

Qui ne doute pas acquiert peu
Léonardo da Vinci

Les 15 ans de coopération entre des chercheurs du CRIB à l'Université Laval et du Département ArGEnCo à l'Université de Liège reposent sur un intérêt commun dans le domaine de l'entretien et la maintenance de nos infrastructures civiles et industrielles.

C'est vraiment à partir de 2000 que les deux groupes de recherche, avec l'appui de leurs gouvernements respectifs et le support des Professeurs Michel PIGEON et Robert DEGEIMBRE, ont effectivement commencé à développer des projets de recherche en commun et à favoriser les échanges d'étudiants, de chercheurs et d'enseignants. Période féconde s'il en est, puisque plusieurs fois par an, nous nous sommes rencontrés pour travailler, rédiger, mesurer, etc., mais aussi créer un réseau amical et sympathique entre nos groupes de recherche, terreau indispensable à l'approfondissement de nos connaissances intellectuelles, mais aussi humaines.

Le secret du succès de notre collaboration réside avant tout sur cette reconnaissance mutuelle que nous avons besoin l'un de l'autre pour progresser, comprendre, évoluer. Nous avons, ensemble, participé à des congrès et publié dans des revues internationales, organisé des réunions internationales d'experts pour la RILEM et l'American Concrete Institute, à Liège et à Québec. Ce sont les signes tangibles de l'importance que revêt, à nos yeux, cette collaboration, qui s'est traduite très récemment par l'édition d'un ouvrage – Concrete Surface Engineering - rassemblant la somme des connaissances acquises sur l'ingénierie des surfaces en béton à la faveur d'efforts conjugués.

Si le but de l'université est effectivement la remise en question perpétuelle des connaissances et la recherche d'une meilleure compréhension du monde et des choses, il est clair que nos échanges et notre travail commun ont permis de se poser plus de questions que d'apporter des réponses claires : le but est donc atteint ! Ces réflexions se retrouvent dans les communications, publications et références que nous avons répertoriées ci-après.

Nous espérons qu'à la lecture de cette monographie, vous pourrez apprécier le travail que nous avons réalisé, mais aussi le chemin qui reste à parcourir.

Prof. Luc Courard
Université de Liège

Prof. Benoit Bissonnette
Université Laval

20 février 2017

***Adhérence des réparations en béton :
concepts, facteurs d'influence et évaluation***

Séminaire ICRI-Québec présenté à l'occasion du 15^{ème} anniversaire
de la coopération scientifique Québec / Wallonie-Bruxelles
entre l'Université Laval et l'Université de Liège

16h00

Mots de bienvenue et allocutions

16h30

Notions de compatibilité relatives au développement de l'adhérence
Prof. Luc Courard
Université de Liège

17h00

Mesure de l'adhérence et principaux paramètres d'influence
Prof. Benoit Bissonnette
Université Laval

17h30

Surface characterization methods for quality control of repairs
Prof. Andrzej Garbacz
Université de Technologie de Varsovie

18h15

Verre de l'amitié offert par M. Benoit Rutten, Délégué Wallonie-Bruxelles au Québec

LES MEMBRES ACTIFS DE LA COLLABORATION

B. Bissonnette, N. Bélair, L. Courard, L. Czarnecki, A. Darimont, R. Degeimbre, S. Flamant, A. Garbacz, C. Geertz, F. M. Jolin, F. Lebeau, V. Lucquiaud, J. Marchand, M. Martin, F. Michel, M. Morency, A. Müller, M. Pigeon, F. Perez, G. Poyat, M. Rondeux, D. Schwall, M. Thomassin, A. Van der Wielen, A.M. Vaysburd, K.F. von Fay, X. Willem

LES DISTINCTIONS

- Prof. B. BISSONNETTE, chercheur invité FNRS au Département ArGEnCo de l'Université de Liège (2016)
- Prof. L. COURARD, professeur associé au Département de génie civil de l'Université Laval (2003-14)
- Prof. B. BISSONNETTE, conférencier invité dans le cadre de la série des *Conférences du CERES* à l'Université de Liège (2013)
- Prof. B. BISSONNETTE, conférencier invité dans le cadre du *Salon Métamorphoses 2013* à Liège (2013)
- Prof. B. BISSONNETTE, professeur invité au Département ArGEnCo (2012-13)
- Prof. M. PIGEON, Doctorat *Honoris Causa* de l'Université de Liège (2006)
- Prof. L. COURARD, conférencier invité de la 2^e Conférence *Rilem Advances in Concrete through Science and Engineering*, Québec (2006)
- Prof. L. COURARD, conférencier invité de la Chaire industrielle CRSNG sur *l'Entretien optimisé et la réparation durable des infrastructures en béton* de l'Université Laval (2005)
- Prof. J. MARCHAND, conférencier invité au Département ArGEnCo de l'Université de Liège (2004)
- Prof. L. COURARD, professeur invité au Département de génie civil de l'Université Laval (2000-01)

LES PROJETS DE COOPÉRATION SCIENTIFIQUE

Les échanges ont eu lieu grâce au soutien financier du Ministère des Relations Internationales du Québec et de Wallonie-Bruxelles International. Nous tenons à les remercier pour la confiance qu'ils ont témoignée et de l'aide essentielle apportée en soutenant nos projets.

- *Projet de coopération Québec / Wallonie-Bruxelles (2015-2017) : Matériaux recyclés et additions pour des éco-bétons durables*
- *Projet de coopération Québec / Wallonie-Bruxelles (2013-2015) : Analyse et développement d'un béton à ZERO émission de carbone*
- *Projet de coopération Québec / Wallonie-Bruxelles (2011-2013) : Matériaux cimentaires durables à fortes teneurs en additions minérales*
- *Projet de coopération Québec / Wallonie-Bruxelles (2009-2011) : Techniques non destructives de type radar et impact-écho pour la gestion durable des infrastructures*
- *Projet de coopération Québec / Wallonie-Bruxelles (2005-2007) : Développement et emploi de mortiers auto-compactants pour l'entretien et la réparation des infrastructures en béton*
- *Projet de coopération Québec / Wallonie-Bruxelles (2003-2005) : Rugosité des surfaces et interpénétration mécanique des produits de réparation sur les structures en béton: application aux produits de réparation à base de bétons autoplaçants*
- *Projet de coopération Québec / Wallonie-Bruxelles (2001-2003) : Caractérisation des surfaces en béton et étude de nouveaux produits de réparation*
- *Projet de coopération Québec / Wallonie-Bruxelles (2000-2001) : Analyse des phénomènes interfaciaux et leur effet sur les stratégies de réparation des ouvrages en béton*

Les travaux de coopération scientifique ont été la base d'un partenariat de recherche international faisant intervenir des chercheurs de la Pologne (Université de Technologie de Varsovie) et des États-Unis (US Bureau of Reclamation) dans le cadre d'un projet de recherche supporté en partie par l'American Concrete Institute (2007-09).

La collaboration a été amorcée dans le cadre d'un séjour de recherche du Prof. Courard à l'Université Laval en 2000-2001 : *Effet de la préparation des surfaces sur les propriétés d'adhérence (Rapport RM 247)* (travaux soutenus par les Gouvernements du Québec, du Canada et de Wallonie).

LES PUBLICATIONS NATIONALES ET INTERNATIONALES

LIVRES

- Concrete Surface Engineering. B. Bissonnette, L. Courard, A. Garbacz. Modern Concrete Technology 18, CRC Press, 2015, 272p. (ISBN-13: 978-1498704885)
- Development of Specifications and Performance Criteria for Surface Preparation Based on Issues Related to Bond Strength. B. Bissonnette, L. Courard, A. Garbacz, A. Vaysburd, K. von Fay, B. Robertson. Report No. ST-2017-2886-1, Bureau of Reclamation, U.S. Department of Interior, 2017, 190p.
- Bonded Cement-Based Material Overlays for the Repair, the Lining or the Strengthening of Slabs and Pavements. B. Bissonnette, L. Courard, D.W. Fowler and J.L. Granju. RILEM STAR Report Volume 3, 193-RLS RILEM TC (Springer, Dordrecht), 2011, 175p.

CHAPITRES DE LIVRE

- Réparation des ouvrages en béton armé – Partie 1 : pathologies et diagnostic. L. Courard et B. Bissonnette. Techniques de l'ingénieur (novembre 2016).
- Réparation des ouvrages en béton armé – Partie 2 : compatibilité et performances. B. Bissonnette et L. Courard. Techniques de l'ingénieur (novembre 2016).
- Introduction (chapter 1). 193-RLS RILEM TC Bonded cement-based material overlays for the repair, the lining or the strengthening of slabs and pavements. Co-ordinator: B. Bissonnette – Authors: L. Courard and J.-L. Granju (France) 2011, pp1-4.
- Condition evaluation of the existing structure prior to overlay (chapter 3). 193-RLS RILEM TC Bonded cement-based material overlays for the repair, the lining or the strengthening of slabs and pavements. Co-ordinator: L. Courard – Authors: L. Courard, B. Bissonnette and M. Trevino (U.S.A.), 2011, pp17-50.
- Bond (chapter 4). 193-RLS RILEM TC Bonded cement-based material overlays for the repair, the lining or the strengthening of slabs and pavements. Co-ordinator: J. Silfwerbrand – Authors: J. Silfwerbrand (Sweden), H. Beushausen (South Afrika) and L. Courard, 2011, pp51-79.
- Conclusions (chapter 10). 193-RLS RILEM TC Bonded cement-based material overlays for the repair, the lining or the strengthening of slabs and pavements. Co-ordinator: B. Bissonnette – Authors: L. Courard and J.-L. Granju (France), 2011, pp175-177.

ARTICLES DANS REVUE SCIENTIFIQUE AVEC COMITE DE LECTURE

- Specification guidelines for surface preparation of concrete prior to repair. L. Courard, B. Bissonnette, A. Garbacz, A. Vaysburd, K. von Fay. Concrete International, 2017 (under revision).
- Effect of misalignment on pull-off test results: numerical and experimental assessments. L. Courard, B. Bissonnette, A. Garbacz, A. Vaysburd, K. von Fay, G. Moczulski, M. Morency. ACI Materials Journal, 111 (2), 2014.
- A surface engineering approach applicable to concrete repair engineering. A. Garbacz, L. Courard and B. Bissonnette. Bulletin of the Polish Academy of Sciences (Technical Sciences) **61** (1), 2013.
- Recommendations for the repair, the lining or the strengthening of concrete slabs or pavements with bonded cement-based material overlays. L. Courard, B. Bissonnette, A. Vaysburd, D. Fowler, M. Trevino, J. Silfverbrand, H. Beushausen. Materials and Structures (2013).
- Comparison of destructive methods to appraise the mechanical integrity of a concrete surface. L. Courard, B. Bissonnette, A. Vaysburd, N. Belair and F. Lebeau. Concrete Repair Bulletin 25(4) (July-August 2012).
- Schwall D. Van der Wielen A. Piotrowski T. Garbacz A. Perez F. Bissonnette B. Courard L., Michel F. Surfology : concrete surface evaluation prior to repair. Materials Characterization : computational methods and experiments IV, 2009.
- Combination of mechanical and optical profilometry techniques for concrete surface roughness characterization. F. Perez, B. Bissonnette and L. Courard. Mag. Concrete Res, **61**(6) 2009, 389-400.
- Concrete removal techniques: influence on residual cracking and bond strength. B. Bissonnette, L. Courard, A. Vaysburd and N. Bélair. Concrete International, **28**(12) 2006, 49-55.
- Essai dérivé de l'essai d'adhérence pour la caractérisation de la cohésion superficielle des supports en béton dans les travaux de réparation : analyse des paramètres d'essai. L. Courard et B. Bissonnette. Mater. Struct., **37**(269) (2004) 342-350.

ARTICLES DANS REVUE SANS COMITE DE LECTURE

- Specifying Concrete Repair Materials. A. Vaysburd, B. Bissonnette, A. Garbacz, L. Courard. Materialy Budowlane, **523** (3), 2016, p.42-45.

CONFERENCES, SEMINAIRES ET CONGRES (COMITE DE LECTURE SCIENTIFIQUE INTERNATIONAL)

- Specification guidelines for surface preparation of concrete prior to repair. L. Courard, B. Bissonnette, A. Garbacz. Fib 2017, Maastricht.
- Évaluation des réparations en béton et identification des principaux facteurs d'influence. B. Bissonnette, L. Courard, A. Vaysburd, A. Garbacz, M. Jolin, K. von Fay. Rencontres Universitaires de Génie Civil, Liège (25-27 mai 2016), 10p.
- A repair quality control with elastic waves based methods vs. substrate quality. A. Garbacz, T. Piotrowski, L. Courard, B. Bissonnette. ICCRRR15 Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting IV, (Leipzig, CRC press), 2015, 64.
- Fundamental approach to the concept of concrete repair compatibility. L. Courard, B. Bissonnette, A. Garbacz. ICCRRR15 Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting IV (Leipzig, CRC press), 2015, 164.

- A quantitative approach to the concept of concrete repair compatibility. B. Bissonnette, F. Modjabi-Sangnier, L. Courard, A. Vaysburd, A. Garbacz. ICCRRR15 Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting IV, (Leipzig, CRC press), 2015, 158.
- Concrete repair bond: evaluation and factors of influence. B. Bissonnette, L. Courard, A. Garbacz, A.M. Vaysburd, von Fay, K.F. 5th International Conference on Concrete Repair, Queen's University, Belfast, 1-3 September 2014, 51-57.
- Patch repair: compatibility issues. A. Garbacz, L. Courard, B. Bissonnette, W. Glodkowska. 5th International Conference on Concrete Repair, Queen's University, Belfast, 1-3 September 2014, 71-76.
- Evaluation of the mechanical integrity of a concrete surface by means of combined destructive methods. L. Courard, B. Bissonnette, A.M. Vaysburd, A. Garbacz. 5th International Conference on Concrete Repair, Queen's University, Belfast, 1-3 September 2014, 787-790.
- Durabilité(s) des matériaux de construction : un challenge pour l'ingénieur. L. Courard and B. Bissonnette. 81^{ème} Congrès de l'ACFAS, 6-10 mai 2013, Québec, Canada.
- Topography evaluation methods for concrete substrates: parametric study. L. Courard, A. Garbacz and B. Bissonnette. ICCRRR12 International Congress on Concrete Repair, Reinforcement and Retrofitting, (Alexander et al (eds), 2012 Taylor & Francis Group, London), Cape Town (2012), pp379.
- Quality assurance in repairing industrial floors: parameters and recommendations. L. Courard and B. Bissonnette. 18th Slovenski kolokvij o betonih (Ed. A. Zajc, IRMA), Ljubljana, Slovénie (19 mai 2011), pp11-18.
- Repair of concrete industrial floors with bonded cement-based material overlays: some recommendations L. Courard, A. Vaysburd and B. Bissonnette. Seventh International Colloquium Industrial Floors '10, (Ed. K. Littmann, Technische Akademie Esslingen), Ostfildern/Stuttgart, Germany (14-16 December 2010), pp. 617-622.
- Surfology: concrete substrate evaluation prior to repair. L. Courard, F. Michel, D. Schwall, A. Van der Wielen, A. Garbacz and T. Piotrowski, F. Perez and B. Bissonnette. Materials Characterization: computational methods and experiments IV (eds. A. Mammoli and C.A. Brebbia, Wessex Institute of Technology Press). The New Forest (U.K.), 17-19 June, 2009, pp 407-16.
- Correlation between the roughness of the substrate surface and the debonding risk. F. Perez, M. Morency, B. Bissonnette and L. Courard. ICCRRR08 International Congress on Concrete Repair, Reinforcement and Retrofitting, (Alexander et al (eds), 2009 Taylor & Francis Group, London), Cape Town (2008), pp.949-56.
- Compatibility performance as a fundamental requirement for the repair of concrete structures with Self-Compacting Repair Mortars (keynote lecture). L. Courard and B. Bissonnette. In: 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Proceedings PRO 54 (Eds. G. De Schutter and V. Boel, Rilem Publications), Gent, Belgium (September 3-5, 2007), pp. 667-675.
- Mix stability as a criterion for optimizing the granular composition to improve concrete durability – an application. X. Willem, L. Courard, A. Darimont and R. Degeimbre. In: RILEM PRO 51 (CD): 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering (Ed. J. Marchand, B. Bissonnette, R. Gagne, M. Jolin, F. Paradis), Quebec, Canada, September 2006.
- Failure of concrete repair: how to avoid it? Courard L., Garbacz A. RILEM PRO 51: 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering (Ed. J. Marchand, B. Bissonnette, R. Gagne, M. Jolin, F. Paradis), Quebec, Canada, 2006, p. 167-191
- Analysis of stress wave propagation in repair systems using wavelet approach. A. Garbacz, T. Piotrowski and L. Courard. In: RILEM PRO 51 (CD): 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering (Ed. J. Marchand, B. Bissonnette, R. Gagne, M. Jolin, F. Paradis), Quebec, Canada, September 2006.
- Two different techniques for the evaluation of concrete surface roughness. F. Perez, L. Courard, B. Bissonnette, A. Garbacz and M. Gorka. In: ICCRRR 2005 International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (Eds. H. Beushausen, F. Dehn and M.G. Alexander, 2006 Taylor & Francis Group, London), Cape Town, South Africa (21-23 Novembre 2005), 1015-1020.

