24 million gallons) en seulement 7 à 10 minutes. La traversée d'une écluse dure environ 45 minutes.



**Fig. 1.** Réseau de la Voie Maritime

Ce réseau est ouvert à la navigation durant la période estivale. La période hivernale qui s'étend de la fin décembre au début mars laisse peu de temps pour permettre l'entretien des actifs des écluses. Les travaux d'entretien des murs des écluses sont exécutés uniquement pendant cette période hivernale.

Les projets de réfections des murs des écluses sont récurrents. Lors du passage des navires dans les écluses, il arrive souvent que les murs de béton soient percutés. Lors de ces impacts, l'énergie transmise au béton est considérable. Avec les années, les réparations à l'aide de béton armé conventionnel ou de béton autoplaçant n'ont pas permis d'obtenir des réparations durables. En janvier 2017, deux formulations de béton fibré ultra haute performance (BFUP) ont été utilisées pour la réfection de quatre sections de murs. L'objectif : obtenir des réparations de béton capable de résister à plusieurs impacts des navires.

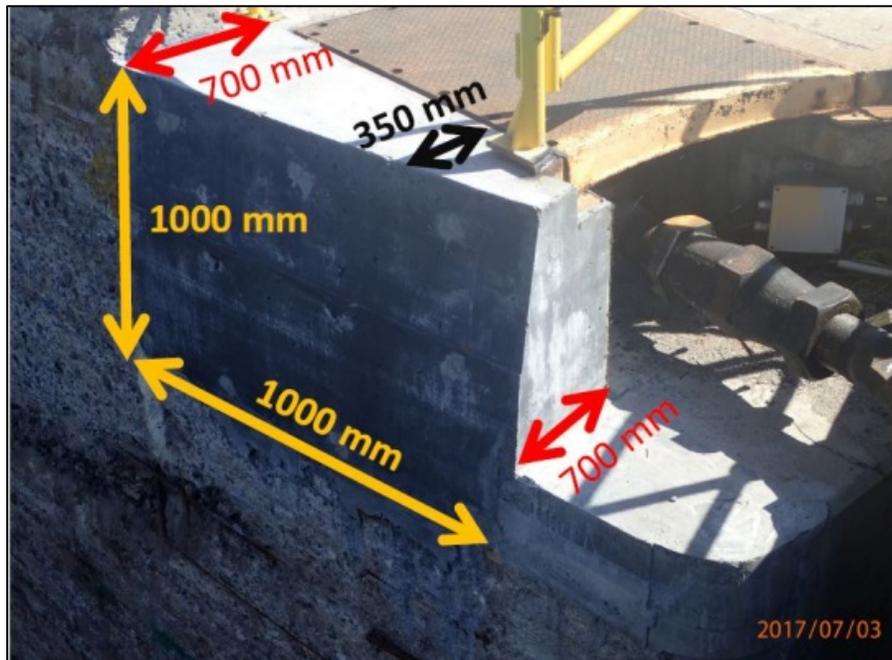
## **2. Développement des BFUP**

Dans les années 30, des efforts ont été déployés dans le but d'augmenter la résistance du béton. Dans les années 60, des valeurs de résistance à la compression allant jusqu'à 650 MPa ont été atteintes sur des échantillons comprimés et chauffés sous haute pression démontrant que le potentiel de la résistance de la pâte de ciment Portland était sous-exploité [1].

Dans le même ordre d'idée, Pierre Richard a inventé le béton à poudre réactive (BPR) dans les années 90. L'idée était de réduire la taille de toutes les particules solide composant le béton et ainsi assurer une meilleure homogénéisation de la matrice. Par conséquent, le BPR ne contient pas de gros granulats et la distribution granulaire est optimisée pour assurer une compacité maximale. Des traitements thermiques sont également utilisés pour réduire davantage la porosité et la perméabilité, et ainsi augmenter la résistance à la compression [1]. Un faible  $e/c$  ( $< 0.25$ ), un dosage élevé en superplastifiant, une grande quantité de fumée de silice et la compaction maximale des particules sont les caractéristiques principales des BPR. Afin de résoudre le problème de faible ductilité des BPR, des fibres métalliques ont été incorporées au mélange, ce qui a conduit au développement des BFUP.

