

---

# Analyse de la propagation de fissure dans le béton recyclé par la méthode de corrélation des images

**Menghuan Guo, Syed Yasir Alam, Frédéric Grondin, Ahmed Loukili**

*LUNAM Université, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR-CNRS 6183, Ecole Centrale de Nantes, 1 rue de la Noë, 44321 Nantes, France – e-mail:*

{menghuan.guo ; syed-yasir.alam ; frederic.grondin ; ahmed.loukili} @ec-nantes.fr

---

*RÉSUMÉ. Les comportements mécaniques à la rupture de bétons constitués de granulats recyclés (BGR) et de sables recyclés (BSR) ont été étudiés en utilisant une analyse synchronisée d'essais en flexion trois points avec la technique de corrélation d'images. Les profils d'ouverture de fissure et les zones de localisation des déformations (ZLD) ont été calculés pour analyser et comparer la zone de traitement de la fissure pour chaque formulation à des niveaux de chargement importants. Le BGR et le BSR semblent se comporter de la même manière que le béton de granulats naturels (BGN), mais on observe que les fissures pour le BGR apparaissent plus tôt et se développent plus rapidement par rapport au BGN. Les gravillons recyclés aident à générer une zone de traitement de la fissure plus longue et plus large, ainsi qu'une valeur de déformation plus élevée, alors que le sable recyclé conduit à une ZLD plus large.*

*ABSTRACT. The mechanical behaviors of recycled aggregate concrete and recycled sand concrete beams under three-point bending test were investigated using synchronized analysis of fracture behavior with Digital Image Correlation technique. The crack opening profiles and strain localization zones were calculated to analyze and compare the fracture process zone of each concrete mixture beam at important loading stages. Although the global mechanical response of both recycled aggregate concrete and recycled sand concrete is similar compared to natural aggregate concrete, the fracture growth is distinctive for each concrete type. Cracking in recycled aggregate concrete initiates earlier and develops faster compared to natural aggregate concrete. The recycled coarse aggregates cause the formation of a longer and wider fracture process zone and a higher strain value. The recycled sand also leads to a wider strain localization zone.*

*MOTS-CLÉS : Béton aux granulats recyclés, béton aux sables recyclés, corrélation d'images, localisation des déformations, fracture.*

*KEY WORDS: Recycled aggregate concrete, recycled sand concrete, digital image correlation, strain localization, fracture.*

---

## 1. Introduction

Avec la crise croissante de l'élimination des déchets et l'épuisement des matériaux de construction naturels l'utilisation de béton recyclé a été préconisée durant les trois dernières décennies. Des recherches sur les propriétés mécaniques, la durabilité et la performance structurelle du BGR ont été réalisées dans le monde [XIA 12]. Tout d'abord, il est indiqué qu'il existe une teneur élevée en impuretés variées, d'ancien mortier à la surface des granulats recyclés et de la forte porosité des granulats recyclés [YAN 08]. En outre, les granulats recyclés ont une absorption d'eau plus importante et une densité plus faible par rapport aux granulats naturels [YAN 08] [EVA 10]. Deuxièmement, Tam et al. [TAM 05] ont trouvé que le BGR a une microstructure beaucoup plus complexe que celle du BGN. Deux zones de transition interfaciale existent dans le BGR, une entre les granulats recyclés et la nouvelle matrice de mortier et l'autre entre les granulats recyclés et le ancien mortier joint [TAM 05]. En outre, Xiao et al. [XIA 12] ont observé que les propriétés mécaniques et la durabilité du BGR sont généralement plus faibles par rapport à ceux du BGN. Pourtant Manzi et al. [MAN 13] ont conclu que les microstructures denses du BGR peuvent être obtenues avec un assortiment approprié de granulats recyclés.

L'utilisation des sables recyclés n'est généralement pas recommandée car elle croit à compromettre de façon significative les propriétés mécaniques du béton [RIL 94]. L'enquête menée dans la dernière décennie a conclu qu'il est raisonnable de contenir une proportion de sables recyclés dans le béton [EVA 10] [EVA 07]. Surtout en raison des implications économiques liées à la pénurie de sables naturels appropriés pour la production de béton [MAN 13] [ZEG 11], le potentiel de l'utilisation de sables recyclés est encore prometteur et attrayant.