- Effect of surface preparation techniques on the cohesion of superficial concrete: comparison between jack-hammering and water-jetting. L. Courard, B. Bissonnette and N. Belair. In: ICCRRR 2005 International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (Eds. H. Beushausen, F. Dehn and M.G. Alexander, 2006 Taylor & Francis Group, London), Cape Town, South Africa (21-23 Novembre 2005), 1027-1031.

CONFERENCES, SEMINAIRES ET CONGRES (COMITE DE SELECTION LOCAL)

- Adhérence des réparations en béton: évaluation et facteurs d'influence. B. Bissonnette, L. Courard, M. Jolin, M. Thomassin, A. Vaysburd, A. Garbacz. Journées scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation dans le domaine du béton, Douai (3-4 juillet 2014), 10p.
- Outils de caractérisation paramétrique de la rugosité des surfaces en béton : nouveaux développements. F. Perez, B. Bissonnette et L. Courard. Journées scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation dans le domaine du béton, Sherbrooke (Québec), Canada (25-26 août 2003), 10p.
- Mise au point d'une procédure de caractérisation quantitative des surfaces démolies en béton en vue de travaux de réfection. N. Bélair, B. Bissonnette et L. Courard. 10^{ème} Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Québec, Canada (6-7 mai 2003), 8p.

CONFERENCES SUR INVITATION (PRESENTATIONS ORALES)

- Benoît BISSONNETTE, VISION 2020: Une initiative industrielle nord-américaine au service du développement durable, *Salon Métamorphoses 2013*, Liège, Belgique, 31 janvier 2013.
- Benoît BISSONNETTE, Effondrement du Pont Routier de la Concorde à Laval (Canada) en 2006 : Causes et Leçons, *Centre d'Études, de Recherches et d'Essais du Génie Civil (CERES)*, Université de Liège, 9 décembre 2013.
- Luc COURARD, Failure of concrete repair: how to avoid it?, *2nd RILEM Symposium Advances in Concrete through Science and Engineering*, Québec, Canada, 11 septembre 2006.
- Luc COURARD, Collaboration with the University of Liège, Belgium, *Chaire Industrielle CRSNG sur l'Entretien Optimisé et la Réparation Durable des Infrastructures en Béton*, CRIB, Université Laval, Québec, 23 mai 2005.
- Luc COURARD, Préparation des surfaces en béton, *Chaire Industrielle CRSNG sur le Béton Projeté et les Réparations en Béton*, CRIB, Université Laval, Québec, 2001.
- Luc COURARD, De la complexité de la création de l'interface entre un béton et un système de réparation. *Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton*, Université Laval, Québec, 2000.

PARTICIPATION COMMUNE A DES SEANCES DE FORMATION CONTINUEE

- *Auscultation et réparation des ouvrages en béton*, Université de Liège (2009, 2012, 2014, 2017)

PARTICIPATION COMMUNE A DES CONFERENCES, SEMINAIRES ET WORKSHOPS

- *15th anniversary of cooperation between University of Liège and Warsaw University of Technology, Jubilee Symposium - 3R: Reduce, Reuse, Recycle in constructions*, Université de Technologie de Varsovie, Varsovie, Pologne, 12-13 juin 2016
- *81^è Congrès de l'ACFAS*, Université Laval, Québec, Canada, 6-8 mai 2013
- *Workshop Concrete Repair Science : New Trends*, ULg, Liège, Belgique, 29 novembre 2010
- *Joint Rilem/ACI Session Technical session on Concrete overlays*, TC-RLS, ACI Fall Convention 2006, Denver, CO, USA, 5-6 novembre 2006
- *Semaine scientifique et technique de la RILEM*, Québec, Canada, 11-15 septembre 2006
- *Vth International Workshop on Roadmapping Improvements in the Concrete Repair Industry*, Sedona, AZ, USA, 9-10 mai 2005
- *Séminaire Réparation et renforcement des dalles en béton (ULg-CEP-GBB)*, Liège, Belgique, 13 janvier 2004
- *IVth International Workshop on Bringing the Concrete Repair Industry into a New Era of Sustainable Development*, San Diego, CA, USA, 28-29 mai 2003
- *8^{ème} Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art*, Québec, Canada, 8-9 mai 2001
- *IIIrd International Workshop on Improving the Performance of Repaired Concrete Structures*, Québec, Canada, 30 avril et 1 mai 2001

- *Journées scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton ((RF)²B)*
 - Paris, France, 6-7 juillet 2016
 - Lausanne, Suisse, 9-10 juillet 2015
 - Douai, France, 3-4 juillet 2014
 - Sherbrooke, Canada, 22-23 août 2013
 - Lyon, France, 4-6 juillet 2012
 - Luxembourg, Luxembourg, 6-8 juillet 2011
 - Québec, Canada, 26-28 août 2010
 - Paris, France, 1-3 juillet 2009
 - Lausanne, Suisse, 19-20 août 2008
 - Montréal, Canada, 5-6 juillet 2007
 - Toulouse, France, 19-20 juin 2006
 - Lyon, France, 4-5 juillet 2005
 - Liège, Belgique, 5-6 juillet 2004
 - Sherbrooke, Canada, 25-26 août 2003
 - Paris, France, 26-27 septembre 2002
 - Québec, Canada, 30-31 août 2001
 - Toulouse, France, 4-5 juillet 2000

CO-PARTICIPATION À DES JURYS DE DOCTORAT ET DE MAÎTRISE

- Travail de fin d'études de Gilles POYSAT: *Modélisation, analyse et conception d'un canoë en béton* (Université de Liège, 2014).
- Mémoire de maîtrise de Maxim MORENCY: *Cracking sensitivity of cementitious repair materials: assessment and development of test methods* (Université Laval, 2013).
- Thèse de doctorat de Marie MARTIN: *Etude de la texture de la surface coffrée des parements verticaux en béton* (Université Laval, 2007).
- Thèse de doctorat de Fabien PEREZ : *Contribution à l'étude du comportement mécanique des éléments bicouches composés de bétons d'âges différents sous sollicitations statiques et cycliques* (Université Laval, 2005).
- Mémoire de maîtrise de Normand BELAIR: *Contribution à la mise au point d'une procédure de caractérisation quantitative des surfaces en béton en vue de travaux de réfection* (Université Laval, 2005).
- Thèse de doctorat de Xavier WILLEM : *Etude des effets de l'auto-consolidation sur les indicateurs de durabilité des bétons* (Université de Liège, 2004).

Recueil de publications

QUALITY ASSURANCE IN REPAIRING INDUSTRIAL FLOORS: PARAMETERS AND RECOMMENDATIONS

L. Courard

ArGEnCo Department, GeMME Building Materials
University of Liège
Chemin des Chevreuils, 1 – 4000 Liège, Belgium
e-mail: Luc.Courard@ulg.ac.be
web page: www.argenco.ulg.ac.be

B. Bissonnette

Civil Engineering Department, CRIB
Laval University, Québec, Canada

Abstract

Since concrete has been used for more than a century, many structures need repair in different degrees and others need strengthening to withstand higher loads. Moreover, the number of new concrete structures is constantly increasing, and therefore repair or retrofitting requirements increase. Present concerns of sustainable development emphasizing repair or strengthening instead of new construction, acts as incentive to this trend. The bonded overlay technique is particularly suitable in the case of structures with large areas like industrial floors. This paper has the ambition to present reliable design methodology for the practitioner. Surface preparation, overlay design and material selection, application process and QC/QA are discussed and guidelines are proposed in order to enhance quality of repair operations.

Keywords: overlays, repair, concrete, QC/QA, adhesion, durability, design, material selection

1 INTRODUCTION

The purpose of bonded concrete overlays, used since 1909, is to extend the life of a concrete slab, pavement, bridge deck or other structural slab. The additional thickness of the bonded overlay can provide a significant increase in stiffness that will reduced the flexural stresses. Other reasons for using bonded overlays include:

1. increasing the frictional resistance or providing a smooth surface,
2. increasing the elevation to match an adjacent slab,
3. provide a more durable wearing surface or to repair a damaged slab and
4. provide architectural features such as color or texture.

The construction-related considerations are related to compatibility of the overlay and original slab, repairs to the original slab that must be made, surface preparation and environmental conditions [1].

The RILEM TC 193 RLS has recently provided a State of the Art report on *Bonded cement-based material overlays for the repair, the lining or the strengthening of slabs and pavements* [2]. Recommendations would come very soon and give practical indications on the way to follow for better repair and strengthening operations.

2 ASSESSMENT OF THE EXISTING STRUCTURE

Assessment of the existing structure has to be made in order to point out its defects and their causes but also to attest the ability of the concrete structure to perform its function [3]. The objective(s) of the assessment are a good knowledge of concrete structure residual performances and the characterization of its constitutive materials. The general process of assessment must at least include:

- present condition of the existing concrete structure, including non-visible and potential defects;
- original design approach;
- environment, including exposure to contamination;
- conditions during construction (including climatic conditions);
- history of the concrete structure;
- conditions of use (e.g. loading);
- requirements for the future use of concrete structure.

A first step is typical visual investigation that might involve the following activities:

- perform a walk-through visual inspection to become familiar with the structure; gather background documents and information on the design, construction, maintenance, and operation of the structure;
- plan the complete investigation;
- perform a detailed visual inspection;
- perform any necessary sampling;
- perform any in-place tests.

Depending on the conclusions of visual inspection, further operations will then be conducted in order to:

- identify cause(s) of defects;
- establish the extent of defects;
- establish whether defects can be expected to spread to parts that are at present unaffected;
- assess the effect of defects on structural capacity; and
- identify all locations where protection or repair may be needed.

The causes and type of defect have to be considered during close-up inspection. They include material deteriorations as well as structural dysfunction. Causes may include but are not limited to what is described in Table 1.

Table 1 : Potential causes of degradation of concrete structures

Main causes	Main effects
Causes of defects due to inadequate structural design	
Causes of defects due to inadequate construction or materials	<ul style="list-style-type: none"> • inadequate mix design, insufficient compaction, insufficient mixing, excess water in mix; • insufficient cover; • insufficient or defective waterproofing; • contamination, poor or reactive aggregates; • inadequate curing and excessive evaporation
Causes of defects revealed during service	<ul style="list-style-type: none"> • foundation movement, impacted movement joints, overloading
	<ul style="list-style-type: none"> • impact damage, expansion forces from fires
External environment and agents	<ul style="list-style-type: none"> • severe climate, atmospheric pollution, chloride, carbon dioxide, aggressive chemicals
	<ul style="list-style-type: none"> • erosion, aggressive groundwater, seismic action
	<ul style="list-style-type: none"> • stray electric currents

The results of the completed assessment are only valid at the time that the repair works are designed and carried out [2]. The nature and causes of defects, including potential combinations of causes, should be identified and recorded. This will allow defining a repair strategy and selecting optimal repair technique and products (Fig. 1).

Minimum series of investigation should include:

- carbonation depth;
- concrete cover (over steel reinforcement);
- steel corrosion level ;
- concrete cohesion (superficial zone);
- compressive strength of concrete ;
- chloride content, alcali content and sulphate content ;
- remaining alkalinity (Ca(OH)₂ content) ;
- any other test suitable and useful for pathology interpretation.

Table 2 gives a “memory-help chart”, developed in order to avoid forgetting the main characteristics and properties of concrete to be involved in diagnosis.

Required values of results are presented to provide an idea of what should be expected but it might differ, depending on local applicable code. Non destructive techniques are also helpful, especially when large areas have to be investigated (Table 3).

It is important to combine different testing methods and investigation operations. A good diagnosis hardly requires overlapping information because of variation of site material properties and compositions. A destructive method will clearly certify a physical or chemical property, specifically where specimen has been sampled, while a non destructive method will give a large overview on the whole structure: and this can be calibrated by means of results of destructive analysis.

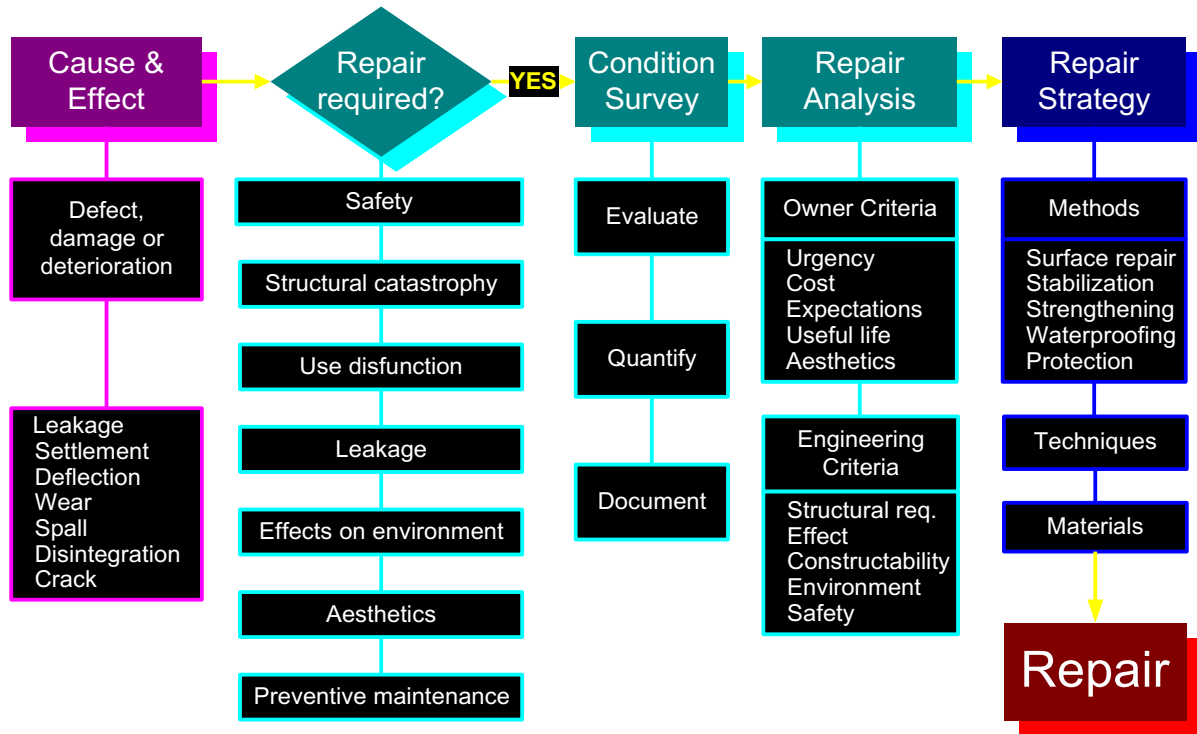


Fig. 1 : Concrete repair process and repair strategy [1]

Table 2 : Summary of tests and observations for quality evaluation of concrete according to EN 1504-10

Characteristic	Test Method or Observation	Standards
Delamination	Hammer sounding	-
Surface tensile strength of substrate	Pull-off test	EN 1542
Crack movement	Mechanical or electrical gauges	BS 1881 BS 206
Crack width and depth	Mechanical or electrical gauge, Core and visual/Ultrasonic	EN 12504-1 EN 12504-4 ISO 8047
Carbonation depth	Phenolphthalein test Concrete cover	EN 14630 EN 12504-1
Chloride content	Site sampling and chemical analysis/ Half-cell potential mapping	EN 14629
Penetration/presence of other contaminants	Site sampling and chemical analysis	-
Compressive strength	Core and crushing test Rebound hammer (mapping)	EN 12504-1 EN 12504-2

Table 3 : Methods for the evaluation of concrete material [4]

In-place tests to estimate strength	Non destructive tests for integrity
Rebound hammer	Visual inspection
Ultrasonic pulse velocity	Stress wave propagation methods
Probe penetration	Ground penetrating radar
Pull-out	Electrical/magnetic methods
Break-off	Nuclear methods
Maturity method	Infrared thermography

3 SURFACE PREPARATION

Surface preparation includes all processes, measures and circumstances influencing the interface or contact surface between the substrate and the concrete overlay [5]. Surface preparation is needed to promote bond between concrete substrate and overlay. There is a large number of factors that may affect bond strength (Fig. 2). However, some of them are critical in the sense that you cannot compensate a poor preparation with an excellent execution. The most important factors are the following five:

- absence of micro-cracking,
- absence of laitance layer,
- cleanliness,
- compacting,
- curing.