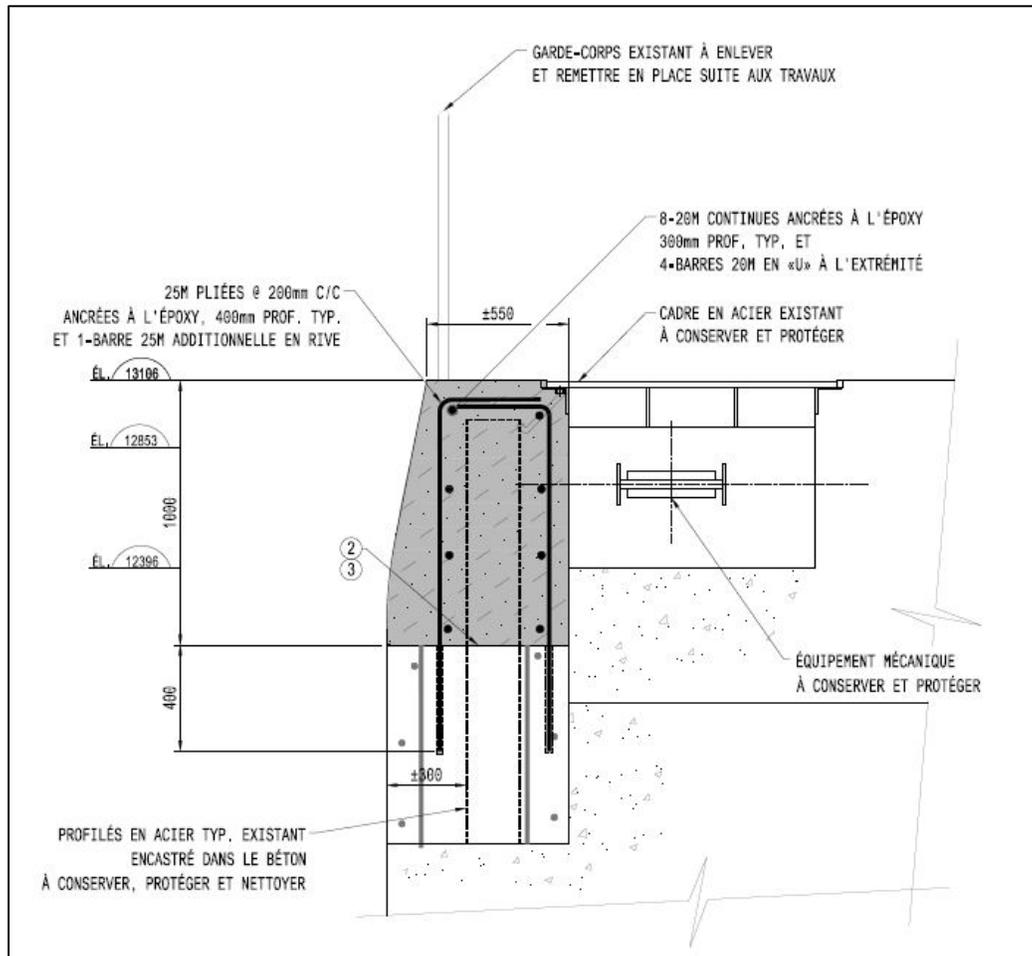
## **3. Les réparations**

À l'hiver 2017, un total de 5 réparations ont été réalisées en BFUP à l'écluse de Saint-Lambert dans la région de Montréal. La figure 2 illustre la géométrie typique des réparations effectuées.



**Fig. 2.** Géométrie typique des réparations

La figure 3 illustre les détails techniques des réparations effectuées. De dimension moyenne de  $1 \text{ m}^3$ , ce type de réparation est usuel lorsqu'un béton conventionnel est utilisé, mais atypique pour l'emploi des BFUP dues au coût considérable de ce matériau et aux chaleurs d'hydratation anticipées.



**Fig. 3.** Détail des réparations

Durant l'exécution de ces réparations, la température extérieure minimale était de  $-12^{\circ}\text{C}$ . Les BFUP utilisés pour les réparations ont été fabriqués au chantier à l'aide d'un malaxeur mobile ce qui a permis de fournir des mélanges quasi-autoplaçants. La mise en place des BFUP a été réalisée à l'aide d'un godet monté sur une benne chargeuse permettant de déposer le béton directement dans les coffrages en moins de 15 minutes après malaxage. Aucun moyen de consolidation mécanique (vibration, pilonnage ou autre) du béton n'était nécessaire en raison de la rhéologie autoplaçante des mélanges.

Une fois le bétonnage complété, des toiles isolantes et des appareils de chauffage ont été utilisés pour maintenir une température suffisante afin d'éviter que le béton frais ne gèle.

#### 4. Les Formulations

Deux formulations de BFUP ont été sélectionnées pour le projet des réparations des coins de portes de l'écluse de St-Lambert à Montréal. Elles sont nommées 160/3 et 120/3.5. La formulation 160/3 est un mélange typique de BFUP ayant un rapport E/MC de 0,19 et contenant une quantité de

matière cimentaire (MC) de  $1150 \text{ kg/m}^3$ . Le ciment hydraulique composé utilisé contient plus de 15% de fumée de silice. Ce mélange contient 3% volumétrique de fibres d'acier de 0,2 mm de diamètre et 13 mm de longueur. La formulation 120/3.5 a été développée pour les besoins spécifiques du projet. Les exigences particulières étaient une haute résistance en traction, en flexion et à l'impact tout en assurant une réduction de la température maximale qui se développe durant la prise et le durcissement du béton. Cette formulation contient 3,5% volumétrique d'un mélange de 2 fibres d'acier bidimensionnelles. Le E/MC est de 0,25 et la teneur en MC est de  $800 \text{ kg/m}^3$ .

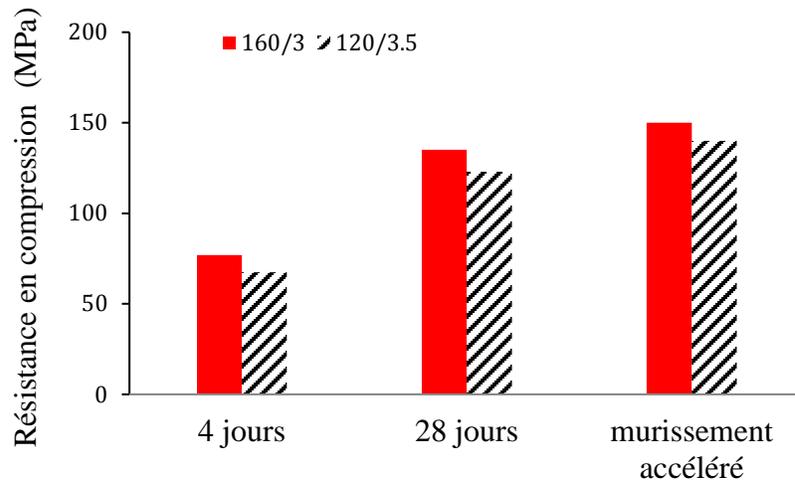
Pour diminuer la température maximale au centre de la réparation, la température initiale de deux mélanges de BFUP utilisés était située entre  $8 \text{ }^\circ\text{C}$  et  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Cette basse température a également facilité la mise en place des BFUP, car la diminution de température diminue la viscosité des BFUP.

## **5. Propriétés des mélanges de BFUP**

### **5.1. Résistance en compression**

La résistance en compression a été déterminée à 4 jours et à 28 jours sur des cubes de 50 mm d'arête selon la méthode d'essai ASTM C109/C109M. Après le démoulage à 24 heures, les cubes ont été conservés à une température contrôlée de  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  et à une humidité relative contrôlée de 100%. De plus, des cubes ont été soumis à un mûrissement accéléré sous l'eau et à température contrôlée de  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  pendant 72 heures. Les cubes ont, ensuite, subi un refroidissement graduel durant 24 heures jusqu'à la température de  $20^\circ\text{C}$ . Après le refroidissement, la résistance en compression des cubes ayant subi un mûrissement accéléré a été déterminée. Pour chaque échéance, 3 cubes ont été soumis à l'essai.