De nombreuses études ont été menées pour étudier les propriétés de rupture de structures en béton traditionnel. Cependant, peu de recherches ont été menées dans ce sens sur le BGR. Ce travail tente de fournir des indications sur le mécanisme de rupture des poutres en BGR et BSR en comparant les différences dans les processus de dégradation entre le BGR, le BSR et le BGN avec la technique de corrélation d'images. Des essais en flexion en trois points ont été réalisés en utilisant l'observation synchronisée par la technique de corrélation d'images [ALA 14] [ALA 12]. Celle-ci fournit des mesures du champ de déplacement à haute résolution sur la surface de l'échantillon; ensuite les profils d'ouverture de fissure et le développement de déformation peuvent être déterminés [ALA 14] [ALA 13].

## 2. Programme expérimental

### 2.1. Propriétés des matériaux

Le béton est composé de granulats calcaires concassés 4/10 et 6,3/20, de granulats recyclés 4/10 et 10/20, du sable semi-concassé lavé 0/4, de sables recyclés 0/4 et d'un ciment CEM II/A-L 42.5N de Rochefort (Tableau 1). Tous les granulats utilisés sont saturés en eau. De plus, le filler calcaire Betocarb HP-OG d'Omya a été ajouté pour améliorer le squelette granulaire des bétons. Un superplastifiant MC PowerFlow 3140 a été utilisé pour améliorer la maniabilité du béton frais. Trois taux de substitution de granulats recyclés en masse totale de granulats dans les mélanges de béton (0, 30% et 100%), et un type de BSR avec 30% de sable recyclé en masse totale de sable ont été utilisés dans cette analyse. Tous les mélanges de béton ont été élaborés pour avoir la même gamme de résistance à la compression 25-30 MPa avec des éprouvettes cylindriques et la même maniabilité définie par un affaissement de 20 cm. La présence d'une fine couche d'ancien mortier autour des granulats recyclés peut influencer ces valeurs et il a été nécessaire d'ajuster légèrement les quantités d'eau, de ciment et de filler calcaire pour les atteindre.

### 2.2. Procédure expérimentale

Les essais de rupture en flexion trois points sont réalisés à 28 jours sur des poutres de dimensions 10×20×80 cm<sup>3</sup> (largeur × hauteur × longueur) avec une profondeur d'entaille de 4 mm. Les essais sont réalisés avec une presse Instron de capacité 160 KN. Le chargement est piloté par l'ouverture d'entaille CMOD (Crack Mouth Opening Displacement) avec une vitesse constante de 0,2 μm/s et la flèche est mesurée au milieu de la poutre à l'aide d'un capteur laser sans contact (Figure 1).

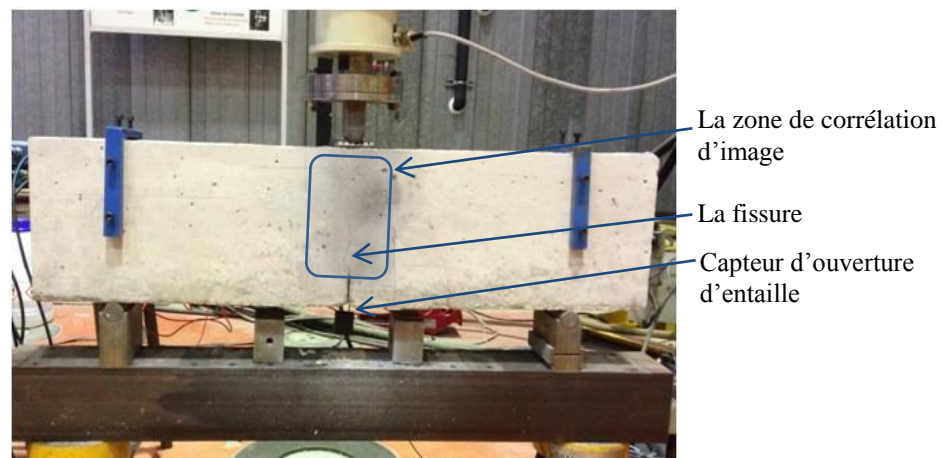
### 2.3. Corrélation d'image

Dans le programme expérimental, des images numériques ont été acquises continuellement pendant le test de chargement. Un appareil photo numérique de résolution de 2452 × 2056 pixels et une lentille macro de 50 mm a été utilisé pour capturer des images de la poutre. Un motif moucheté de peinture noire et blanche a été pulvérisé sur la surface de l'échantillon pour améliorer la résolution du déplacement [ALA 14]. Une lampe a été utilisée pour augmenter la luminosité des images. Pour chaque poutre, l'appareil a été monté de façon à imager une zone d'environ 110 × 160 mm<sup>2</sup> au-dessus de l'entaille. À cet endroit, l'ouverture d'entaille et le profil de fissure initiale ont été capturés. La résolution pour chaque éprouvette était d'environ 72 μm /pixel; ce qui a été jugé suffisant

pour déterminer une mesure de déplacement avec une précision de  $2 \mu\text{m}$  [ALA 14]. Les images ont été prises à une allure d'une image par seconde.