The process of preparation for repair is the process by which sound, clean and suitably roughened surfaces are produced on concrete substrates. This process includes the removal of unsound and, if necessary, sound concrete and bond inhibiting foreign materials from the concrete and reinforcement surfaces, opening the concrete pore structure, reinforcement damage verification and repair, if necessary.

Removal tasks have to be performed in a manner that ensures that the remaining concrete and reinforcing steel retains its structural integrity. Equipment used to perform the work must not overload the structure and care must be taken to remove so much concrete that the member being repaired or rehabilitated is critically weakened. Any impact forces have to remove damaged concrete and minimize damage to the bond between the remaining concrete and steel. Methods to remove rust and chlorides from the steel should also minimize damage and loss to the remaining steel.

The concrete removal process leaves the resulting surface with varying degrees of microcracks and fractures, commonly referred to as "bruising." Bruising creates a zone of weakness that will affect the bond of the repair material to the substrate. Removal subjects the concrete substrate to a wide range of dynamic loads and the resulting bruising will depend on the method used and the quality of the concrete. The depth of the bruised layer varies, but is typically on the order of 3 to 5 mm.

The superficial cracking is considered as the one of the most important parameters influencing adhesion in repair system [6]. The respective influence of the various surface preparation techniques can be evaluated by microscopic observation of the near-to-surface area. Number and length of microcracks [7] have been systematically registered for several of concrete compression strength classes and surface preparation methods (Fig. 3).

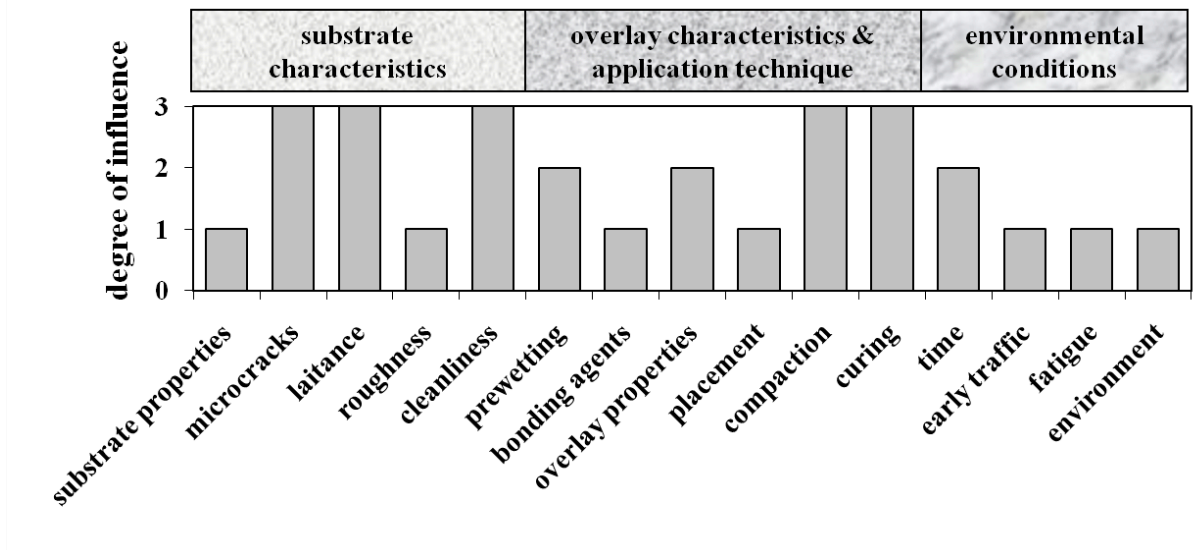


Fig. 2 : Factors affecting bond arranged chronologically and after order of importance [4]

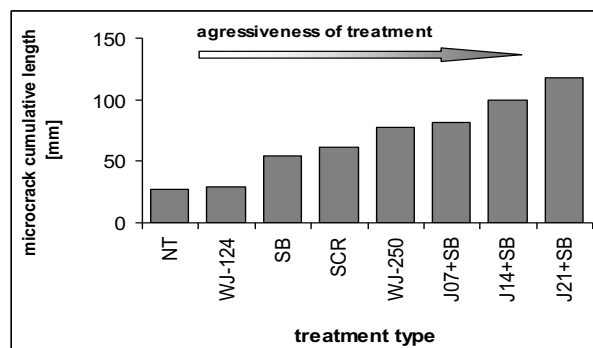


Fig. 3 : Length (Li) of the cracks vs type of concrete surface treatment: NT – no treatment; WJ – water jetting – pressure 124 psi/250MPa; SB – sandblasting; SCR – scabbling; J+SB – jack hammering of weight 7,14,21 kg + sandblasting [6]

Analysis generally shows that low pressure water jetting does not generate microcracks in comparison to jack hammering [8]. Scabbling may induce a big amount of microcracking in very near-to-surface area. The number of cracks and the total crack length resulting from the preparation with jack-hammer are significantly higher than with any other of the investigated techniques. It is also clear that increasing the jackhammer weight - and thus, its impact energy - causes both the length and the number of cracks increase significantly.

4 OVERLAY MATERIALS

Compatibility between the concrete substrate and repair material appears to be of prime importance [9]: shrinkage, rigidity, surface roughness, viscosity, temperature, creep, etc, will make the contact more effective or not and will allow for interactions between the materials. Bond strength is the macroscopic and measurable effect of these interactions. Quantification is usually made from pull-off test, shear test or direct tensile tests.

According to general classification of composites [10], concrete-polymer composites (C-PC) can be treated as particulate composites with two main constituents: a matrix and dispersed particles of strengthening phases. CPCs are the largest group of materials containing polymers [11]:

- polymer (resin) concretes (PC), cementless, manufactured by mixing of synthetic resins with aggregate and following hardening of the resin binder;
- polymer-cement concretes (PCC), obtained by adding polymer to the concrete mix; polymer modifier may be “pre-mix” – polymerized before mixing, or “post-mix” – polymerizing after mixing along with cement hydration process;
- polymer impregnated concretes (PIC), produced by impregnation of the hardened concrete, using polymer and following hardening of polymer inside the concrete; to that group belong also composites formed by polymer injection of cracks into concrete substrate.

The main fields of CPC applications [12, 13] are repair and protection against corrosion of building structures (including industrial floors).

5 CONSTRUCTION PROCEDURE AND QUALITY ASSURANCE

5.1 Moisture conditioning of the substrate

The moisture condition of the substrate will determine the rate of movement of water from the repair mortar to substrate concrete due to the moisture imbalance between the two layers. Both the surface moisture condition and the moisture distribution inside the substrate are important. During the process of water movement, two things will occur: penetration of water from the repair mortar in the capillaries of substrate concrete, and hydration of cement paste in the repair.

The optimum moisture condition will vary from substrate to substrate in otherwise equal conditions because the performance of the bond depends on the way the substrate will affect the direction and rate of water movement between phases of the composite repair system.

Adhesion strength changes as a function of the water saturation level of the substrate (Table 4). The adhesion is relatively weak for low saturation levels ($\leq 50\%$); it reaches classical values for saturation levels between 55 and 75 %. Above these ranges, we observe a decrease in strength ($> 90\%$).

Table 4 : Adhesion of a PCC mortar on concrete substrate vs. saturation level of concrete substrate and slurry [14]

Adhesion (N/mm ²)		
Saturation level	with dry slurry	with wet slurry
50	0.83	2.32
52	2.80	2.14
55	2.09	2.89
70	2.75	2.65
90	3.54	3.36
93	2.13	3.06
97	1.81	2.58
100	1.43	1.48

A weak saturation level produces a disturbance into the setting process of the cement, while a too high saturation level acts on the attraction forces, the porosity, the kinetics of contact and, finally, the adhesion properties [14]. Optimal moisture of the substrate will be obtained by conservation at 100 % relative humidity, which can be easily reached in a laboratory. One must also note that the best adhesion values are reached for a large scale of saturation levels; that means that it doesn't extensively depend on slight variations of water content, except for extreme conditions.

5.2 Materials selection and joints

The concrete should be selected to provide suitable bond and to meet durability and strength requirements. Supplementary cementing materials, such as fly ash, may be used to reduce heat of hydration and to reduce costs. The water-cement ratio is usually specified to be 0.40 or less. Aggregates should be selected for workability and should be durable. Using improved aggregate gradation can result in reduced paste requirements. Admixtures can include air entraining agents, moderate or high range water reducers; accelerators for cold weather; and retarders for hot weathers.

Steel reinforcing and steel and synthetic fibers can be used for reinforcement. Steel reinforcement has been used in the form of tied bars and welded mats. Steel fibers have been used successfully to control cracks and to minimize drying shrinkage cracking. Synthetic fibers have been used to control shrinkage cracking.

Jointed slabs and pavements required that the joints be reinstated in the original slab; moreover, the joints should be maintained in the overlay. Sawing the joints followed by application of suitable high elongation joint filler may be the best solution. Joints in structural slabs and decks are usually expansion joints. The overlays must be constructed to maintain the expansion required and to insure a durable joint.

5.3 Application procedures

Experience has repeatedly demonstrated that no step in a repair application can be omitted or carelessly performed without detriment to the durability. Inadequate workmanship, procedures, or materials result in inferior repairs, which will prematurely fail.

Adequate placement capacity should be provided so that material can be kept workable and free of cold joints during the placement. The placement process and equipment should be arranged to deliver the material to its final position without segregation. The equipment should be adequately and properly arranged so that placing can proceed without undue delays and manpower should be sufficient to ensure the proper and timely placing, consolidating, finishing and curing of the repairs.

To obtain a durable surface of the repair, proper procedures should be carefully followed. The compaction is important to obtain a dense and homogeneous overlay as well as a good and uniform bond. Especially, the compaction is important in overlays on rough surfaces to prevent the development of air pockets in the valleys of the surface texture. The use of vibration pokers and vibration platforms is recommended. Recent studies show that good result may be obtained with self-compacting concrete as well. Following consolidation, the operations of screeding, floating, and troweling should be performed in such a manner that the repair material will be worked and manipulated as little as possible to produce the desired result.

Over-manipulation of the concrete brings excessive fines and water to the surface, which lessens the quality of the finished surface, causing checking, crazing, and dusting.

5.4 Curing

Good curing is vital to producing a satisfactory repair. Good curing not only increases durability and wear resistance, but reduces early drying, shrinkage and cracking. Curing must be started early. Proper curing is even more important for overlays than for ordinary concrete because of the potential for rapid early drying of the relatively thin repair since they have large surface areas in relation to their volumes and moisture can be lost quickly.

5.5 Quality control

Quality control is the establishment of a proper level of quality required for a given project, and controlling of all operations to a degree that will assure that the required level will be attained. Quality control cannot be attained, however, without high quality project specifications, which constitute the first and very critical step in quality control. Therefore, the specifications must be a high quality engineering document, and the goal of the quality control/quality assurance is to assure that all requirements specified are fulfilled.

At the present time, practical answers to the problems of bond may depend only on a short-term bond strength testing rather than long-term performance. An initially achieved adequate bond is only an indication of conformance with the specified parameters. There is no well-defined relationship between initial bond strength and the longevity of a repair. Longevity is influenced by many factors, including substrate surface preparation and texture, shrinkage of the repair material, and surface conditions.

Although most of the specified requirements and engineers tend to focus on the achievement of the prescribed initial bond strength, it must be realized that although important, this parameter is not as important and critical as the bond durability – the lasting interfacial coexistence of two materials – as dictated by the surface conditions of the overlaid structure.

6 CERTIFICATION

Certification of materials (CE marking) and people is a necessary condition to achieve a good quality of work. The way to use materials and techniques depends on contractor organization and technicians on the site.

Experiences in Belgium are in development for the certification of “people”. Three levels of certification have been established:

- level A: worker;
- level B: problem solver (on the site);
- level C: engineer.

An ISO 9001 or equivalent organization system is first imposed for the company. Worker certification is based on education (1 day) and exams (theoretical and practical). For practical examination, worker has to apply selected repair materials on a concrete slab (Fig. 4). Evaluation is based on adhesion (higher than 2N/mm^2 - R4), flatness and absence of visible cracks.

The level C is based on an 8 ECTS course organized at the university: it includes concrete behavior, pathologies of materials and structures, repair materials and techniques, structural reinforcement, QC/QA, case histories. A certificate is obtained after exam. The objective is that the company where this “certified” engineer is employed is able to take care of repair works from the beginning to the end: diagnosis, interpretation, repair materials and techniques proposal, working operation, and QA system implementation. This certification is now in progress.

7 CONCLUSIONS

Quality of repairing concrete industrial floors with bonded cement-based overlays is specifically sensitive to environmental parameters, including concrete surface properties, water saturation level, temperature ...etc. These parameters have been largely individually studied through research projects all over the world.



Fig. 4 : Application of mortars on concrete substrate and finishing operations

The recommendations here above trend to integrate practices and rules from North America and Europe and offer to practitioner some indications to enhance the quality of work on site. Education is pointed out as a main challenge in the coming years.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are particularly thankful to the members of 193-RLS RILEM TC *Bonded cement-based material overlays for the repair, the lining or the strengthening of slabs and pavements*, who largely contributed to the edition of these recommendations.

The research was partially realized in the framework of research project supported by the Government of Slovenia and the Regional Government of Wallonia (Wallonia-Brussels International), Belgium, through the Scientific Cooperation Project (2010-2012).

REFERENCES

- [1] Vaysburd, A. M., & Emmons, P.H., “How to make today’s repairs durable for tomorrow – corrosion protection in concrete repair”, *Construction and Building Materials*, **14** (4), 2000, pp. 189-197.

- [2] State of the Art Report 193-RLS RILEM TC *Bonded cement-based material overlays for the repair, the lining or the strengthening of slabs and pavements*. B. Bissonnette, L. Courard, D.W. Fowler and J.L. Granju (Ed. Springer Verlag) 2011, 175p.
- [3] Some theoretical and practical considerations about surface preparation of concrete and adhesion of repair systems. L. Courard, A. Garbacz and T. Piotrowski. 16th Slovenski kolokvij o betonih, Ljubljana, Slove nie (27 mai 2009), pp19-28.
- [4] Carino, N.J. (2003) "Non destructive test methods to evaluate concrete structures". Sixth CANMET/ACI International Conference on the Durability of Concrete, Special Seminar, Thessaloniki, Greece, 75p.
- [5] Silfwerbrand, J., & Beushausen, H., (2005) Bonded Concrete Overlays – Bond Strength Issues. Proceedings, International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting. Cape Town, South Africa, November 21-23, 2005, pp. 19-21. (Extended version on conference CD, 10 pp.)
- [6] Courard L. and Garbacz A. (2010) Surfology: what does it mean for polymer concrete composites?. 13th International Congress on Polymers in Concrete (Ed. J. B. Aguiar, S. Jalali, A. Camoes and R. M. Ferreira), 10-12 February 2010, Madeira, Portugal, pp.355-362.
- [7] Bissonnette B., Courard L., Vaysburd A. and B clair N. (2006) Concrete removal techniques: influence on residual cracking and bond strength. *Concrete International*, **28**(12), 49-55.
- [8] Courard L., Michel F., Schwall D., Van der Wielen A., Garbacz A. and Piotrowski T., Perez F. and Bissonnette B. (2009) Surfology: concrete substrate evaluation prior to repair. *Materials Characterization: computational methods and experiments IV* (eds. A. Mammoli and C.A. Brebbia, Wessex Institute of Technology Press). The New Forest (U.K.), 17-19 June, 2009, pp 407-16.
- [9] Courard, L. (2000) Parametric Study for the Creation of the Interface between Concrete and Repair Products. *Mater. Struct.*, **33** (January-February 2000), 65-72.
- [10] Ashby, M.F. and Jones, D.R.H. (1986) *Engineering materials 2*, Pergamon Press, Oxford.
- [11] Czarnecki L (2005) Polymers in Concrete. Personal reflections on the edge of the new century. *Concrete International* (8), p.1-7.
- [12] Fowler D. (2007) State of the Art in Concrete Polymer Materials in the U.S. In: Proc. of the 12th International Congress on Polymers in Concrete, Kyu-Seok Yeon ed., Chuncheon, Korea, p. 29-36.
- [13] Ohama Y (2007) *Recent Research and Development Trends of Concrete-Polymer Composites in Japan*. In: Proc. of the 12th International Congress on Polymers in Concrete, Kyu-Seok Yeon ed., Chuncheon, Korea, p. 37-46.
- [14] Courard L. and Lenaers J.-F. (2009) Evaluation of saturation and microcracking of the superficial zone of concrete: new developments. ICCRRR08 International Congress on Concrete Repair, Reinforcement and Retrofitting, (*Alexander et al (eds), 2009 Taylor & Francis Group, London*), Cape Town (2008), pp.977-82.