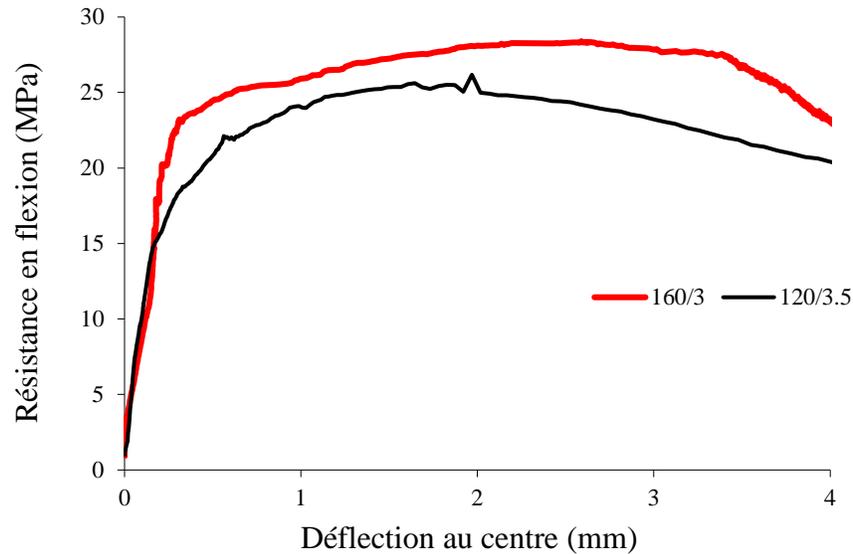
Les résultats de résistance en compression pour les 2 formulations de BFUP utilisées sont présentés sur la figure 4. La résistance en compression de la formulation 160/3 est de  $77 \pm 3 \text{ MPa}$  à 4 jours,  $135 \pm 1 \text{ MPa}$  à 28 jours, et  $150 \pm 6 \text{ MPa}$  après le mûrissement accéléré. La résistance en compression de la formulation 120/3.5 est de  $67 \pm 3 \text{ MPa}$  à 4 jours,  $123 \pm 3 \text{ MPa}$  à 28 jours, et  $140 \pm 2 \text{ MPa}$  après le traitement thermique.



**Fig. 4.** Résistance en compression

## 5.2. Flexion

La détermination de la résistance en flexion est effectuée selon la procédure de ASTM C1609 (Standard Test Method for flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete) en utilisant des prismes de 150×400×50 mm de dimensions confectionnées sur le chantier. Après le démoulage à 24 heures, les éprouvettes ont été gardées dans la chambre humide à  $23 \pm 2$  °C jusqu'à l'essai à 28 jours. Les éprouvettes, pour la détermination de la résistance en flexion, ont été confectionnées en position horizontale (le côté de 50 mm est la hauteur lors de leur fabrication). La résistance en flexion a été déterminée sur trois éprouvettes pour chaque formulation. L'essai est effectué en utilisant le montage à quatre points. La distance entre les points de chargement est de 100 mm. La déflexion de l'éprouvette est mesurée à l'aide d'un transformateur différentiel à variation linéaire (LVDT) et d'une résolution  $10^{-6}$  mm attaché à l'axe neutre de l'éprouvette. Le taux de chargement était de 0,01 kN/s.

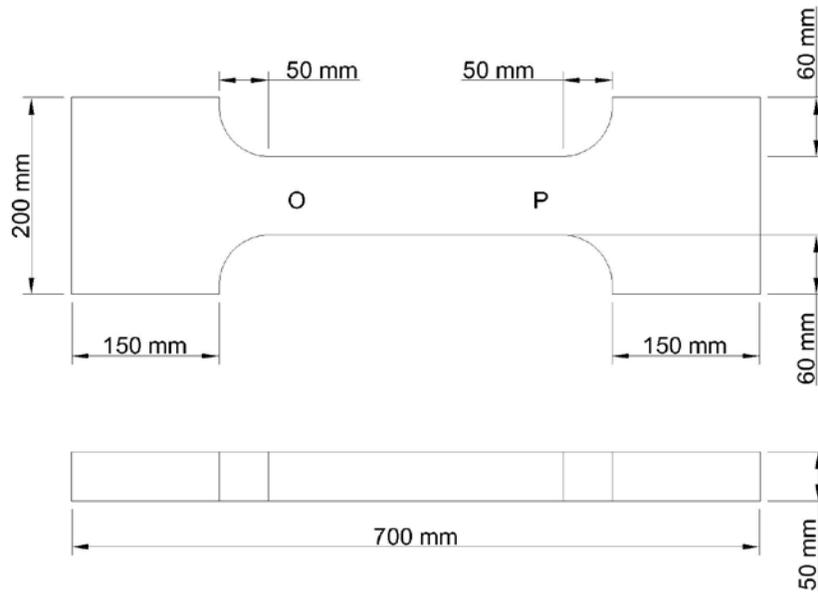


**Fig. 5.** Résistance en flexion (résultat individuel)

La résistance maximale en flexion a été déterminée après l'apparition de la première fissure. Le module de rupture moyen déterminé sur les trois éprouvettes de mélange 160/3 est de  $28,8 \pm 1$  MPa, tandis que celui déterminé sur les trois éprouvettes de mélange 120/3.5 est de  $26,8 \pm 2$  MPa. La relation entre les contraintes et la déflexion durant l'essai est présentée sur la figure 5.