**Tableau 1.** Formule des bétons.

Constituant ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	B-N-N	B-N-30R	B-N-100R	B-30R-N
Eau/ Ciment	0.64	0.65	0.65	0.65
Eau	180	185	189	185
Ciment	270	276	282	276
Sable 0/4 mm	780	813	806	549
Sable recyclé 0/4 mm	-	-	-	235
Gravier 6.3/20 mm	820	462	-	829
Gravier 4/10 mm	267	228	-	190
Gravier recyclé 10/20 mm	-	296	701	-
Gravier recyclé 4/10 mm	-	-	163	-
Filler calcaire	45	31	31	31
Superplastifiant	1.31	1.51	1.4	1.16



**Figure 1.** Dispositif d'essais de flexion trois points.

### 3. Résultat expérimental et discussion

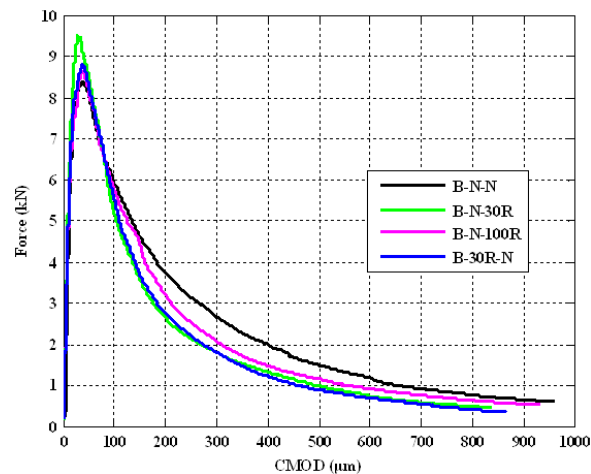
#### 3.1. Propriétés mécanique du béton

La détermination des propriétés mécaniques est menée sur des éprouvettes cylindriques  $\phi 11 \times 22 \text{ cm}^2$  à 28 jours. La résistance en traction par fendage  $f_{t28}$  est déterminée à partir de l'essai brésilien et le module d'Young ( $E_{dyn}$ ) à l'aide du Grindosonic. Toutes les mesures sont réalisées sur deux échantillons et les valeurs moyennes des propriétés mécaniques sont données dans le Tableau 2.

**Tableau 2.** Propriétés mécaniques des bétons.

Propriétés	$f_{c28}$ (MPa)	$f_{i28}$ (MPa)	$E_{dyn}$ (GPa)
B-N-N	28.1	2.48	40.9
B-N-30R	26.7	2.46	37.4
B-N-100R	25.2	2.40	33.1
B-30R-N	27.5	2.45	35.6

Ces résultats donnent les mêmes conclusions que celles notées dans la littérature,  $f_{c28}$ ,  $f_{i28}$  et  $E_{dyn}$  diminuent avec augmentation du taux de substitution en granulats recyclés et sables recyclés. La Figure 2 représente les courbes moyennes Force-CMOD pour chaque type de béton. On peut voir que les quatre courbes sont très proches, mais la phase en post-pic pour B-N-N chute plus lentement par rapport que pour les trois autres bétons; ce qui signifie une ductilité légèrement supérieure pour le béton naturel.

**Figure 2.** Courbes Force-CMOD pour les poutres en B-N-N, B-N-30R, B-N-100R, B-30R-N.

### 3.2. Profil d'ouverture de fissure

L'algorithme de corrélation détermine l'emplacement de chaque pixel dans la zone d'imagerie. Il calcule les vecteurs de déplacement correspondant à l'axe des coordonnées. Et le saut dans les valeurs de déplacement représente une discontinuité (fissure) dans le matériau. Dans cette étude ouverture de fissure est mesurée à une distance de 5 mm de chaque côté de la fissure. Puis les profils d'ouverture de fissure (en pointe de l'entaille) sur la hauteur de la poutre sont déterminés à quatre étapes du chargement (pré80%, pré90%, pic et post90%) pour les quatre types de poutres (Figure 3). En outre, le développement de la longueur de fissure avec le niveau de chargement est calculé (Figure 4).