Évaluation de l'adhérence des réparations en béton et identification des principaux facteurs d'influence

B. Bissonnette,¹ L. Courard,² A. Garbacz,³ M. Jolin,¹ A. Vaysburd⁴ et K.F. von Fay⁵

¹ CRIB, Département Génie Civil, Université Laval, Pavillon Adrien-Pouliot, 1065, avenue de la Médecine, Québec (Québec) G1V 0A6, Canada (benoit.bissonnette@gci.ulaval.ca)

² GeMMe Matériaux de construction, Département ArGenCo, Université de Liège, Liège, Belgique

³ Université des Technologies de Varsovie, Varsovie, Pologne

⁴ Vaycon Consulting, Baltimore, MD, U.S.A.

⁵ US Bureau of Reclamation, Denver, CO, U.S.A.

RÉSUMÉ. La réparation et le renforcement des structures existantes en béton comptent parmi les plus importants défis auxquels les ingénieurs civils sont confrontés aujourd'hui et qu'ils devront relever dans les années à venir. Les préoccupations actuelles concernant le développement durable favorisent la réfection au détriment de la construction neuve et ne peuvent que renforcer cette tendance. Des efforts concertés de la part des scientifiques et ingénieurs sont encore nécessaires afin d'améliorer la conception des réparations en béton et d'en assurer la qualité et la fiabilité attendues. L'un des aspects essentiels de la durabilité des réparations en béton et des revêtements ou traitements de surface est la qualité de l'adhérence entre le matériau de réparation et le béton existant. Le présent article résume les principales conclusions de travaux réalisés en collaboration en vue d'identifier les facteurs influençant l'adhérence des réparations (la rugosité, le degré de saturation et la carbonatation du substrat) et l'évaluation de celle-ci en conditions in situ (type de chargement, alignement de l'appareil). Sur la base des résultats recueillis, des recommandations ont été émises dans un guide du USBR.

ABSTRACT. Repair and strengthening of existing concrete structures are among the biggest challenges civil engineers are facing today and will have to face in the years to come. Present concerns of sustainable development emphasizing repair instead of new construction will only strengthen this trend. Concerted efforts towards improving the durability of concrete repairs are still needed from scientists and engineers. One of the critical aspects of durability of concrete repairs and overlays is lasting and sufficient interfacial bond between repair material and existing concrete substrate. This paper summarizes some of the findings of a collaborative study devoted to the most significant factors influencing bond in repairs (roughness, degree of saturation and carbonation of the substrate) and its field evaluation (type of loading, device misalignment). Based on the test results collected in different test programs, guideline-type recommendations for surface preparation prior to repair were issued in a USBR guideline.

MOTS-CLÉS : adhérence, béton, humidité, microfissuration, réparation, rugosité.

KEY WORDS: bond, concrete, microcracking, moisture, repair, roughness.

1. Introduction

Dans le domaine du génie civil, la réparation et la réhabilitation ont suscité une attention accrue ces dernières années. Bien que les ingénieurs réhabilitent de plus en plus de structures détériorées, le taux d'échec dans les projets de réparation d'ouvrages en béton demeure trop élevé. En raison de connaissances insuffisantes relativement à différents aspects fondamentaux, l'intervention se trouve parfois réduite à une approche de type *ça passe ou ça casse*.

L'objectif de la réparation est de prolonger la durée de vie utile d'une structure existante en rétablissant ses qualités d'origine (protection de l'armature, qualités esthétiques), sa capacité portante et/ou sa rigidité. L'une des conditions préalables pour obtenir une action composite satisfaisante est la durabilité de l'adhérence entre le substrat existant et le nouveau matériau mis en place. À cet égard, la préparation de la surface de l'élément en béton avant la mise en place du matériau de réparation est cruciale. En effet, quels que soient le matériau de réparation et la méthode d'application utilisés, la qualité de la surface préparée fera souvent foi du succès ou de l'échec d'un projet de réparation, ainsi que de la durabilité de la structure réparée.

L'adhérence d'une réparation sur le substrat existant est un phénomène complexe faisant intervenir différents types de liaisons [COU 00]: liaison chimique (réaction chimique entre le béton de support et le matériau de réparation), liaison mécanique (associée à l'interpénétration du matériau de réparation dans la rugosité et la porosité du substrat, provoquant un ancrage mécanique) et la liaison physique (forces de *van der Waals* et tensions de surfaces). Les diverses formes de liaison ont fait l'objet de plusieurs études au fil des années, ce qui a conduit à d'importants progrès dans la compréhension globale de la question [BIS 16]. Cependant, de nombreux aspects demeurent mal compris, comme par exemple leur influence relative sur le développement de l'adhérence sur un béton existant.

Dans le cadre d'un programme de recherche coopératif visant l'élaboration de critères de performance pour la préparation des surfaces en béton avant réparation, le travail expérimental rapporté se concentre sur les paramètres les plus influents du développement de l'adhérence. L'objectif général est de fournir à l'industrie des lignes directrices, incluant des critères de performance et des spécifications typiques pour la préparation des surfaces, pour la mise en œuvre systématique d'interventions durables.

Les objectifs spécifiques du programme étaient de:

- comparer les méthodes disponibles pour estimer les paramètres de rugosité d'une surface de réparation réparée;
- établir une corrélation entre les mesures d'adhérence (traction, cisaillement) et la rugosité de surface du substrat;
- évaluer quantitativement l'effet des défauts d'alignement sur les résultats de l'essai d'arrachement en traction;
- déterminer l'état humidité optimal dans le béton de support avant réparation;
- caractériser l'effet de la carbonatation sur l'adhérence.

2. Méthodologie

2.1. Évaluation de l'adhérence

Différentes séries d'essais ont été réalisées afin d'évaluer l'effet des paramètres évoqués précédemment sur l'adhérence de la couche de réparation. L'adhérence a généralement été évaluée au moyen d'essais d'arrachement en traction et dans certains cas, au moyen d'essais d'arrachement en torsion.

Pour l'évaluation de l'adhérence en traction, la méthode la plus exploitée est l'essai d'arrachement en traction (ex. : ASTM C1583, EN 1542:1999). Cette méthode d'essai consiste à forer une carotte ($d \geq 3 D_g$) dans la couche de réparation en traversant l'interface jusqu'au substrat, à coller une plaque de transfert

cylindrique en acier sur le dessus de la carotte avec un adhésif approprié (typiquement un adhésif époxydique) et, au moyen d'un vérin spécial instrumenté, à tirer sur la plaque jusqu'à l'arrachement de la carotte. Lorsque la rupture se produit dans la zone d'interface entre la couche de réparation et le substrat, l'adhérence en traction est égale à la contrainte maximale enregistrée; lorsque la rupture se produit ailleurs de manière franche (substrat, couche de réparation), une valeur limite inférieure (conservatrice) est obtenue.

En conditions réelles de service, l'interface d'une réparation est soumise à la fois à des contraintes de traction et à des contraintes de cisaillement. À ce jour, très peu de résultats de mesures d'adhérence en cisaillement ont été rapportées dans la documentation scientifique. Des essais d'arrachement en torsion ont donc été effectués dans la présente étude afin d'évaluer la réponse en cisaillement et de la comparer à celle obtenue en traction. Dans cette procédure d'essai, le forage est effectué avec un carottier double à tubes concentrique. Une plaque de transfert annulaire collée à la surface et l'ensemble est soumis à un couple de torsion jusqu'à l'arrachement au moyen d'un vérin spécial instrumenté ancré à la surface. Dans le cas présent, le vérin utilisé était le même que celui utilisé pour les essais d'arrachement en traction, mais équipé d'adaptateurs spéciaux.

2.2. Influence de la rectitude d'alignement

Les essais d'arrachement sont généralement pratiqués en conditions *in situ*, dans des conditions rendant parfois difficile l'installation adéquate de l'appareillage (forage et essai). Afin d'évaluer la sensibilité des résultats expérimentaux à cet égard, des séries d'essais d'arrachement en traction ont été effectuées en induisant de manière contrôlée différents degrés de désalignement vertical. Une série de six dalles de béton de 600×400×100 mm a été fabriquée pour chacun des trois mélanges de béton (30 MPa, 40 MPa et 50 MPa). Après 28 jours de cure humide, les dalles en béton ont été préparées au jet de sable et les essais d'arrachement en traction ont été effectués suite à des carottages pratiqués à des angles d'inclinaison contrôlés de 0°, 2° et 4° par rapport à la verticale et des profondeurs de pénétration dans le substrat de 15 et 30 mm. Une analyse élastique complémentaire a été réalisée sur un code de calcul MEF.

2.3. Influence de la préparation de surface: rugosité et intégrité mécanique

Afin de couvrir un spectre suffisamment large en fait de rugosité et évaluer les techniques de préparation des surfaces les plus habituelles, les méthodes suivantes ont été sélectionnées pour les essais: jet de sable (SaB), grenailage (ShB), scarification (Sc), hydrodémolition à 100 MPa (HJ) et marteau à percussion de 7 kg (JH). En plus, afin d'éviter la présence de dommages induits et permettre ainsi de véritablement isoler l'effet de la rugosité sur la force de liaison, une dalle d'essai profilée artificiellement a été préparée. Pour ce faire, des matrices en acrylique usinées avec un profil ondulatoire triangulaire ont été installées à la base du coffrage afin de produire sur la face moulée de la dalle des ondes avec des amplitudes respectives de 2, 4, 6 et 8 mm (longueur d'onde constante de 30 mm) réparties en quatre zones adjacentes couvrant chacune le quart de la longueur de la dalle (voir Figure 1).

Dans le cadre du programme d'essais rapporté ici, deux séries de dalles béton de 625×1250×150 mm (bétons de 25 MPa et 35 MPa) ont été fabriquées. Les dalles d'essai ont été exposées au séchage dans le laboratoire jusqu'à l'atteinte d'une stabilité dimensionnelle relative, après quoi les opérations de préparation des surfaces ont été effectuées. La dalle profilée artificiellement a quant à elle été très légèrement préparée au jet de sable pour éliminer la laitance.

Au terme des opérations de préparation des surfaces, la rugosité et l'intégrité mécanique des surfaces ont été évaluées sur chacune des dalles d'essai.

La rugosité de surface des dalles en béton a été évaluée en utilisant un dispositif de profilométrie optique de type *Moiré*. La méthode a l'avantage de capturer toute l'information nécessaire en un laps de temps très court et de la stocker sous un format numérique pour le post-traitement, ce qui permet une caractérisation précise et détaillée du profil de surface. Le paramètre utilisé ici pour décrire quantitativement la rugosité de surface est la demi-amplitude moyenne (R_a) du profil. De façon

complémentaire, les profils de surface des dalles d'essai ont également été évalués suivant l'échelle de l'indice CSP (*concrete surface profile*) proposé par le *International Concrete Repair Institute* [ICR 97].

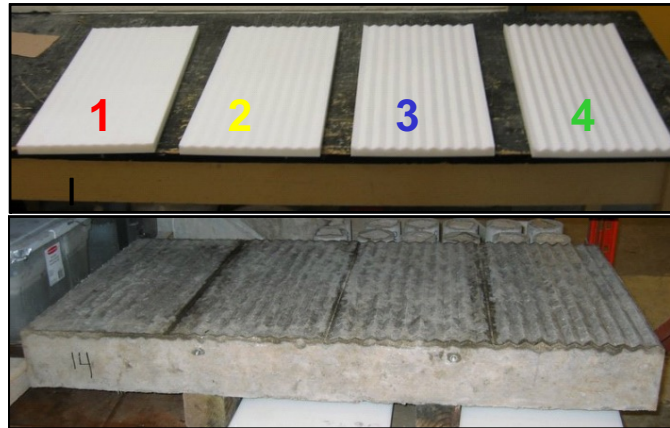


Figure 1. Matrices en acrylique usinées ($A = 2, 4, 6$ et 8 mm; $B = 30$ mm) avec un profil ondulatoire et surface résultante de la dalle profilée artificiellement.

L'intégrité de surface des dalles préparées a été évaluée de deux façons, soit au moyen d'essais d'arrachement en traction et au marteau *Schmidt*. Recherchant un moyen simple et facilement exploitable en conditions *in situ* pour évaluer l'intégrité de surface avant réparation, des sondages au marteau *Schmidt* ont en effet été réalisés de façon systématique sur toutes les dalles préparées, à l'aide d'un gabarit comportant des points de mesure espacés régulièrement dans les directions X et Y sur l'ensemble de la surface. Des tests d'arrachement en traction ont été effectués immédiatement après les sondages *Schmidt*, conformément à la procédure proposée par Courard et coll. [COU 04].

Une fois les mesures de rugosité et d'intégrité complétées, les dalles ont été soumises à des essais d'arrachement en traction et torsion, répartis de manière systématique avec le même gabarit. Il convient de mentionner que dans le cas de la dalle profilée artificiellement, l'adhérence a été déterminée en traction directe (essais sur presse) sur des carottes extraites des dalles.

2.4. Évaluation de la teneur en humidité du substrat

Dans cette partie du programme, deux procédures sur l'humidité de surface en béton ont été étudiées, soit le *test d'absorption initiale de surface* (ISAT) et une version modifiée du test de succion capillaire (MCST) [COU 11]. L'objectif était de corréliser l'état de saturation de la surface réceptrice en béton avec les caractéristiques de pénétration de l'humidité évaluées par ces tests, de manière à disposer d'une méthode quantitative simple pour l'évaluation *in situ* de l'état d'humidité d'une surface en béton.

Trois séries de corps d'épreuve ont été fabriquées avec des bétons ordinaires à base de ciment Portland (30 MPa, 40 MPa et 50 MPa). Les traitements de surface suivants ont été effectués sur des sous-ensembles d'éprouvettes de chaque série: sans traitement (référence), jet de sable et jet d'eau sous pression. Les dalles d'essais ont ensuite été soumises à différentes séquences de conditionnement en humidité (combinaisons variées de séquences d'entreposage dans l'air à 50 % H.R., 85 % H.R., 100 % H.R., dans l'eau, et / ou dans une étuve à 40 °C) pour obtenir huit niveaux d'humidité couvrant un spectre d'humidité relative de 30 à 100 % [COU 11]. Après stabilisation et évaluation de la teneur en eau (mesures gravimétriques effectuées sur des éprouvettes témoins), les dalles ont fait l'objet de mesures au moyen des techniques ISAT et MCST.

Des dalles préparées au jet de sable et assujetties aux mêmes séquences de conditionnement (pour H.R. = 50 à 100 % H.R.) ont finalement été ragréées avec une couche de 10 mm de l'un ou l'autre de deux mortiers modifiés aux polymères (mortiers A ou B, à base d'acrylique) de 10 mm d'épaisseur, après application d'un coulis modifié aux polymères (état sec ou humide). Les dalles d'essai réparées ont été

placées en cure humide pendant 7 jours, puis exposées à l'air jusqu'à ce que les essais d'arrachement en traction soient effectués.

2.5. Évaluation de l'effet de la carbonatation sur l'adhérence

Dans cette partie du projet, une série de dix-huit dalles de 400×400×100 mm a été fabriquée avec un mélange de béton de 28 MPa. Pour la moitié de ces dalles, la surface a été préparée superficiellement au jet de sable alors que pour l'autre moitié, un marteau à percussion léger a été utilisé. Dans chaque groupe, quatre dalles ont été protégées de la carbonatation (dalles témoins), les cinq autres subissant une exposition au CO₂ contrôlée dans un cabinet de carbonatation en laboratoire. Les dalles témoins ont été protégées par une feuille de plastique et du ruban adhésif afin d'y prévenir la carbonatation. Les dalles ont été conditionnées pendant 75 jours. À cette échéance, dans les dalles conservées en cabinet, la profondeur de carbonatation atteignait plus de 3 mm. Les dalles témoins et les dalles carbonatées ont alors été resurfacées avec une chape en béton ordinaire (28 MPa) de 100 mm d'épaisseur. Au total, neuf essais d'arrachement en traction ont été pratiqués sur chacune des dalles réparées.