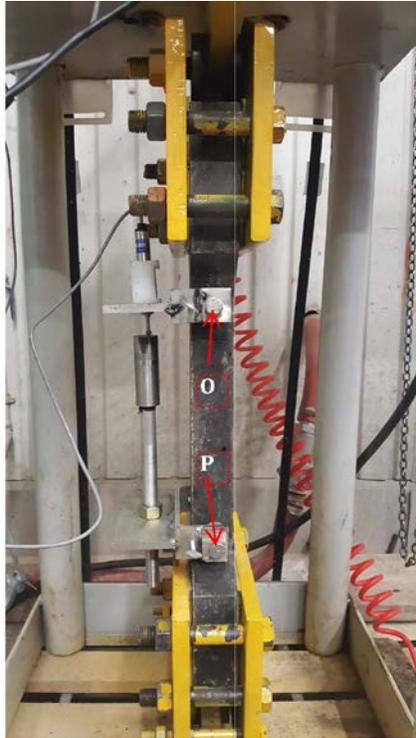
### 5.3. Résistance en traction (directe)

L'essai de traction directe est exécuté selon la norme SIA 2050 – Appendix D. La géométrie des échantillons fabriqués horizontalement est présentée sur la figure 6. Après le démoulage à 24 heures et jusqu'à l'exécution de l'essai à 28 jours. Les échantillons ont été gardés sous un environnement d'humidité relative de 100% et une température de  $23 \pm 2$  °C. Un LVDT a été installé sur la partie droite de l'échantillon, fixé aux points O et P présentés sur la figure 7. Le taux de chargement était de 0,01 kN/s

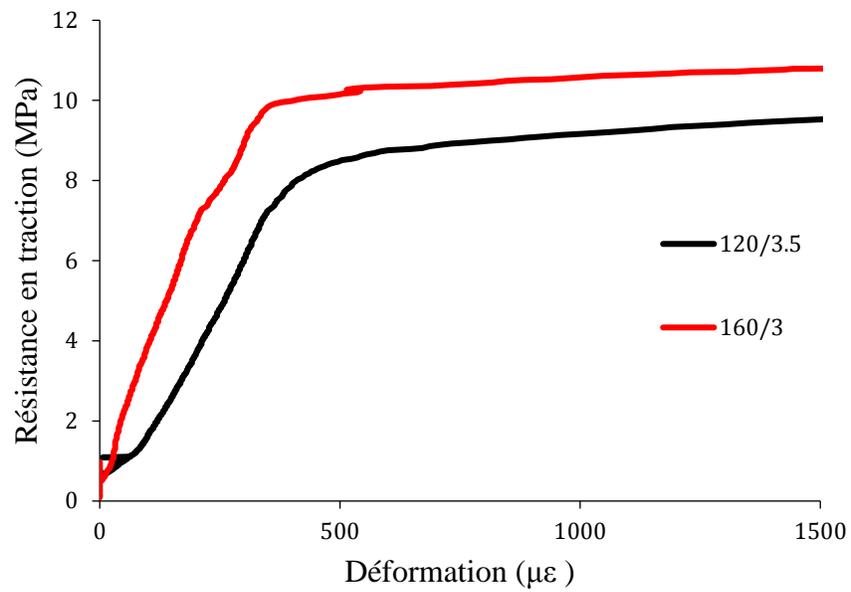


**Fig. 6.** Schéma des éprouvettes pour l'essai de traction directe

La résistance en traction (directe) du BFUP 160/3 est de 10,0 MPa à 28 jours. Ce résultat présente la moyenne obtenue sur 5 échantillons. L'étendue des résultats est de 1,4 MPa et l'écart type de 0,5 MPa. La résistance moyenne obtenue à partir de 6 résultats individuels du mélange 120/3.5 est de 8,0 MPa avec l'étendue de 4,3 MPa et un écart type de 1,5 MPa. Un exemple des courbes typiques du rapport entre les contraintes et les déformations obtenu durant l'essai de traction directe effectué sur un échantillon est présenté sur la figure 8.



**Fig. 7.** Montage de l'essai de traction directe (SIA 2052)



**Fig. 8** Les courbes typiques de 2 mélanges caractérisés enregistrés de BFUP (résultats individuels)

## 5.4. Retrait

Les mesures de retrait ont été effectuées selon la ASTM C157. La méthode utilisée a été modifiée concernant les dimensions des éprouvettes et le régime de mûrissement. En effet, les prismes en BFUP de dimensions 25×25×280 mm ont été utilisés afin de diminuer l'élévation de la température [2] ainsi que de diminuer l'effet de gradient d'humidité lors du séchage. Les différents régimes de mûrissement appliqués aux éprouvettes après le démoulage sont présentés au tableau 1. Deux prismes ont été utilisés pour chaque régime de mûrissement. Les mesures ont été effectuées à 3, 7, 14, 21, 28 et 90 jours. Il est important de noter que la comparaison des résultats présentés sur les figures 9 et 10 pourrait s'avérer fastidieuse considérant les différents régimes de mûrissement.

Tab. 1. Régimes des régimes de mûrissement lors des mesures de retrait

No	Désignation	Murissement
1	(s)	Scellé après le démoulage à 24 heures
2	(4)	4 jours à 100% d'humidité relative et à 50% par la suite
3	(7)	7 jours à 100% d'humidité relative et à 50% par la suite
4	(14)	14 jours à 100% d'humidité relative et à 50% par la suite