On peut observer que les fissures progressent plutôt linéairement sur la hauteur de l'échantillon. Dans la phase pré-pic les fissures sont faibles au début du chargement. Avec l'augmentation du chargement, les ouvertures de fissure deviennent plus grandes et un taux de croissance plus élevé se trouve près du pic pour toutes les poutres. Cependant, il y a des différences significatives entre les quatre types de béton. Il est remarquable que pour le B-N-100R les fissures apparaissent plus tôt et se propagent plus rapidement par rapport aux autres trois bétons. Ce qui peut s'expliquer par une éventuelle quantité de fissures préexistantes dans le BGR apparues durant le concassage pour l'élaboration des granulats recyclés et aussi la fragilité des granulats recyclés. Par conséquent, pour B-N-100R la longueur de fissuration finale est 10 mm plus grande que les bétons naturels. Il est également observé autour de la surface cassée pour la poutre B-N-100R qu'il y avait plus de granulats concassés que de granulats désossés. De plus, il y a moins de fissuration dans le cas du B-N-30R par rapport au B-N-N. C'est probablement dû à l'hydratation supplémentaire avec un niveau plus élevé d'absorption d'eau pour des granulats recyclés.

Quant au B-30R-N les fissures s'amorcent également tôt et augmentent plus rapidement par rapport au B-N-N pendant la phase pré-pic, qui peut être provoqué par une porosité plus importante dans le mortier avec sable recyclé et aussi une mauvaise interface entre granulats naturels et le nouveau mortier. Cependant, les profils d'ouverture de fissure et la longueur de fissuration finale approchent ceux de la poutre B-N-N pendant la phase post-pic à cause des mêmes granulats naturels utilisés.