3. Résultats et analyse

3.1. Influence de la préparation de la surface

3.1.1. Rugosité du substrat

Les valeurs de rugosité (demi-amplitude R_a) correspondant aux différents profils de préparation de surface, tel qu'obtenues par profilométrie optique, sont présentées sur le graphique de la Figure 2. À titre indicatif, les valeurs enregistrées pour les gabarits en caoutchouc ICRI CSP sont également affichées sur ce graphique. Les plus grandes valeurs de demi-amplitude (de 1,5 à 3,8 mm) ont été obtenues pour le marteau à percussion et l'hydrodémolition, tandis que les valeurs les plus basses ont été enregistrées respectivement pour la scarification, le grenailage et le jet de sable (< 1 mm). Il peut également être observé que pour toutes les dalles et gabarits ICRI caractérisés, la rugosité de surface est relativement uniforme, la plupart des points reposant sur ou très près de la ligne d'égalité.

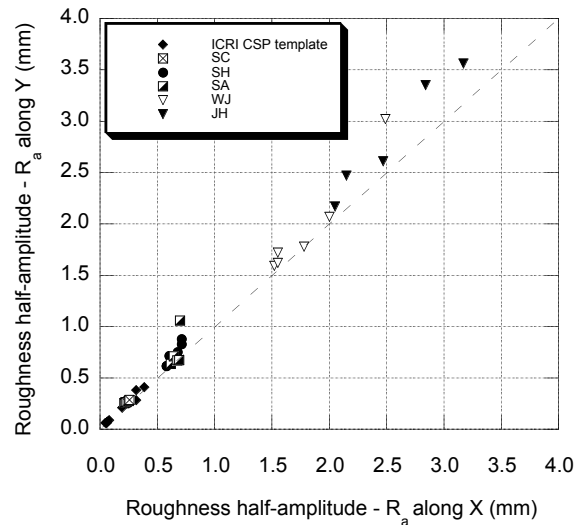


Figure 2. Résultats des mesures de rugosité effectuées par profilométrie optique sur des dalles de béton (25 et 35 MPa) préparées avec différentes techniques (ici et par la suite dans l'article: SC: scarification; SH: grenailage; SA: jet de sable; WJ: hydrodémolition; JH: marteau-piqueur).

Comme le montre le graphique de la Figure 2, les plaques ICRI CSP couvrent à peine les valeurs de rugosité enregistrées pour la scarification, toutes les autres techniques étant hors de leur spectre de détection pour les conditions expérimentales considérées. Aussi pratiques soient les gabarits CSP, leur utilisation est ainsi limitée aux traitements de surface légers visant essentiellement à accroître la rugosité, sans retranchement significatif de béton.

Il est important par ailleurs de souligner que le type de rugosité considéré dans cette étude est la *méso-rugosité*, laquelle est étroitement associée à la distribution granulométrique du béton. Lors du traitement des résultats, la grande ondulation caractérisant par exemple les surfaces traitées au marteau à percussion et par hydrodémolition est extraite par filtrage du signal. Quoi qu'il en soit, les valeurs de R_a obtenues suggèrent que ces deux techniques exposent davantage les plus gros granulats que ne le font les autres méthodes considérées.

3.1.2. Intégrité mécanique du substrat

Les résultats des essais d'arrachement en traction effectués sur les dalles d'essai préparées avec différentes méthodes de démolition sont résumés sur la Figure 3. Globalement, les résultats obtenus respectivement avec les substrats de 25 MPa et 35 MPa sont cohérents avec les résultats des essais de caractérisation mécanique des bétons correspondants. Il peut de plus être observé que pour chacune des deux séries, les contraintes d'arrachement moyennes obtenues pour les dalles préparées par jet de sable, grenailage et scarification s'approchent de la résistance en traction du béton de support. Ces substrats ont donc conservé leur intégrité mécanique superficielle malgré les opérations de préparation de surface. De fait, dans la plupart des essais, la rupture s'est produite au fond de la carotte, loin de la surface.

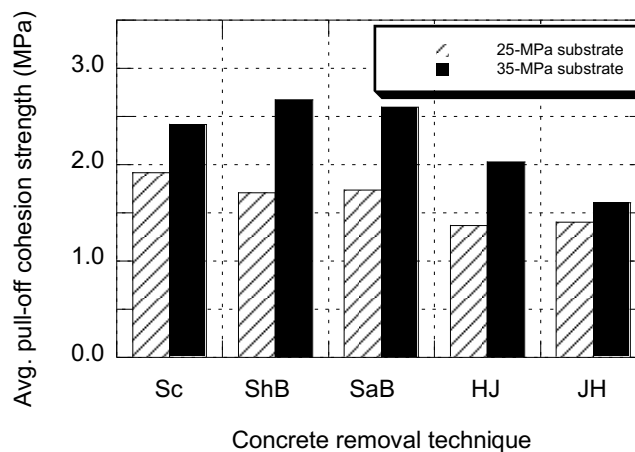


Figure 3. Résultats des essais d'arrachement en traction (CSA A23.2-6B modifiée) effectués sur les dalles d'essai après les opérations de préparation pour en évaluer l'intégrité mécanique superficielle.

En comparaison, les contraintes d'arrachement en traction moyennes enregistrées pour les dalles préparées au marteau-piqueur sont nettement inférieures, en particulier pour le béton de 35 MPa. Ceci traduit vraisemblablement la présence de défauts localisés en surface induits par la pointe de marteau, comme en témoigne le grand nombre de ruptures enregistrées près de la surface dans les essais. Ces dommages induits dans le substrat par les marteaux à percussion, typiquement associés à de la fissuration localisée, ont été évalués dans une précédente étude [BIS 06].

Dans le cas de l'hydrodémolition, comme tendent à le démontrer subséquentment les résultats des essais d'arrachement en traction sur dalles réparées, les contraintes d'arrachement en traction plus basses enregistrées ne sont probablement pas dues à de l'endommagement (ruptures survenues majoritairement dans la masse), mais plutôt à l'incidence de la forte ondulation de la surface produite par l'hydrodémolition sur la réalisation des essais d'arrachement. Bien qu'une attention particulière ait été portée lors de

l'installation des rondelles de transfert pour assurer un alignement adéquat du dispositif d'essai, la forte ondulation de la surface n'a apparemment pu être entièrement compensée.

Les sondages au marteau *Schmidt* effectués sur les dalles justes après la préparation de surface sont résumés sur le graphique de la Figure 4.

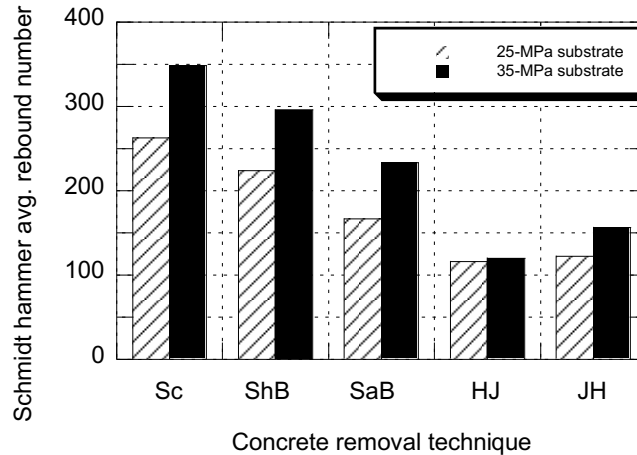


Figure 4. Résultats des sondages au marteau *Schmidt* (ASTM C805) effectués sur les dalles d'essai après les opérations de préparation pour en évaluer l'intégrité mécanique superficielle.

Comme la mesure de rebond enregistrée avec le marteau *Schmidt* est fonction de la dureté et de la résistance mécanique du matériau, il n'est pas non plus surprenant de constater que quelle que soit la technique de préparation de la surface, les valeurs moyennes de rebond enregistrées sur les dalles fabriquées avec le béton de 35 MPa sont systématiquement plus élevées que celles obtenues sur les dalles fabriquées avec le béton de 25 MPa. Les valeurs de rebond enregistrées montrent une variabilité importante, comme en témoignent les écarts-types relativement élevés. Ce résultat n'est pas inattendu, étant donné la variabilité intrinsèque des essais et la forte irrégularité de la surface testée. Quoiqu'il en soit, les tendances moyennes affichées par les résultats des sondages au marteau *Schmidt* pour les différentes techniques de préparation de surface étudiées sont en quelque sorte semblable à celles observées pour les résultats des mesures d'arrachement en traction. Il apparaît donc que pour les surfaces ne présentant pas une ondulation trop prononcée, le marteau *Schmidt* peut fournir des renseignements utiles sur l'intégrité du substrat, à condition que le nombre et la distribution des sondages soient adéquats.

3.1.3. Évaluation de l'adhérence

Les résultats des mesures d'adhérence en traction et en cisaillement réalisées sur les dalles expérimentales préparées avec différentes méthodes d'enlèvement du béton et ensuite réparées sont présentés sur les Figures 5 à 7.

Essais d'arrachement en traction (pull-off)

Pour l'ensemble des dalles testées, à l'exception de celles préparées au marteau-piqueur, les résultats des essais d'arrachement en traction (Figure 5) sont comparables aux valeurs de résistance en fendage moyennes du béton constitutif du substrat, tant pour la série de dalles de 25 MPa que celles de 35 MPa ($f_{st-28j} = 1.9$ et 3.2 respectivement). Dans le cas des dalles de 25 MPa, pour lesquelles les résultats sont particulièrement proches de la résistance mécanique du substrat, la rupture est survenue systématiquement dans le substrat lors des essais d'arrachement, sauf encore une fois pour les dalles préparées au marteau-piqueur.

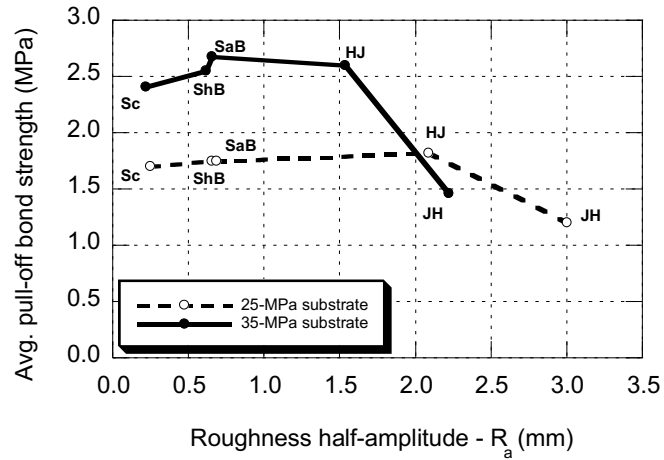


Figure 5. Résultats des essais d'arrachement en traction (ASTM C1583) effectués après réparation sur les dalles d'essai préparées avec différentes techniques.

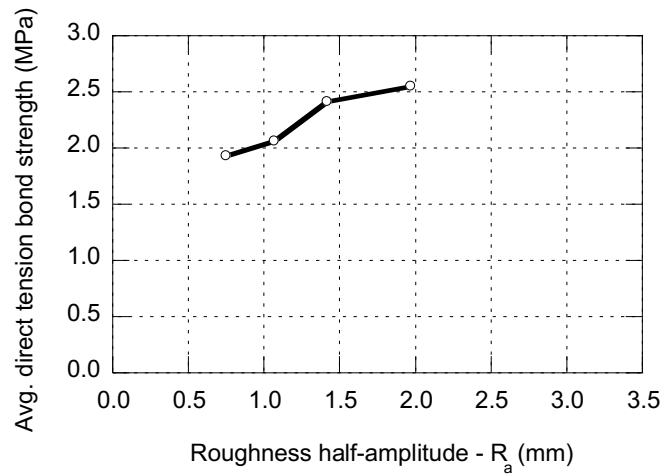


Figure 6. Résultats des essais d'arrachement en traction (ASTM C1583) effectués après réparation sur la dalle d'essai profilée artificiellement.

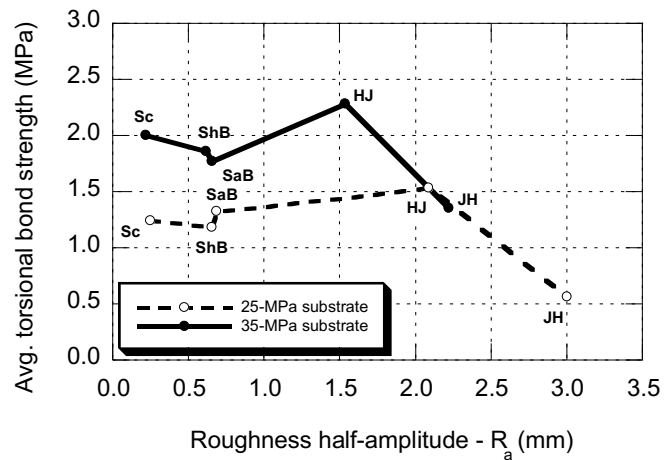


Figure 7. Résultats des essais d'arrachement en torsion effectués après réparation sur les dalles d'essai préparées avec différentes techniques.

Dans le cas des dalles préparées au marteau-piqueur, même si un appareil léger (7 kg) a été utilisé, les valeurs de résistance à l'arrachement enregistrées sont significativement plus basses et, pour un grand nombre d'essais (> 90%), la rupture s'est produite dans la zone d'interface. Comme pour les mesures de résistance en traction superficielle, cela est vraisemblablement attribuable à la présence de défauts locaux induits dans le substrat lors des opérations d'enlèvement du béton.

En ce qui concerne l'influence de la rugosité superficielle du substrat sur l'adhérence de la réparation, les résultats présentés sur le graphique de la Figure 5 tendent à démontrer que la résistance à l'arrachement augmente avec l'accroissement de la rugosité de la surface réparée, dans la mesure où celle-ci n'est pas endommagée. Lorsque des dommages sont induits ou laissés à la surface du substrat, comme c'est selon toute vraisemblance le cas ici avec le marteau-piqueur, l'influence positive de l'augmentation de la rugosité s'en trouve atténuée, voire complètement annulée, suivant l'ampleur et la sévérité des défauts.

En accord avec ces tendances, les résultats des essais effectués sur des carottes extraites de la dalle profilée artificiellement (Figure 6) montrent de façon très nette que l'adhérence en traction augmente avec l'amplitude de la rugosité du substrat. Cela tend à confirmer que l'accroissement de la surface de contact associé à une plus forte rugosité favorise une adhérence accrue de la réparation, dans la mesure où les opérations de profilage n'induisent pas de microfissuration et/ou autres dommages significatifs.

Essais d'arrachement en torsion

Les résultats des essais d'arrachement en torsion sont présentés sur le graphique de la Figure 7. Aussi bien en ce qui concerne l'amplitude des valeurs enregistrées que les tendances relevées, ces résultats montrent des similitudes avec ceux d'arrachement en traction. Ici encore, la résistance du substrat et la présence de dommages sont des paramètres influents. Contrairement à ce qui aurait pu être anticipé sur une base intuitive, la rugosité ne semble pas jouer un rôle plus important en cisaillement qu'en traction.

3.2. Influence d'un désalignement sur les résultats de l'essai d'arrachement en traction

Les résultats théoriques et expérimentaux présentés sur le graphique de la Figure 8 montrent que les valeurs de résistance à l'arrachement enregistrées diminuent à mesure que l'angle de désalignement par rapport à la verticale augmente. Évidemment, plus la profondeur de carottage est importante, plus l'effet d'excentricité qui en résulte est grand et affecte négativement la résistance enregistrée.

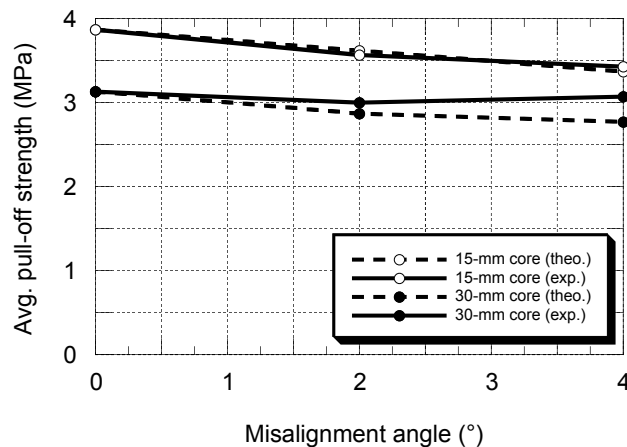


Figure 8. Influence de l'angle de désalignement sur les résultats des essais d'arrachement en traction: comparaison des résultats théoriques et expérimentaux.