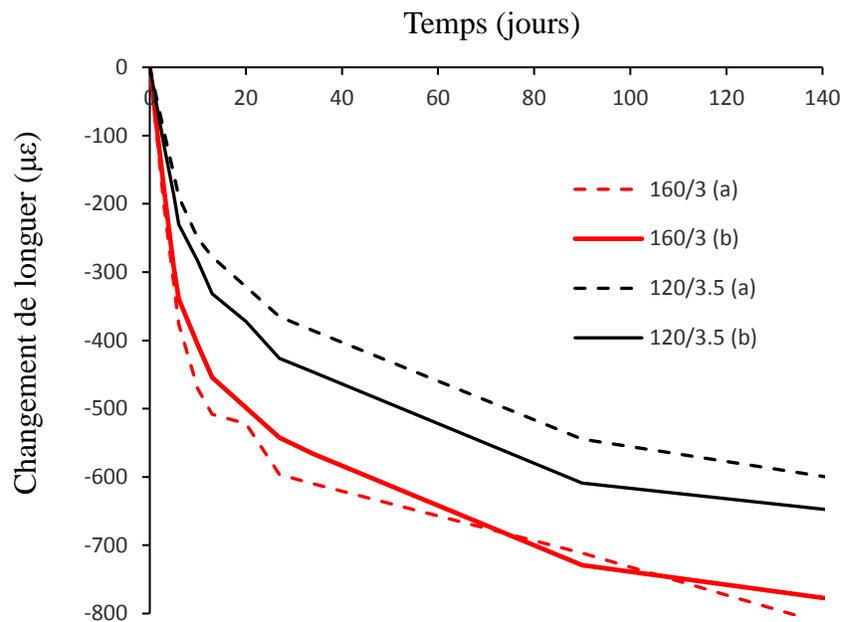
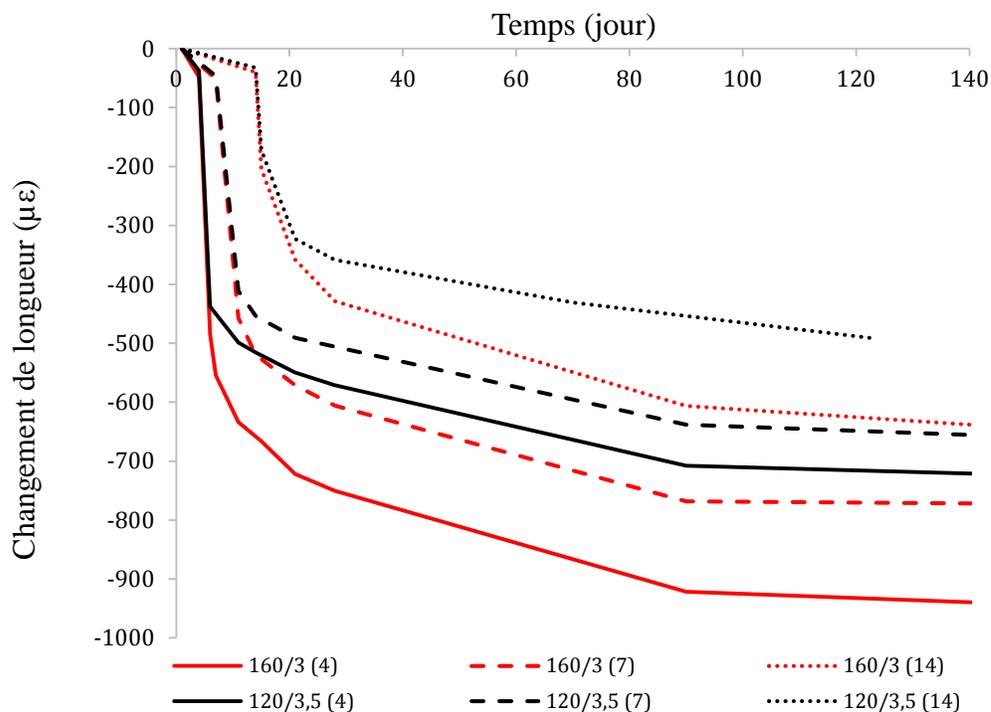


Fig. 9 Changement de longueur des éprouvettes scellées (retrait endogène)

Les résultats des mesures de changement de longueur effectuées sur deux éprouvettes (a et b) scellées (retrait endogène) sont présentés sur la figure 9. La moyenne du retrait endogène mesurée à 28 jours est de  $570 \pm 40$  et  $350 \pm 40$   $\mu\epsilon$  pour les formulations 160/3 et 120/3.5 respectivement (*note*:  $1 \mu\epsilon = 1 \times 10^{-6}$ ). Plus de 90 jours ont été nécessaires pour que le retrait endogène se stabilise,

ce qui est la conséquence du faible du E/CM des BFUP. Il est possible que la valeur stabilisée soit obtenue avant 90 jours, mais avec les mesures ponctuelles et l'absence des mesures entre 28 et 90 jours, ceci ne peut pas être démontré dans cette étude.

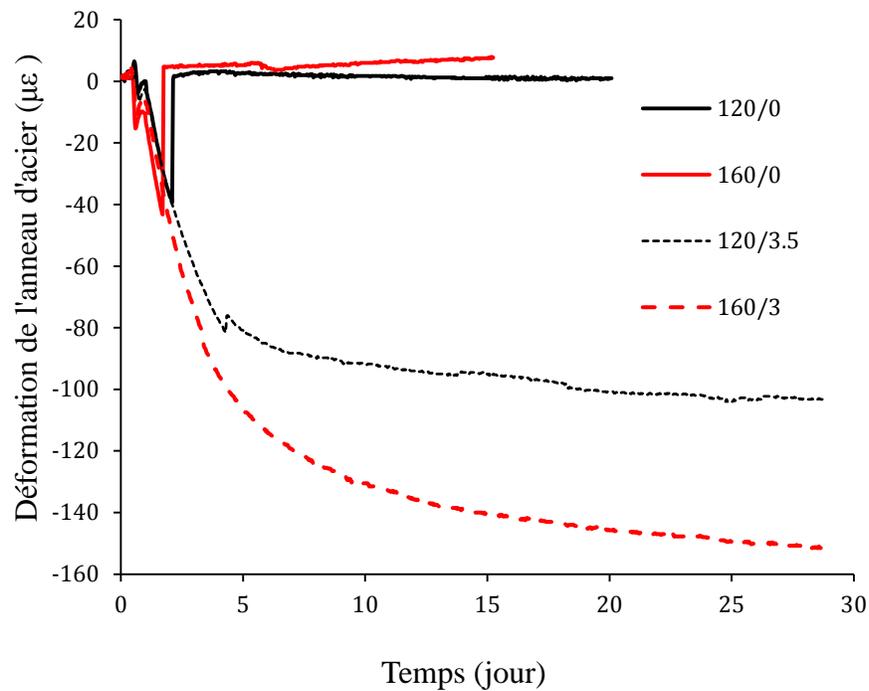


**Fig. 10** Changement de longueur des éprouvettes soumise au séchage

Les résultats d'essais de retrait total sont présentés à la figure 10. La valeur ultime de retrait diminue, pour les deux formulations de BFUP étudiées, en fonction de la durée de mûrissement humide.