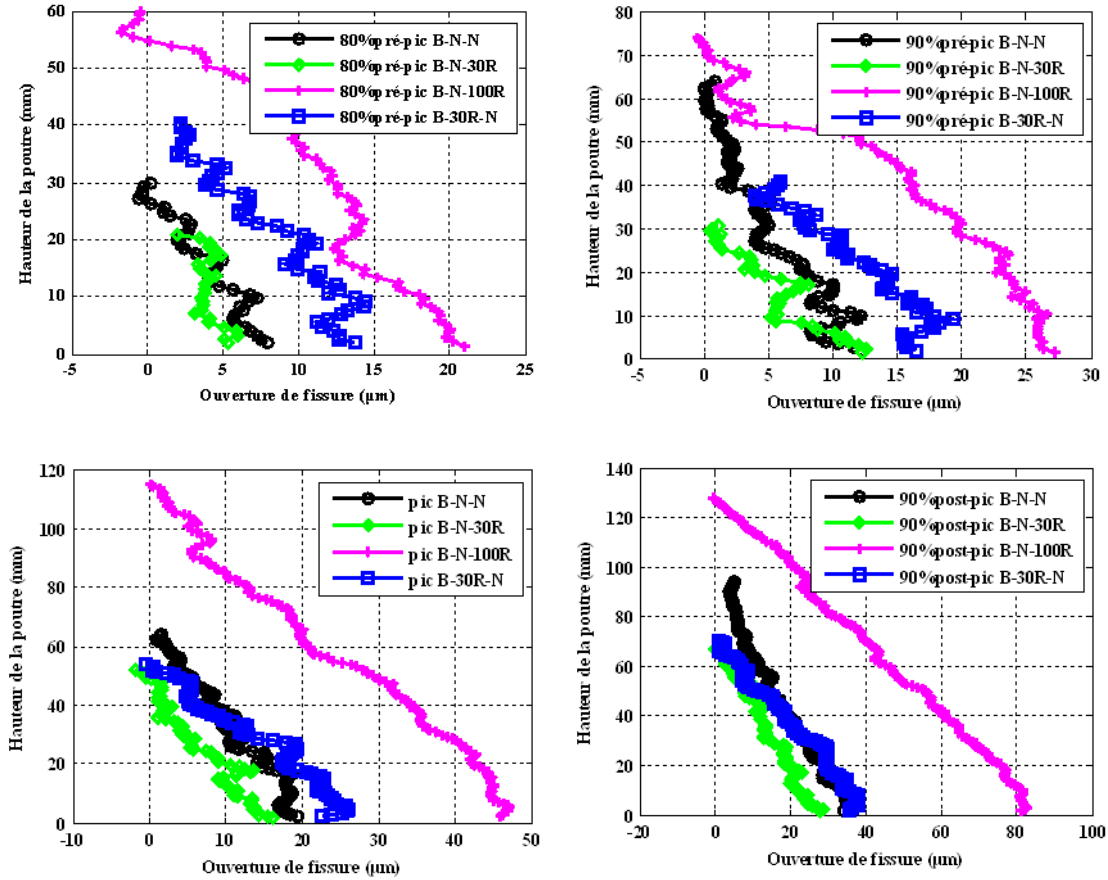


Figure 3. Profils d'ouverture de fissure pendant quatre étapes de chargement.

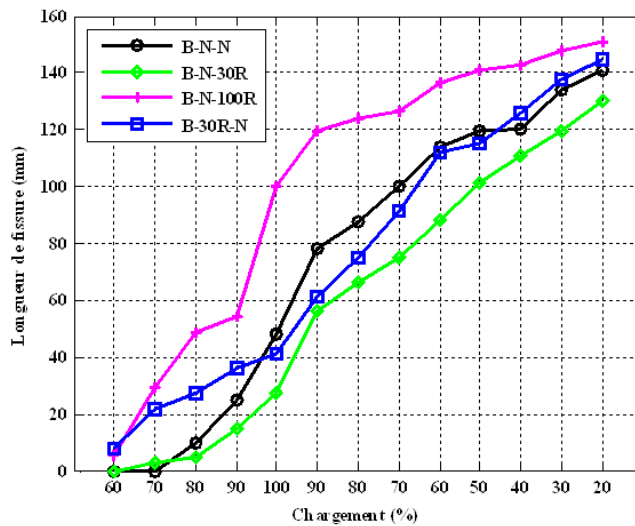
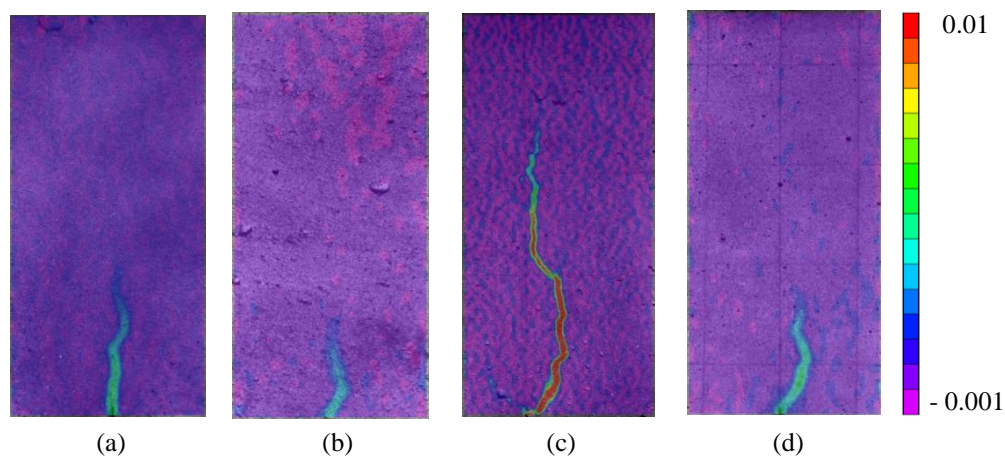


Figure 4. Développement de la longueur de fissure en fonction du chargement.

### 3.3. Processus de la localisation des déformations

Pendant le chargement les microfissures apparaissent d'abord et grandissent progressivement pour devenir des macrofissures dominantes jusqu'à rupture. Egalement la ZLD se forme pendant le même processus (Figure 5). Clairement, B-N-100R a une longueur de zone plus longue que les autres bétons. La ZLD située à 5 mm au-dessus de l'entaille est calculée pour les quatre types de béton (Tableau 3). On mesure une même largeur de 9 mm pour B-N-N, B-N-30R et B-N-100R, qui utilisent le même sable naturel. Alors que celle mesurée pour B-30R-N est plus large de 22%. On peut conclure que le sable recyclé conduit à une ZLD plus large. D'ailleurs, La valeur de déformation au centre de la zone pendant les étapes de chargement est aussi calculée (Tableau 3). On peut observer que, avec le module d'Young plus faible, la valeur de déformation pour B-N-100R est toujours la plus grande à chaque étape du chargement, sauf à l'étape pré60%, en raison de la formation de microfissures dynamiques au cours de la phase pré-pic. Bien que les valeurs de B-N-30R et B-30R-N sont plus petites que celles de B-N-N pour la même étape de chargement.