Jusqu'à un désalignement vertical de l'ordre de 4°, valeur considérée dans cette étude comme limite approximative de détection du désalignement par l'œil humain moyen, les résultats des simulations n'ont pas permis de relever de différences significatives dans les champs de contrainte générés respectivement par un désalignement du forage et un désalignement de la charge d'arrachement. À des fins de calculs

pratiques, ils peuvent donc être traités de manière similaire. Quant au mode de rupture, on peut considérer que pour un désalignement n'excédant pas 4°, les caractéristiques du mode de rupture dans l'essai d'arrachement en traction ne sont pas affectées de manière significative.

Les résultats des simulations suggèrent une limite inférieure conservatrice pour l'évaluation de l'influence du désalignement sur les résultats des essais d'arrachement en traction. Pour des profondeurs de carottage de 15 et 30 mm respectivement, on peut s'attendre à une réduction de l'ordre de 7 à 9 % de la résistance à l'arrachement dans le cas d'un désalignement de 2°, et de 13 à 16 % dans le cas d'un désalignement de 4°.

Les résultats expérimentaux des essais d'arrachement en traction sont comparables aux résultats des calculs théoriques, bien que les tendances s'en dégageant ne soient pas aussi claires, en raison vraisemblablement de la variabilité expérimentale et de l'influence additionnelle de la profondeur du carottage.

D'un point de vue pratique, les résultats obtenus dans cette étude montrent que le désalignement dans les essais d'arrachement peut causer le rejet d'une réparation ayant une adhérence en traction satisfaisante. Dans la mesure où le nombre d'essais réalisés serait suffisamment important, on pourrait spécifier une limite inférieure comme critère d'acceptation de la résistance à l'arrachement, la valeur moyenne acceptable étant diminuée par exemple de 5 à 10 % afin de prendre en compte le biais induit par les problèmes de désalignement dans les essais. Le nombre d'essais réalisés typiquement aux fins des opérations de contrôle de la qualité sur site est toutefois largement insuffisant pour ce faire et, de toute façon, l'utilisation de l'adhérence spécifiée comme limite d'acceptation est conservatrice.

3.3. Influence de la teneur en humidité

L'essai ISAT (indice de perméabilité) que l'essai MCST affichent tous deux une relativement bonne corrélation avec la teneur en humidité du béton, en particulier à un niveau inférieur à 80 % HR [COU 11].

Les résultats des essais ISAT se sont révélés insensibles à la résistance en compression du béton dans la gamme de formulations testée. Les résultats ont été influencés par la qualité de la surface du substrat, mais il est difficile de conclure si cela est dû à la rugosité de surface, à la microfissuration ou à la combinaison des deux paramètres. La variation relativement élevée et la dispersion caractérisant les résultats des essais ISAT peuvent provenir de la difficulté à effectuer les essais sur des surfaces de béton au profil fortement accidenté (profil obtenu par exemple après l'hydrodémolition).

L'essai MCST a produit des tendances claires et des informations moins dispersées que celles de l'ISAT, de même qu'une meilleure corrélation avec les mesures de teneur en eau (mesures massiques). Une corrélation satisfaisante a par ailleurs été observée entre l'indice d'absorption de l'eau et le coefficient d'absorption capillaire déterminés respectivement à partir des résultats des deux essais.

L'influence de la teneur en humidité du substrat sur l'adhérence d'un matériau de réparation est illustrée sur la Figure 9 pour un mortier modifié aux polymères. Globalement, pour les systèmes de réparation considérés dans le projet, le niveau de saturation optimal pour l'adhérence des réparations se situe entre 55 et 90 %.

Il est clair que des travaux supplémentaires sont nécessaires afin d'identifier une méthode utilisable en conditions *in situ* et, en outre, pour évaluer de manière plus précise et fiable les fourchettes de niveaux de saturation optimaux pour les matériaux de réparation à base cimentaire.

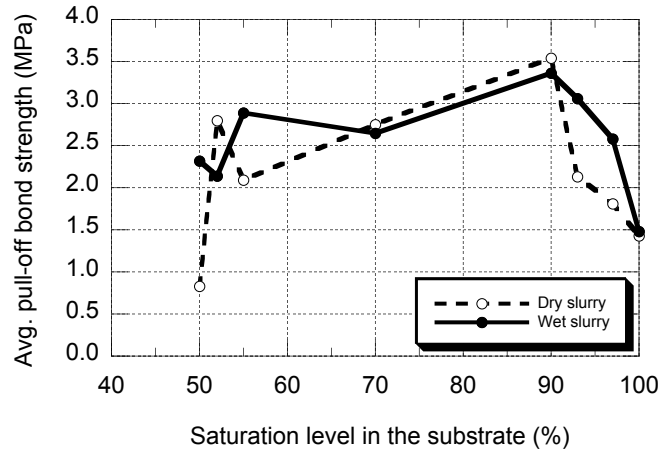


Figure 9. Résultats des essais d'arrachement en traction (EN 1542:1999) effectués sur des dalles d'essai réparées à différents niveaux de saturation avec un mortier de réparation modifié aux polymères, mis en place après application d'un coulis modifié aux polymères (sec ou humide).

3.4. Influence de la carbonatation

Les résultats des essais de d'arrachement en traction enregistrés pour des dalles soumises à deux types de préparation (SaB et JH) et ensuite réparées avec un béton de 28 MPa, avec ou sans carbonatation de la surface, sont illustrés sur le graphique de la Figure 10. Pour les dalles préparées au jet de sable, aucune différence notable n'est relevée entre les substrats en béton carbonatés et non carbonatés. À l'inverse, pour les dalles préparées au marteau-piqueur, une réduction de 16 % de la contrainte d'arrachement moyenne a été enregistrée pour les substrats carbonatés par rapport à ceux non carbonatés. Ces résultats en apparence contradictoires sont peut-être attribuables aux défauts induits sous la surface des dalles d'essai préparées au marteau-piqueur. Le nombre limité d'essais réalisés avec un seul type de matériau de réparation ne permet toutefois pas de tirer des conclusions générales quant à l'effet global de la carbonatation sur la l'adhérence d'une réparation. Différents matériaux de réparation n'obéiront pas nécessairement aux mêmes tendances en ce qui a trait au développement de l'adhérence sur une surface réceptrice carbonatée. Il semble probable cependant que la carbonatation n'ait qu'un faible impact sur l'adhérence d'une surface en béton adéquatement préparée, exempte de microfissuration et autres défauts.

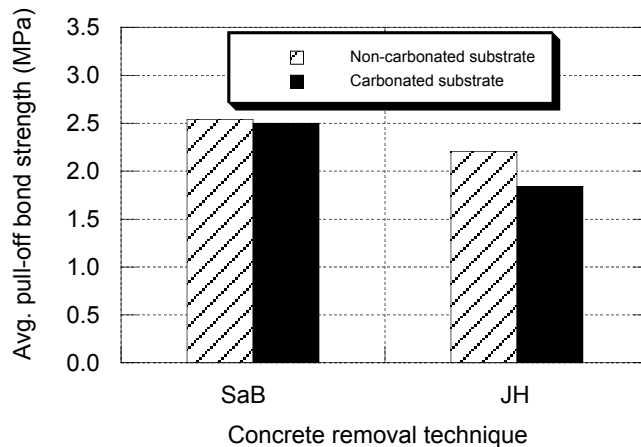


Figure 10. Résultats des essais d'arrachement en traction (ASTM C1583) effectués sur les dalles d'essai préparées avec différentes techniques, à l'état non carbonaté ou carbonaté.

4. Conclusion

L'étude a généré des données et informations fort utiles pour l'évaluation et la caractérisation de la préparation d'une surface en béton avant réparation.

L'essai d'arrachement en traction est une méthode de caractérisation *in situ* très pratique, non seulement pour l'évaluation de l'adhérence d'une réparation, mais également pour l'évaluation de la résistance en traction et de l'intégrité mécanique d'une surface en béton préalablement à la réparation. Une évaluation fiable de ces propriétés peut être obtenue, à condition qu'un nombre minimum d'essais soit effectué avec un équipement et un protocole expérimental adéquats. En-deçà de la limite de détection des défauts d'alignement (forage ou installation du vérin) à l'œil nu, l'erreur potentielle maximale sur la mesure est évaluée à environ 15 %. Dans le cadre d'essais pour le contrôle de la qualité, ce biais ne peut toutefois affecter l'évaluation de la résistance à l'arrachement que de façon conservatrice.

L'adhérence d'une réparation du béton dépend d'un certain nombre de paramètres. Il a été démontré qu'en l'absence de dommages induits dans le substrat, l'adhérence en traction augmente avec l'accroissement de la rugosité du substrat. Le paramètre le plus important demeure toutefois l'intégrité mécanique du béton de la surface réceptrice. À cet égard, il faut souligner que les équipements à percussion comme le marteau-piqueur induisent des dommages potentiellement importants sur la surface préparée, lesquels peuvent facilement annuler les bénéfices d'une rugosité accrue.

L'humidité et l'état de carbonatation du substrat constituent d'autres paramètres importants de la surface dont il importe de considérer l'influence sur le développement de l'adhérence d'une réparation. Les résultats obtenus dans la présente étude montrent que le niveau optimal de saturation pour le développement de l'adhérence dans une réparation se situerait entre 50 et 90 % H.R. Dans la mesure où la préparation adéquatement effectuée, la carbonatation semble quant à elle avoir relativement peu d'impact sur l'adhérence.

Sur la base des résultats du programme de recherche présentés dans cet article, un guide intitulé « *Best Practices for Preparing Concrete Surfaces Prior to Repairs and Overlays* » et visant plus spécifiquement les réparations et revêtements avec des matériaux à base de ciment Portland a été émis par le U.S. Bureau of Reclamation [BIS 12]. Par ailleurs, ces questions sont abordées en détail dans un ouvrage récent proposant une revue exhaustive des notions fondamentales de l'ingénierie des surfaces en béton [BIS 16].

5. Remerciements

Ce projet a été soutenu financièrement par le Concrete Research Council de l'American Concrete Institute (ACI), le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG), le Fonds de Recherche Québécois sur la Nature et les Technologies (FRQ-NT), le U.S. Bureau of Reclamation (USBR), et les partenaires industriels de la *Chaire CRSNG sur la Réparation durable et l'entretien optimisé des infrastructures en béton* à l'Université Laval (BASF, Euclid, Holcim, Hydro-Québec, Kerneos, King Packaged Materials, Lafarge, Ministère des Transports de Québec, Ville de Montréal, Ville de Québec, W.R. Grace & Co.), et à travers les programmes de coopération scientifiques des gouvernements polonais, québécois et de Wallonie-Bruxelles.

6. Références

- [ACE 92] CRD-C 164, Standard Test Method for Direct Tensile Strength of Cylindrical Concrete or Mortar Specimens, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, USA, 1992.
- [AST 02a] ASTM C469, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, *Annual Book of ASTM Standards, Concrete and aggregates*, volume 04.02, ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 2002.

- [AST 02b] ASTM C805, Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, *Annual Book of ASTM Standards, Concrete and aggregates*, volume 04.02, ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 2002.
- [AST 04a] ASTM C496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *Annual Book of ASTM Standards, Concrete and aggregates*, volume 04.02, ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 2004.
- [AST 04b] ASTM C1583, Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension. Pull-off Method), *Annual Book of ASTM Standards, Concrete and aggregates*, volume 04.02, ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 2004.
- [AST 05] ASTM C39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *Annual Book of ASTM Standards, Concrete and aggregates*, volume 04.02, ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 2005.
- [BIS 06] Bissonnette, B., Courard, L., Vaysburd, A.M., « Concrete removal techniques – Influence on residual cracking and bond strength », *Concrete International*, vol. 28, n° 12, 2006, p. 49-55.
- [BIS 12] Bissonnette, B., Vaysburd, A.M., Von Fay, K.F., Best practices for preparing concrete surfaces prior to repairs and overlays, Report Number MERL 12-17, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, CO, USA, 2012, 92 p.
- [BIS 16] Bissonnette B., Courard L., Garbacz, A. *Concrete surface engineering*, Modern Concrete Technology (18), CRC Press, Taylor and Francis Group, 2016, 258 p.
- [COU 00] Courard, L., « Parametric study for the creation of the interface between concrete and repair products », *Materials and Structures*, vol. 33, n° 225, 2000, p. 65-72.
- [COU 04] Courard, L., Bissonnette, B., « Essai dérivé de l'essai d'adhérence pour la caractérisation de la cohésion superficielle des supports en béton dans les travaux de réparation : analyse des paramètres d'essai », *Materials and Structures*, vol. 37, n° 269, 2004, p. 342-350.
- [COU 11] Courard, L., Lenaers, J.F., Michel, F., Garbacz A., « Saturation level of the superficial zone of concrete and adhesion of repair systems », *Construction and Building Materials*, vol. 25, n° 5, 2011, p. 2488-2494.
- [CSA 00] CSA A23.2-6B, Method of Test to Determine Adhesion by Tensile Load, *CSA A23.2-00 Methods of Test for Concrete*, Canadian Standards Association, Rexdale, ON, Canada, 2000.
- [ECS 99] EN 1542:1999, Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Measurement of bond strength by pull-off, Work Item Number 00104089, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1999.
- [ICR 97] ICRI Guideline No. 03732, Selecting and Specifying Concrete Surface Preparation for Sealers, Coatings, and Polymer Overlays, International Concrete Repair Institute, Des Plaines, IL, USA, 1997.

Repair quality control with elastic waves based methods vs. concrete substrate quality

A.Garbacz & T. Piotrowski

Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland

L. Courard

University of Liege, Liege, Belgium

B.Bissonnette

CRIB – Dept. of Civil Engineering, Laval University, Quebec (QC), Canada

ABSTRACT: Adhesion in repair system is one of the most important factors that affect its efficiency. The elaboration of reliable nondestructive method for an adhesion mapping is one of the most important tasks. Several of the NDT methods mentioned in EN 1504-10 and ACI Concrete Repair Manual for assessment of concrete structures are based on propagation of stress waves. However, these investigations are rarely focused on evaluation of bond strength. Repair system is difficult to test with NDT methods because of many factors influencing stress wave propagation. In this paper the effect of a quality of concrete substrate on propagation of stress waves in repair system and their influence on possibility of the bond strength estimation is discussed.

1 INTRODUCTION

As a result of repair or protection of the building structure at least two component system: concrete substrate in contact with repair material is produced.

An adhesion in such system is one of the most important factors that affect the durability of repair (Czarnecki & Emmons, 2002). The adhesion depends on many phenomena taking place at interface zone (Courard 2005, Silfwerbrand & Beushausen 2006, Garbacz et al. 2005, Courard et al. 2011): presence of bond-detrimental layers, wettability of concrete substrate by repair materials, roughness and microcracking of concrete substrate, moisture content in concrete substrate versus repair material (i.e. cement or polymer mortar).

The above factors imply that, according to the many standards and guidelines such as European Standard EN 1504-10 and ACI Concrete Repair Manual (2003), both bond strength and bond quality should be evaluated. The pull-off test is recommended for assessment of bond strength. The use of pull-off test, due to its semi-destructive character, is restricted by owners and managers. Therefore, the elaboration of reliable nondestructive method for an adhesion mapping is one of the most important tasks. A majority of NDT methods mentioned in EN 1504-10 and ACI Concrete Repair Manual for assessment of concrete structures are based on propagation of stress waves. Particularly ultrasonic

methods (UPV), impact echo (IE) and impulse-response (IR) methods are recommended for evaluation of repair quality. Lately a combinations of NDT methods are investigated (Garbacz et al 2013). However, these investigations are rarely focused on evaluation of bond strength.

To select the appropriate NDT method for repair quality control, the following factors should be taken into account (Carino 1997, Garbacz 2005) :

- type and size of defects at the interface zone to be investigated;
- thickness of overlay;
- type of repair material (cement based or polymer composites);
- quality of concrete substrate (roughness, microcracking, saturation level).

First two factors have a major influence depend mainly on NDT method used. Type of repair material could affect a reflection coefficient. In the case of multilayer system the propagation of stress waves depends on differences in acoustic impedances of the both repair material and concrete substrate (Carino 1997). The reflection coefficient for concrete/air interface is equal nearly to 1.0 - there is almost total reflection at the interface. Experimental investigations with IE method have shown that usually an interface is “visible” if absolute value of R coefficient is higher than +0.24 (Sansalone & Carino 1989). Garbacz (2015) showed that in the case of many commercial polymer cement (PCC) and polymer (PC) repair mortars their acoustic

impedances are similar to the it can be assumed that repair material and concrete substrate have similar acoustic impedances (Fig. 1).