Afin d'évaluer le risque de fissuration associé au retrait relativement élevé des BFUP et l'efficacité des fibres à limiter ce risque de fissuration, l'essai de retrait restreint a été effectué selon la ASTM C1581. Cet essai a été effectué sur les deux matrices sans fibres des BFUP, 120/0 et 160/0, ainsi que sur les formulations 120/3.5 et 160/3. Les résultats de l'essai de retrait restreint sont présentés à la figure 11.

La méthode d'essai de retrait restreint sert à évaluer la sensibilité d'une formulation de béton à la fissuration sur une base comparative. Deux anneaux par formulation ont été testés. Après le démoulage à  $24 \pm 0,5$  heures, les éprouvettes ont été gardées dans un environnement contrôlé à une température de  $23 \pm 2$  °C et une humidité relative de 50%. La déformation de l'anneau d'acier a été mesurée à l'aide de quatre extensomètres électroniques et les données ont été enregistrées aux 5 minutes. Les mesures de déformations de l'anneau d'acier permettent de déterminer le moment de fissuration.

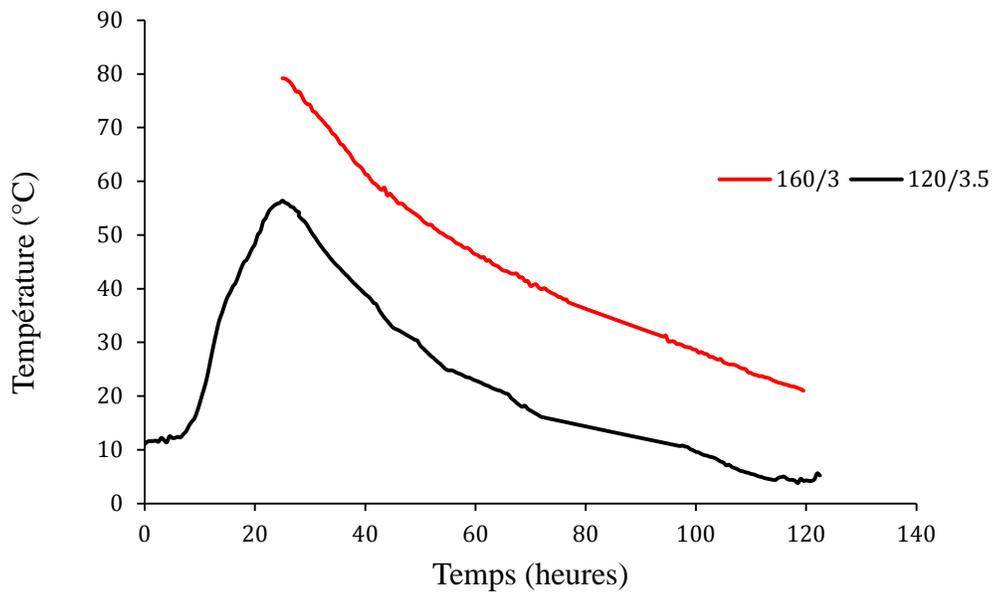


**Fig. 11** Retrait restreint (sensibilité à la fissuration)

Les anneaux faits avec les formulations 120/0 et 160/0 (sans fibres) se sont fissurés après seulement 36 et 48 heures, tandis que ceux fabriqués avec les formulations de BFUP 120/3.5 et 160/3 n'ont pas fissuré durant les 28 jours de l'essai. De plus, les contraintes déterminées à 28 jours pour les BFUP sont de 2 à 4 fois plus élevées que les contraintes maximales déterminées pour les mélanges sans fibre au moment de fissuration.

### 5.5. Élévation de température dans les réparations

La température au centre des réparations a été mesurée à l'aide des thermocouples. Les courbes de développement de température au centre des réparations effectuées avec les formulations 120/3.5 et 160/3 sont présentées à la figure 12. La température au centre de réparation fabriquée avec la formulation 120/3.5 n'a pas dépassé 60 °C. Des problèmes d'enregistrements des températures ont empêché d'enregistrer les 24 premières heures suivant la mise en place pour la formulation 160/3. Par contre, il peut être conclu que la température au centre de réparation effectuée avec la formulation 160/3 a dépassé les 80 °C.



**Fig. 12** Température aux centres des réparations

## 6. Comportement des réparations après une année en service

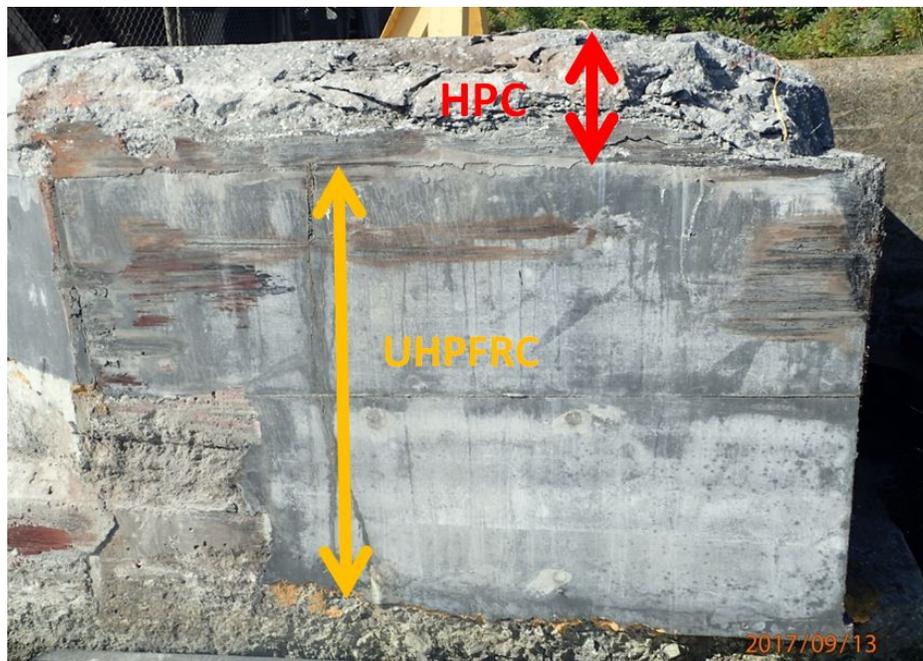
Durant la saison de navigation suivant les travaux de réparation, la réparation la plus sollicitée a été frappée par les navires à au moins à cinq reprises. Il est à noter qu'en même temps que les réparations étaient effectuées avec les BFUP, un béton à haute performance (HPC) a également été utilisé pour la réparation de haut du mur (la partie arrondie sur la figure 13). Cette solution était jugée plus appropriée et moins risquée considérant le manque d'expérience relatif au comportement des réparations en BFUP.