**Figure 5.** Zone de localisation des déformations pour les poutres (a) B-N-N (b) B-N-30R (c) B-N-100R (d) B-30R-N au pic.

**Tableau 3.** Largeur de la ZLD et la valeur de déformation.

Déformation	Largeur de la ZLD	Pré60%	Pré80%	Pic	Post80%	Post60%
B-N-N	9	1.2e-3	1.6e-3	4.4e-3	11.3e-3	20.2e-3
B-N-30R	9	6.3e-4	1.2e-3	3.2e-3	7.9e-3	13.4e-3
B-N-100R	9	3.6e-4	3.0e-3	13.9e-3	35.9e-3	58.2e-3
B-30R-N	11	3.5e-4	1.4e-3	3.9e-3	9.7e-3	16.5e-3

### 4. Conclusion

(1) La résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'Young diminuent avec l'augmentation du taux de substitution en granulat ou sable recyclé. La longueur de la fissure initiale pour les bétons recyclés est plus importante que les bétons naturels.

(2) Les fissures apparaissent plus tôt et augmentent plus vite et la longueur de fissuration est la plus longue pour B-N-100R, qui montre une pauvre résistance à la rupture. De plus, Les granulats recyclés aident à générer une zone de fragilité plus longue et plus large et aussi une valeur de déformation plus élevée.

(3) Quant au B-30R-N les fissures s'amorcent également tôt et augmentent plus rapidement par rapport au B-N-N pendant la phase pré-pic, mais la longueur de fissuration finale approche à celle de la poutre B-N-N en phase post-pic à cause des mêmes granulats naturels utilisés. En outre, le sable recyclé conduit à une zone de localisation des déformations plus larges.

(4) Bien qu'il existe des différences considérables entre le béton recyclé et le béton naturel, il semble convenable d'utiliser B-N-30R et B-30R-N dans les nouvelles constructions.

## 5. Bibliographie

- [ALA 13] AIAM S.Y., KOTRONIS P., LOUKILI A., "Crack propagation and size effect in concrete using a non-local damage model", *Engineering Fracture Mechanics*, 109, 2013, p.246–261.
- [ALA 12] ALAM S.Y., LOUKILI A., GRONDIN F., "Monitoring size effect on crack opening in concrete by digital image correlation", *European journal of environmental and civil engineering*, vol. 16, n° 7, 2012, p.818–836.
- [ALA 14] AIAM S.Y., SALIBA J., LOUKILI A., "Fracture examination in concrete through combined digital image correlation and acoustic emission techniques", *Construction and Building Materials*, 69, 2014, p.232–242.
- [EVA 10] EVANGELISTA L., DE BRITO J., "Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates", *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, n° 1, 2010, p.9–14.
- [EVA 07] EVANGELISTA L., DE BRITO J., "Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates", *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, n° 5, 2007, p.397–401.
- [MAN 13] MANZI S., MAZZOTTI C., BIGNOZZI M.C., "Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate", *Cement and Concrete Composites*, 37, 2013, p.312–318.
- [RIL 94] RILEM, Recommendation. 121-DRG guidance for demolition and reuse of concrete and masonry, specifications for concrete with recycled aggregates. *Materials and Structures*, 27, 1994, p.557–559.
- [TAM 05] Tam V.W.Y., GAO X.F., TAM C.M., "Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach", *Cement and Concrete Research*, 35, 2005, p.1195–1203.
- [XIA 12] XIAO J. et al., "An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011)", *Construction and Building Materials*, 31, 2012, p.364–383.
- [YAN 08] YANG K.H., CHUNG H.S., ASHOUR A.F., "Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties", *ACI Materials Journal*, 105, 2008, p.289–296.
- [ZEG 11] ZEGA C.J., DI MAIO Á.A., "Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements", *Waste Management*, 31, 2011, p.2336–2340.