The above conclusions allow to assume that detection of flaws at the interface overlay - concrete substrate can be performed with procedures developed for “solid” concrete structures. The effect of interface should be taken into account in the case of overlays with acoustic impedance different than that for concrete substrate. eg. pure polymer coating, asphalt pavements, etc.

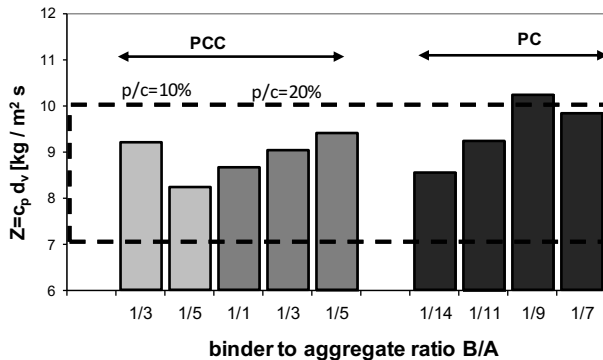


Figure 1. The acoustic impedance of tested polymer-cement and polymer (w/o Portland cement) mortars and concretes representative for commercial repair mortar; dotted line - typical range of acoustic impedances for cement concretes and mortars

The aim of this paper is to analyse of the effect of a quality of concrete substrate on propagation of stress waves in repair system and their influence on a possibility of the bond strength estimation.

2 REPAIR SYSTEM AS AN OBJECT OF NDT ASSESSMENT

Repair system is difficult to test with NDT methods because of many factors influencing stress wave propagation (Fig. 2).

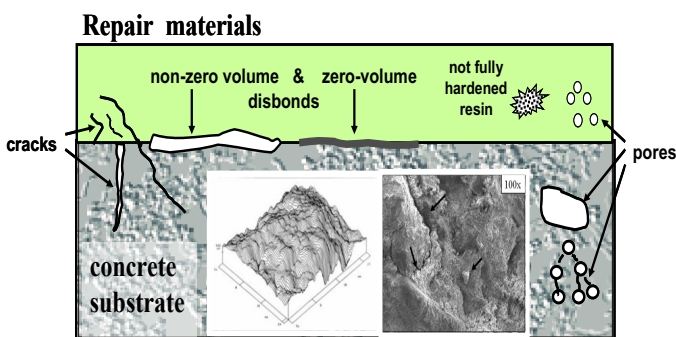


Figure 2. Sketch of possible defects in repair system and example of surface geometry of concrete substrate after milling

Two main types of defects affecting stress wave propagation might occur in such system (Adams & Drinkwater 1997):

- adhesion type (at the interface zone: overlay-substrate): various types of “non-zero” volume disbonding (e.g., voids, delaminations) and “zero-volume” disbonding - weak adhesion areas (e.g. due to presence of a dust, oil, etc.);
- cohesion type (in repair material or/and concrete substrate): porosity, cracks, honeycombing, partially non-hardened resin in the case of polymer material.

Above defects are often result of the operations that have to be performed prior to a repair as well as an application of repair material. Surface concrete treatment is used to remove deteriorated and carbonated concrete and any type of layer that causes the decrease of adhesion and to enlarge the area of contact surface by increasing surface roughness. The technique and the energy chosen induce many different profiles. It has been widely demonstrated that a surface preparation of concrete substrate can influence significantly on the microcracking level and surface roughness, the substrate saturation level and, as a consequence, it may affect the bond strength between repair material and concrete substrate.

The effect of concrete surface roughness on the adhesion is not clear. Some authors found a correlation between adhesion strength and some “roughness parameters” (e.g. Fukuzawa et al. 2001). Courard et al. (2014) have shown, using multiple regression approach, that roughness is a statistically significant variable influencing bond strength. From the other hands, a few authors (Silfwerbrand & Beushausen 2006, Garbacz et al. 2005, Bissonnette et al. 2006) conclude that surface roughness itself does not have significant influence but microcracks induced by surface treatment contribute to the deterioration of the quality of the bond.

The effect of a bond coat is also discussed. According to one opinion (Silfwerbrand & Paulsson 1998), the bond coat should be avoided because of creation of an extra plane of weakness. Moreover, bond coat could have a negative effect with very rough surfaces because it could limit a good interlocking effect between substrate and repair material. The other conclusion drawn by some authors is that a presence of bond coat can significantly increase the adhesion (Austin et al. 1995, Pretorius & Kruger 2001, Garbacz et al. 2005).

Using stress waves based methods for evaluation of bond strength needs to find whether the interface quality affects the stress wave propagation and if is it possible to extract from the signal any information related to the bond strength.

3 TESTED REPAIR SYSTEMS

In the framework of several project conducted at Warsaw University of Technology in cooperation with the University of Liege various repair systems different in concrete surface and interface quality, were tested. In the first stage, a commercial PCC repair mortar containing glass microfibers was applied on relatively weak concrete substrate (C20/25) subjected, prior to repair, to various surface treatments with different aggressiveness levels. As result concrete substrates with different roughness and microcracking levels (Tab.1) were obtained. Surface roughness was characterized by parameters of the waviness profile (high frequency filtration of profile) determined with a mechanical profilometer (Garbacz et al. 2005).

According to the manufacturer's technical data sheet, this mortar should be used with a polymer-cement bond coating because of its low workability (the details are given in Garbacz et al. 2005). The overlay (thickness 10 mm) was applied on the concrete substrate with and without a bond coat to obtain different air void contents and levels of compactions at the interface (Fig. 3).

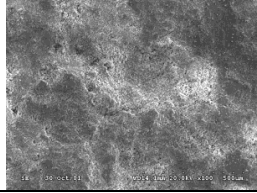
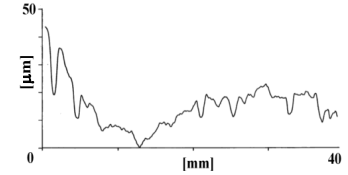
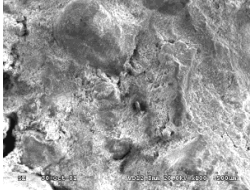
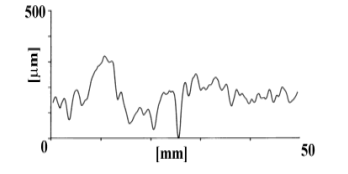
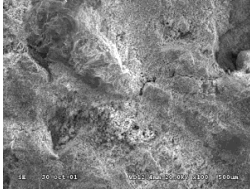
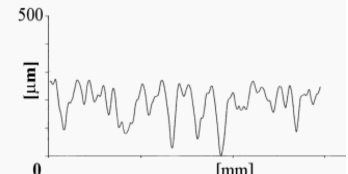
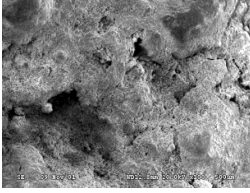
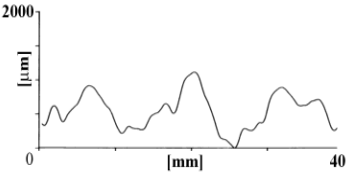
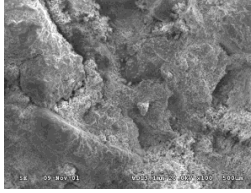
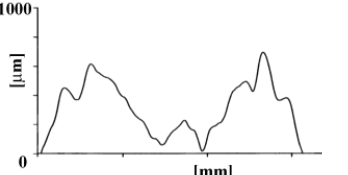
4. NDT MEASUREMENTS

After 28 days of hardening, the IE and ultrasonic measurements were carried out. The IE measurements were performed with Docter test system using the impactor of 2 mm in diameter to generate a stress wave. The same repair systems were tested further with ultrasonic pulse echo method using commercial digital ultrasonic flaw detector ULTRA CUD20 and a pair of transducers with nominal frequency of 500 kHz. This method is expected to be more sensitive to the presence of voids at interface because of shorter waves are generated. Each measurement received an A-scan consisted of characteristic peaks corresponding to the reflection from the interface.

Afterwards, the adhesion between the repair material and the concrete substrate was determined with the pull-off test (acc. EN 1542). Additionally, the quality of interface was observed on the cross-sections with light microscope.

The results of investigations can be summarized as follows. As the surface roughness increased (Fig. 4), the pull-off strength for the systems without bond coat decreased and more air voids at the interface zone were observed (see Fig. 3). In the case of system with bond coat the bond strength in repair systems were less sensitive on concrete substrate quality.

Table 1. SEM observation and profile analysis of the concrete substrate C20/25 after various surface preparation

Example of surface view SEM - magnification 100x	Waviness profiles obtained with profilometer and selected parameters
<p>No treatment</p> 	 <p>$W_a = 5 \mu\text{m}; W_t = 39 \mu\text{m}$</p>
<p>Grinding</p> 	 <p>$W_a = 32 \mu\text{m}; W_t = 219 \mu\text{m}$</p>
<p>Sandblasting</p> 	 <p>$W_a = 49 \mu\text{m}; W_t = 434 \mu\text{m}$</p>
<p>Shotblasting</p> 	 <p>$W_a = 215 \mu\text{m}; W_t = 1086 \mu\text{m}$</p>
<p>Milling</p> 	 <p>$W_a = 179 \mu\text{m}; W_t = 867 \mu\text{m}$</p>

The test results indicate that there is no correlation between the pull-off strength and the P wave velocity for the repair system with bond coat (Fig. 5a). The bond coat filled irregularities of concrete substrate properly and air voids at the interface were not observed. The statistically significant relationship was obtained for systems without the bond coat - the P wave velocity increased as the pull-off strength increases. In this case, the fraction of air voids at the interface increases when the roughness increases. In both types of repair systems, the pulse velocity was not correlated with the sub-

strate roughness (Fig. 5b). The trend was found in studying the relationship between the amplitude of maximum frequency peak and the pull-off strength (Fig. 5c): as the pull-off strength increases, the amplitude value of peak decreases. Statistical significance of the relationship between the amplitude value of the highest peak and the mean waviness of surface profile (Fig. 5d) was also found but only for the repair systems without the bond coat, essentially because the fraction of air voids increased with the surface roughness.

The results obtained indicates that for IE method, the roughness of the concrete substrate does not affect significantly the P wave propagation through the repair system if the bond quality is sufficient (absence of large voids at the interface). The ultrasonic method is than more sensitive.

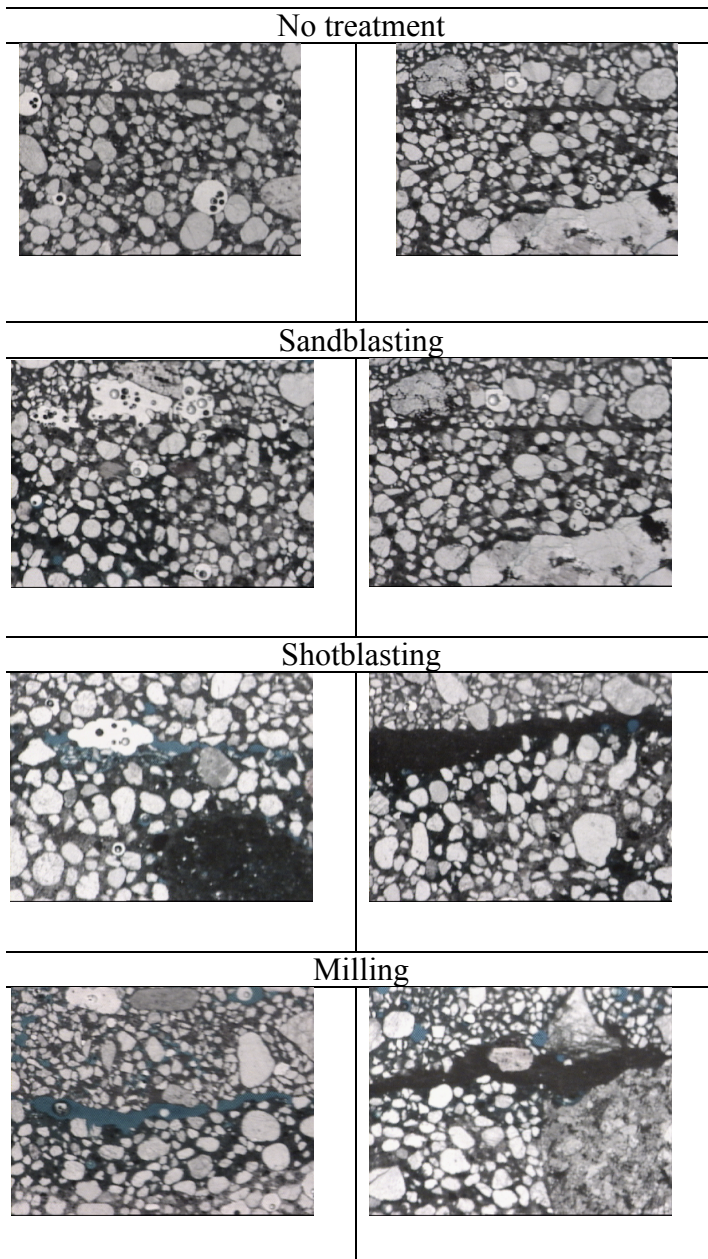


Figure 3. View of the interface between repair material and concrete substrate after various way of surface preparation without (left) and with (right) bond coat

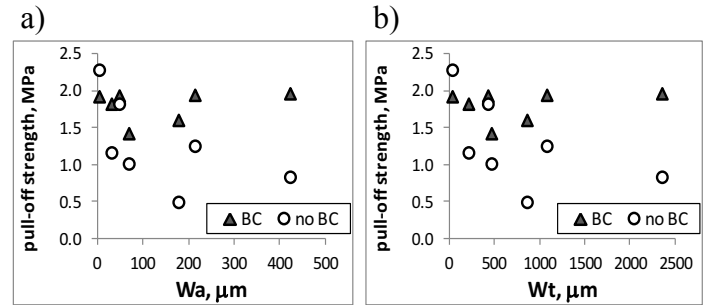


Figure 4. Pull-off strength vs. waviness parameter W_a (a) and W_t (b) for different repair systems with and without bond coat (BC)

The above relationship was investigated for stronger concrete, C40/50 (Garbacz et al. 2006). Four types of surface preparation techniques were used: polishing, sandblasting, scabbling and very high pressure water-jetting. The concrete slabs (600 x 800 x 130 mm) have been covered by a self-compacting commercial PCC mortars (3-cm thick). For the repair systems, two specific ranges of the IE frequency spectrums were analyzed: around the bottom peak frequency and around frequencies corresponding to the interface. The lowest mean values of bottom peak were obtained for polishing and hydrodemolition. The amplitude of interface peak was the highest for polished samples. Scabbled and hydrodemolished samples present similar values of interface peak. The relationships between amplitudes of either bottom or interface peaks and parameters describing quality of repair systems were not statistically significant for any of the tested repair systems (Fig. 6).

Additionally, the normalized frequency spectrums were characterized with RugoDS program using 3D surface profile analyzing approach (Courard et al. 2007). The number of I-E measurement from 1 to 10 was the third axe parameter (Fig. 7a) and all the statistic parameters (Fig. 7b) for 3D distribution of frequency spectrum were calculated.