Après les 5 frappes répertoriées, la partie de la réparation en HPC a été complètement détruite, tandis que celle en BFUP montrait des dommages limités et acceptables concentrés dans la zone d'impact comme démontré à la figure 14. De plus, comme démontré à la figure 15, la zone endommagée de BFUP demeure attachée au reste de la structure démontrant un ancrage efficace assuré par les fibres.

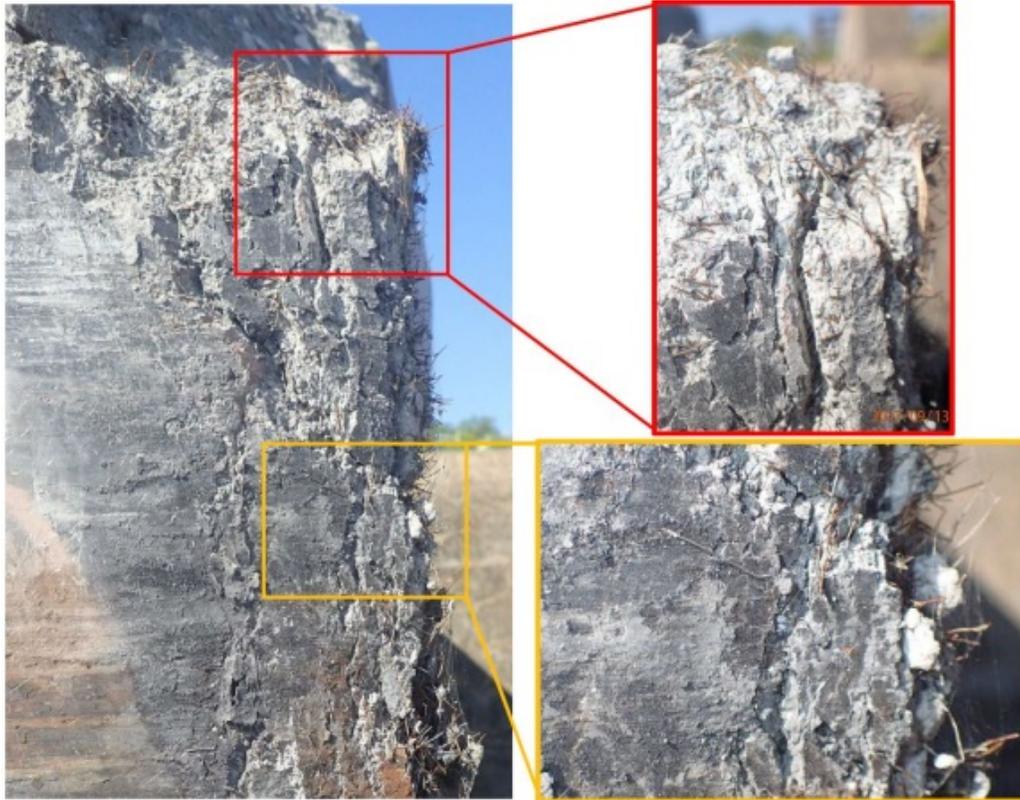


**Fig. 13** Réparation de coins de mur avec le BFUP et HPC

La performance des réparations en BFUP, après une année de service, a largement dépassé les attentes. Le BFUP est en mesure de résister à l'énergie transmise aux murs lors des impacts des navires. La réparation en BFUP se fissure, mais reste intégralement en place toute en assurant la fonctionnalité de l'installation. Seulement quelques petites particules n'excédant pas la taille de 20 mm se sont détachées de la surface réparée.



**Fig. 14** Aspect du coin de mur réparé après une année en service



**Fig. 15** Dommages acceptables des réparations en BFUP après plusieurs frappes des navires

## 7. Discussion

Selon les propriétés mécaniques des deux formulations de BFUP utilisée, la formulation 120/3.5 affiche une diminution de l'ordre de 10% à 15% des résistances en comparaison avec la formulation 160/3. Ceci est principalement attribuable au E/CM plus élevé [3], à la plus faible teneur en matière cimentaire et l'interface fibre/pâte moins dense [4]. De plus, la variation plus élevée des résultats est obtenue pour les résultats des essais effectués sur le BFUP 120/3.5 comparativement aux résultats des essais sur le BFUP 160/3. Cette variation plus élevée est due à l'introduction d'un paramètre de plus dans le BFUP 120/3.5 qui est le second type (longueur) de fibres. De plus, l'augmentation du volume total de fibre diminue l'ouvrabilité de BFUP, ce qui à son tour affecte la distribution des fibres dans la matrice, la facilité de mise en place et le degré de consolidation [5, 6]. L'orientation des fibres est un facteur important affectant la résistance en traction des BFUP [5-8]. Par contre, avec le malaxage et la procédure de mise en place adéquate, le BFUP 120/3.5 peut développer la résistance en traction semblable à celle de BFUP 160/3.

Moins de retrait endogène a été mesuré sur le BFUP 120/3.5 comparativement à celui du BFUP 160/3 ce qui principalement attribuable au E/CM plus grand et la teneur en CM plus faible [11].