There were no statistically significant relationships between the amplitude parameters of IE frequency spectrum and the pull-off strength (Fig. 8). However, the relations between statistical these parameters of frequency spectrum and parameters describing concrete substrate quality show some tendencies. Roughness and cracking influenced the minimum amplitude level, W_m , of the IE frequency profile. It was observed that as the roughness (Fig. 8b) and cracking (Fig. 8c) increased the minimal amplitude of frequency profile. These tendencies could be interpreted as an increase of noise level in the IE frequency spectrum due to roughness and cracking of concrete substrate. Similar results

were obtained by Santos et al (2011). Their finite element model (FEM) simulations indicates that the roughness of a concrete substrate had relatively low influence on the ultrasonic signal amplitude as well. Still,

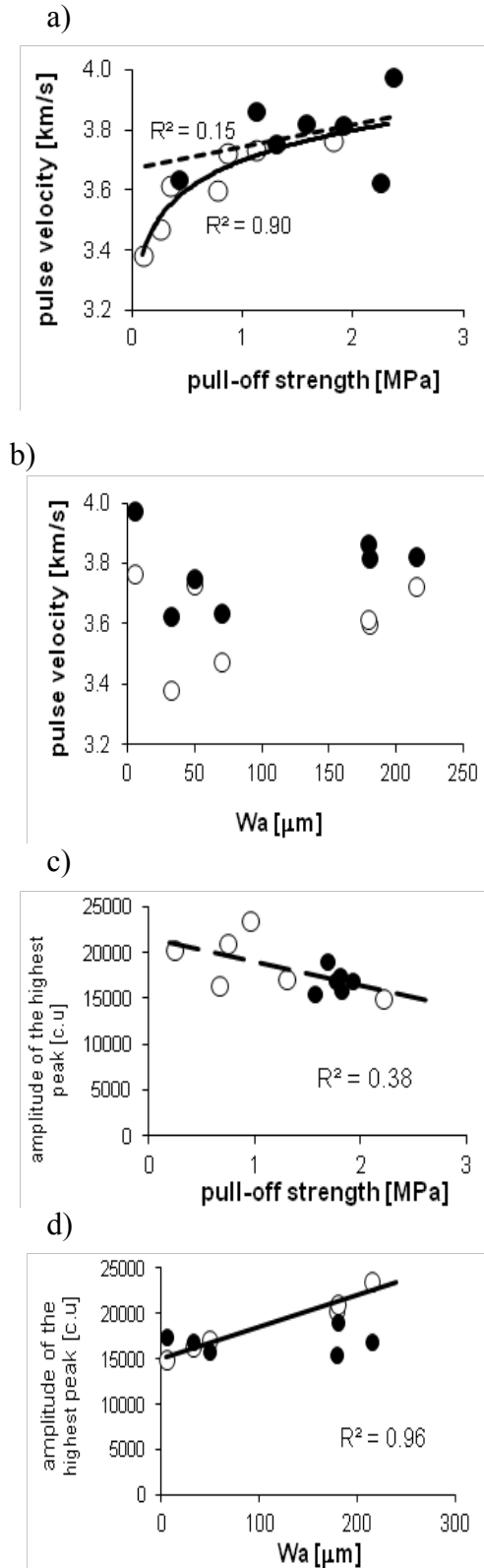


Figure 5. Relationships between parameters describing stress wave propagation and parameters describing repair system quality: pulse velocity IE vs. a) pull-off strength, b) mean waviness of profile, W_a ; amplitude of the highest peak of frequency spectrum

of ultrasonic signal (c.u. – conventional unit) vs. c) pulse velocity IE and d) mean waviness of profile, W_a , (concrete substrate C20/25, overlays with (●) and without (○) the bond coat; adopted from (Garbacz 2010)

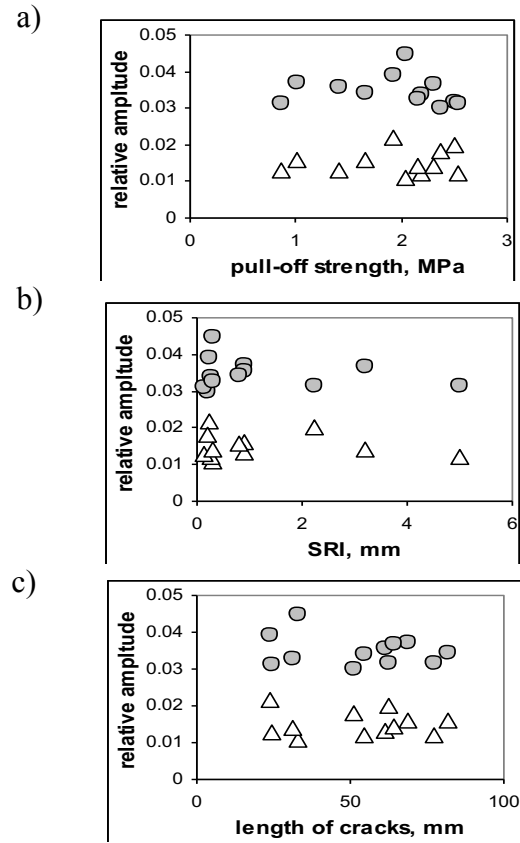
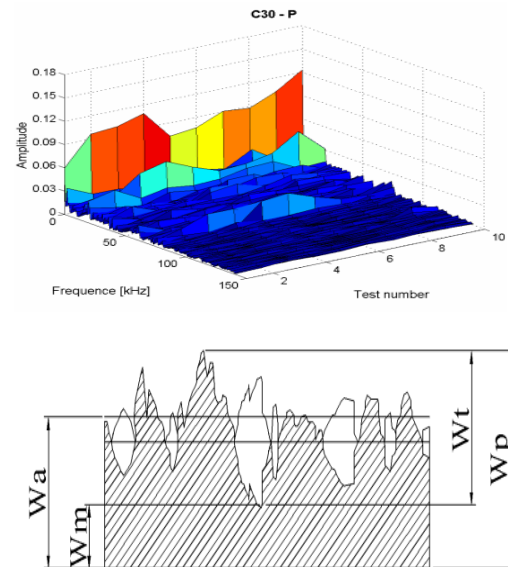


Figure 6. Amplitude of bottom (●) and interface (Δ) frequency peaks versus: a) pull-off strength, b) surface roughness index, SRI, c) length of crack (adopted from Garbacz et al. 2006)



W_a : arithmetic mean deviation; W_t : max height of amplitude
 W_p , W_m : max. and min. amplitude respectively

Figure 7. Example of 3-D frequency distribution and definitions of IE frequency spectrum amplitude parameters applied for characterization of impact-echo signal

they observed that the pulse decreases in the presence of rough interfaces, due to a greater wave dispersion.

The effect of substrate roughness and presence of air voids at the interface on stress wave propagation were also investigated using FEM of repair system by Kwaśniewski & Garbacz (2008). The simulations were performed for system with the same geometry that used in the experiment. The surface geometry corresponded to real surfaces roughness obtained after sandblasting and hydro-demolition under high pressure of previously described concrete substrate.

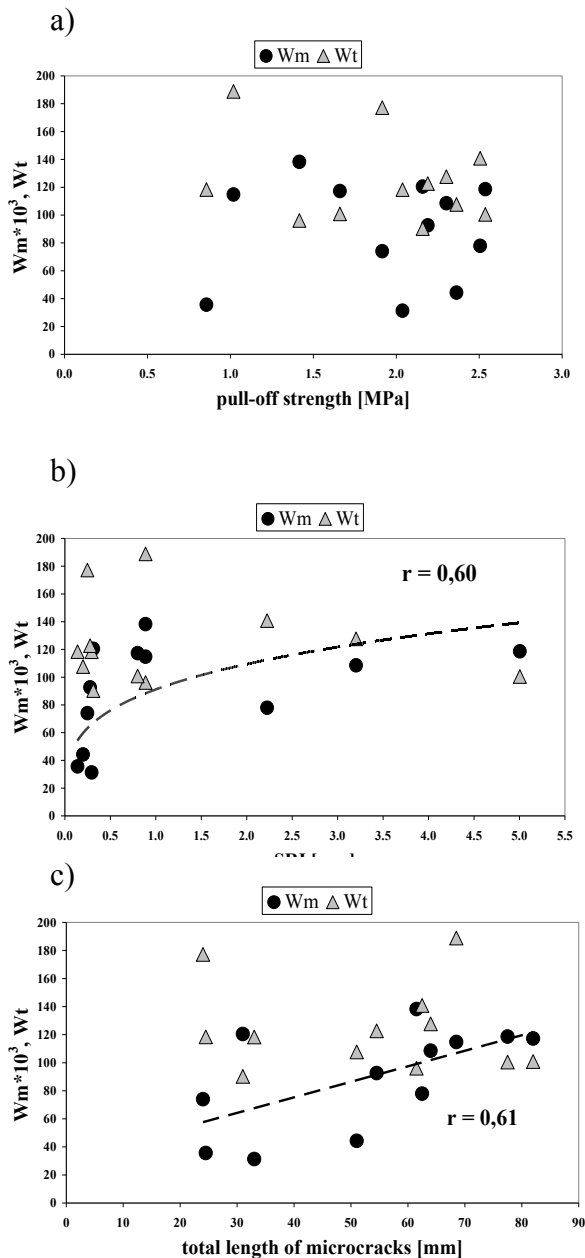


Figure 8. Maximum height of amplitude W_t , and minimum amplitude level, W_m , of 3D frequency distribution versus (see Fig. 7):

(a) pull-off strength, (b) surface roughness index SRI, (c) total length of cracks (adopted from Garbacz et al. 2006)

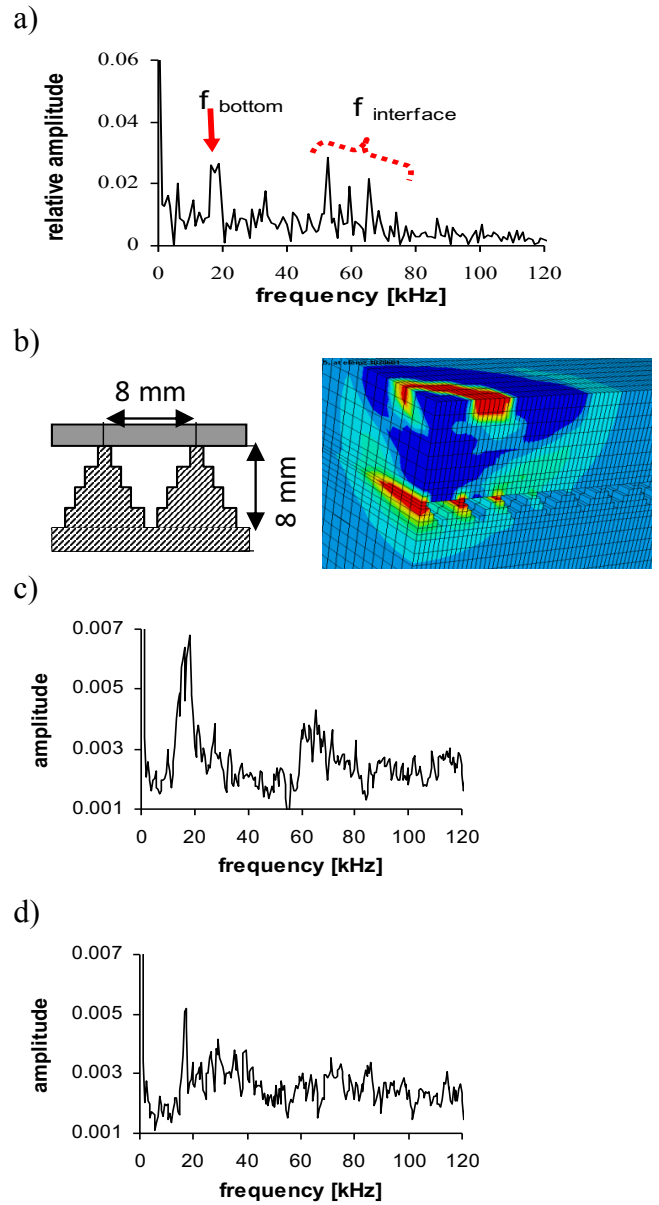


Figure 9. Typical frequency spectra for repair systems with concrete substrate after hydrodemolition: a) experimental results for plate; FEM simulations: b) examples of disturbance in wave propagation in the case of air voids presence at interface, c) frequency spectrum for substrate irregularities unfilled – presence of air voids at the interface, d) frequency spectrum for substrate irregularities completely filled (adapted from Kwaśniewski & Garbacz 2008)

Two extreme cases of filing of surface irregularities were modelled: completely filled and non-filled surface irregularities. The material; properties (E modulus and density) of both concrete substrate and overlay were determined experimentally. The results of simulations indicate that the presence of air voids at the interface can

significantly influence the stress wave propagation. This was observed in both the experimental (Fig. 9a) and FEM (Fig. 9b-d) frequency spectra. If surface profile irregularities are filled, the surface roughness does not significantly influence the resulting frequency spectrum (Fig. 9d).

5. SUMMARY

The multi-variants investigations showed that for the both IE and ultrasonic methods, the roughness and microcracking of the concrete substrate does not affect significantly the P wave propagation through the repair system if the bond quality is sufficient - absence of large voids at the interface. However, parameters describing roughness and microcracking of concrete substrate can be considered as important parameter for improvement of reliability of the bond strength evaluation using more complicated signal analyses (eg. wavelet approach, artificial neural networks) of stress waves resulting from NDT methods. First examples of such analyses can be found e.g. Sadowski & Hoła (2014) showed that substrate roughness is an important factor for the prediction of bond strength between the concrete layers in concrete floors using the nondestructive acoustic techniques together with artificial neural networks.

Acknowledgements

This paper was elaborated in the framework of the research projects carried out in the framework of the scientific cooperation programs between foreign agencies of Wallonia-Brussels International (Belgium), (MNiSW) Polan and Laval University, Canada.

4 REFERENCES

- Adams R.D., Drinkwater B.W. 1997. Nondestructive testing of adhesively bonded joints, *NDT&E Int*, 30, 93-98.
- Austin, S., Robins, P. and Pan, Y. 1995. Tensile bond testing of concrete repairs., *Mater Struct* (28): 249 - 259.
- Bissonnette, B., Courard, L., Vaysburd, A., Bélair, N. 2006. Concrete removal techniques: influence on residual cracking and bond strength. *Concrete Int*, 28 (12), 49-55.
- Carino N.J. 1997. Nondestructive Test Methods, Concrete Construction Engineering Handbook, ed. E.G.Nawy, CRC Press, 19.1-19.67.
- Concrete Repair Manual. 2003. ACI International, Farmington Hills, MI, USA, pp.862.
- Courard, L. 2005. Adhesion of repair systems to concrete: influence of interfacial topography and transport phenomena, *Mag Concrete Res*, 57(5). 273-282.
- Courard, L. Schwall, D. Piotrowski, T. 2007. Concrete surface roughness characterization by means of optomorphology technique, Adhesion in Interfaces of Building Materials: a Multi-scale Approach, *Advances in Materials Science and Restoration AMSR No. 2.*, Aedificatio Publishers, 107-115.
- Courard, L., Lenaers, J.-F., Michel F., Garbacz A. 2011. Saturation level of the superficial zone of concrete and adhesion of repair systems, *Constr.Build.Mater.*, 25, 2488–2494.
- Courard, L. Piotrowski, T. Garbacz, A. 2014. Near-to-Surface properties affecting bond strength in concrete repair. *Cement.Concrete Comp.*, 46, 73-80.
- Czarnecki, L and Emmons, P.H. 2002. Repair and protection of concrete structures (in Polish). Polski Cement, Cracow.
- Fukuzawa, K., Mitsui, M. and Numao, T. 2001. Surface roughness indexes for evaluation of bond strengths between CRFP sheet and concrete. In: ICPIC 2001, Xth International Congress on Polymers in Concrete, USA, p.12 (CD)
- Garbacz, A. 2005. Non-destructive assessment of repair efficiency with impact-echo and ultrasonic methods – an overview, in *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*, Taylor&Francis, 1319-1326.
- Garbacz A., Piotrowski T., Załęgowski K., Adamczewski G. 2013. UIR-Scanner Potential to Defect Detection in Concrete, *Advanced Materials Research*, 687, 2013, Ed. Ru Wang and Zhenghong Yang, Trans Tech Publications Ltd, 359-365
- Garbacz, A. 2010. Application of stress based NDT methods for concrete repair bond quality control. *Bull. Pol AcadSci-Te*, 63 (1) (in press).
- Garbacz, A., Gorka, M., and Courard, L. 2005. On the effect of concrete surface treatment on adhesion in repair systems. *MagConcrete Res*. 57, 49-60.
- Garbacz, A. Piotrowski, T. Courard, L. 2006. An analysis of stress wave propagation in repair systems using wavelet approach, RILEM PRO 51 (CD): Advances in Concrete through Science and Engineering, Canada.
- Kwaśniewski, L., Garbacz, A., 2008, Characterization of stress wave propagation in impact-echo method using FEM models of repair systems, Challenges for Civil Construction, FEUP, Portugal, 92-93 + CD.

- Pretorius, J. and Kruger, D. 2001. The influence of surface roughness on the bond strength of concrete repairs. In: ICPIIC 2001, Xth International Congress on Polymers in Concrete, USA, p.13 (CD).
- Sadowski L, Hoła J. 2014. New nondestructive way of identifying the values of pull-off adhesion between concrete layers in floors, *J Civ EngManag*, 20 (4), 561-569
- Sansalone M., Carino N.J. 1989. Detecting delamination in concrete slabs with and without overlays using the impact-echo method, *ACI Materials Journal* 86.
- Santos, P., Júlio E., Santos, J. 2011. Towards the development of an in situ non-destructive method to control the quality of concrete-to-concrete interfaces, *Eng.Struct.*, 32(1), 207-217.
- Silfwerbrand, J. Paulsson, J. 1998. Better bonding of bridge deck overlays. *Concrete Int.* 20 (10): 56-61.
- Silfwerbrand, J. Beushausen, H. 2006. Bonded concrete overlays – bond strength issues, *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting* (Eds. H. Beushausen, F. Dehn and M.G. Alexander), Taylor & Francis Group, London, 61-66.