Le retrait total sous les conditions de séchage (environnement à 50 % d'humidité relative) du BFUP 120/3.5 est également plus faible que celui du BFUP 160/3. Le mûrissement humide diminue le retrait de BFUP de façon significative, comme illustré sur la figure 10. En effet, lorsqu'un mûrissement humide est appliqué pendant 14 jours, le retrait total du BFUP est réduit de 30% comparativement au retrait mesuré sur le BFUP ayant subi le mûrissement humide de 4 jours. Cette réduction de retrait est la conséquence d'une période plus longue durant laquelle les pores présents dans la matrice demeurent saturés en eau en réduisant ainsi une partie du retrait endogène. De plus, pendant cette période, les résistances mécaniques de BFUP augmentent et la pâte se densifie ce qui résulte d'une résistance plus élevée de la matrice à se contracter. Le mûrissement humide du BFUP est alors recommandé afin de diminuer le risque de fissuration de ce dernier. Par contre, un teneur en fibre d'acier de 3,5% dans le BFUP 120/3.5 et de 3% dans le BFUP 160/3 a prévenu la fissuration pour une période au-delà de 28 jours d'essai de retrait restreint, sans aucun mûrissement humide des échantillons. En se basant sur ces résultats, il peut être conclu qu'un volume de fibre de 3% et 3,5% dans les BFUP 160/3 et 120/3.5 sont suffisants pour prévenir la fissuration causée par le retrait des BFUP et qu'un volume de fibre plus grand serait inutile, toujours dans l'aspect de prévention de fissuration causée par le retrait (sous condition de séchage sous un environnement ayant l'humidité relative de 50% minimum).

Malgré que les propriétés mécaniques du BFUP 160/3 soient légèrement supérieures à celles du BFUP 120/3.5, un comportement comparable est observé sur les réparations effectuées avec les deux formulations. La température maximale au-delà de 80 °C atteinte dans le centre de la réparation fabriqué avec le BFUP 160/3 évoque un risque de formation différée de l'ettringite (DEF) à long terme. Ce risque est toutefois faible à cause de la très faible perméabilité à l'eau des BFUP et de la présence des ajouts cimentaires dans le liant utilisé [12]. Cependant, des recherches futures seront nécessaires afin de déterminer plus précisément le risque d'apparition de DEF dans les éléments massifs en BFUP.

La température maximale inférieure à 60 °C atteinte dans les réparations faites avec le BFUP 120/3.5 élimine pratiquement le risque de DEF.

## **8. Conclusion**

L'observation des comportements en service des réparations effectuées permet de conclure que le BFUP est un matériau de choix pour les réparations soumises aux chocs répétitifs. C'est un matériau qui offre de nouvelles possibilités, autant dans le domaine des réparations que dans le domaine des applications sous différentes conditions de sollicitation en service. Pour les propriétaires et les chargés d'entretien des infrastructures importantes, comme la Voie Maritime du St-Laurent, l'utilisation de BFUP pour la réparation des éléments critiques augmente l'efficacité et la sécurité des opérations en assurant ainsi des économies significatives à long terme.

Afin de diminuer le risque de fissuration des BFUP dû au retrait, un mûrissement humide prolongé est souhaitable.

L'augmentation de la teneur en fibre au-delà des valeurs utilisées dans la présente étude, afin de diminuer le risque de fissuration due au retrait, peut s'avérer inutile. En effet, un volume de fibre encore plus faible pourrait être suffisant, mais les recherches supplémentaires sont nécessaires pour déterminer le volume minimal et suffisant pour prévenir la fissuration due au retrait des BFUP.

Il est possible et souhaitable d'adapter les caractéristiques de BFUP pour chaque usage. Par exemple, il peut être approprié de concevoir un BFUP avec des résistances mécaniques moindres pour augmenter l'ouvrabilité du matériau, faciliter sa mise en place et diminuer la température maximale développée lors de l'hydratation de ciment.

## 9. Remerciements

Sans la collaboration des concepteurs et de l'entrepreneur, la réussite de ce projet de réfection de béton novateur n'aurait pas été possible. Les auteurs tiennent donc à remercier le personnel du département d'ingénierie de la région Maisonneuve de la Corporation de Gestion de la Voie Maritime du St-Laurent, ainsi que le personnel de Martel Construction qui ont participé à ce projet.

## 10 Références

1. P. Richard, M. Cheyrezy, Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research* **25**, 1501-1511 (1995).
2. A. M. Soliman, M. L. Nehdi, Effects of shrinkage reducing admixture and wollastonite microfiber on early-age behavior of ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites* **46**, 81-89 (2014).
3. W. Piasta, B. Zarzycki, The effect of cement paste volume and w/c ratio on shrinkage strain, water absorption and compressive strength of high performance concrete. *Construction and Building Materials* **140**, 395-402 (2017).
4. S. Abdallah, M. Fan, D. W. A. Rees, Bonding Mechanisms and Strength of Steel Fiber-Reinforced Cementitious Composites: Overview. *Journal of Materials in Civil Engineering* **30**, (2018)
5. D.-Y. Yoo, S.-T. Kang, Y.-S. Yoon, Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC. *Construction and Building Materials* **64**, 67-81 (2014).
6. S.-T. Kang, J.-K. Kim, Investigation on the flexural behavior of UHPCC considering the effect of fiber orientation distribution. *Construction and Building Materials* **28**, 57-65 (2012).
7. L. F. M., Duque and B. Graybeal, Fiber orientation distribution and tensile mechanical response in UHPFRC. *Mater. Struct.* **55**, 1-17 (2017).
8. D.-Y. Yoo, N. Banthia, Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cement and Concrete Composites* **73**, 267-280 (2016).

9. V. Afroughsabet, L. Biolzi, P. J. M. Monteiro, The effect of steel and polypropylene fibers on the chloride diffusivity and drying shrinkage of high-strength concrete. *Composites Part B: Engineering* **139**, 84-96 (2018).
10. P. Choi, K.-K. Yun, J. H. Yeon, Effects of mineral admixtures and steel fiber on rheology, strength, and chloride ion penetration resistance characteristics of wet-mix shotcrete mixtures containing crushed aggregates. *Construction and Building Materials* **142**, 376-384 (2017).
11. E. Ghafari et al., Effect of supplementary cementitious materials on autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials* **127**, 43-48 (2016).
12. Y. Amine, N. Leklou, O. Amiri, Effect of supplementary cementitious materials (scm) on delayed ettringite formation in heat-cured concretes. *Energy Procedia* **139**, 565-570 (2017).