



15 YEARS OF COOPERATION BETWEEN

WARSAW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY & UNIVERSITY OF LIÈGE

SYMPOSIUM 3R: REDUCE, REUSE, RECYCLE IN CONSTRUCTIONS

UNDER THE AUSPICES OF:

DEPUTY PRIME MINISTER, MINISTER OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION JAROSŁAW GOWIN

DELEGATE OF THE WALLONIA - BRUSSELS FEDERATION FRANCK PEZZA

RECTOR MAGNIFICUS OF WARSAW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PROFESSOR JAN SZMIDT



WARSAW, JUNE 13TH 2016

PREFACE

The Poland – Wallonia Symposium “3R: reduce, reuse and recycle in constructions”, that will take place in Warsaw, organised by Department of Building Materials Engineering of Warsaw University of Technology and University of Liège and, is the sign of long-term collaboration between these two Universities. The co-operation has been started in the beginning of seventies, when the head of building materials in Liège was professor Kazimierz Gamski. The present round of the collaboration has been started in 2000 and it has been introduced into the executive protocol of the Governmental Agreement between French Community of Belgium – Wallonia and Poland. The coordinators of the first project (2000-2002) were Prof. Robert Degeimbre from University of Liège and Prof. Lech Czarnecki from Warsaw University of Technology. The coordinators of the next projects (2003-2016) are Prof. Luc Courard from Wallonia side and Prof. Andrzej Garbacz from the Polish side.

The cooperation was very fruitful for both sides and has brought mutual benefits. The seven students from Warsaw University of Technology carried out the experimental program for their master or bachelor thesis in Liege. The two thesis have been awarded by Polish Ministry of Infrastructure. The three students from University of Liege made their thesis in the framework of cooperation. The results obtained in the framework of six projects have been published in above 60 papers of the Wallonia-Polish team and led to the original scientific approach applicable to the repair of concrete structures - concrete surface engineering. This approach is presented in the book entitled “Concrete Surface Engineering” published by Taylor & Francis Group in the series Modern Concrete Technology. The results were also presented in the state-of-the-art-report elaborated for two RILEM Technical Committees TC 193 RLS “Bonded cement-based material overlays for the repair, the lining or the strengthening of slabs or pavements” TC 184 IFE “Industrial floors for withstanding harsh environmental attacks, including repair and maintenance”.

The results of first four projects were presented during the first Symposium in Warsaw in 2005 entitled „Trends in building materials engineering” and second one in Liege in 2010 entitled “Concrete Repair Science: new trends”. The topic of the present Symposium, corresponding to the topics of last two Polish - Belgium Wallonia Region joint projects, is related to implementation of idea of sustainable development in building industry. It is purposeful to specify the conditions for the implementation of sustainable concrete, that is the composite materials which are made of optimally selected ingredients - qualitatively and quantitatively - and minimally degrading for the environment and natural resources as well as energy saving. This goal may be achieved due to the use of low emission cement and alternative concrete ingredients, also ground limestone or fillers. The ecological character of the concrete should be further enhanced by the use of recycled aggregates from crushed concrete, with combined bio-based materials.

The initiative of organisation of the Symposium was based on the willingness to present and dissipate of the results obtained in the framework of the collaboration of both Universities as well as by the institutes cooperating with Warsaw University of Technology. Both our Universities have started their activity in nearly the same time (Liège 1817, Warsaw 1826). Now, our intention is to manifest the willingness of both Partners to participate in the creation of the common - European scientific and educational area.

Luc COURARD
University of Liège

Andrzej GARBACZ
Warsaw University of Technology

PRÉFACE

Le symposium Wallonie-Pologne "3R: réduire, réutiliser et recycler dans les constructions", qui aura lieu à Varsovie, organisé par le Département d'Ingénierie des Matériaux de Construction de l'Université des Technologies de Varsovie et de l'Université de Liège, est le signe d'une collaboration à long terme entre ces deux universités. La coopération a été lancée au début des années septante, lorsque le professeur Kazimierz Gamski dirigeait le Laboratoire des Matériaux de Construction à Liège. Le cycle actuel de collaborations a été lancé en 2000 et a été introduit dans le protocole exécutif de l'accord gouvernemental entre la Communauté Française de Belgique - Wallonie (Wallonie-Bruxelles International) et de la Pologne. Les coordinateurs du premier projet (2000-2002) étaient les professeurs Robert Degeimbre de l'Université de Liège et Lech Czarnecki de l'Université des Technologies de Varsovie. Les coordinateurs des projets suivants (2003-2016) sont les professeurs Luc Courard et Andrzej Garbacz.

La coopération a été très fructueuse pour les deux parties. Sept étudiants de l'Université des Technologies de Varsovie ont réalisé tout ou partie du programme expérimental de leur maîtrise ou leur baccalauréat à Liège : deux de ces deux thèses ont reçu un prix décerné par le ministère polonais de l'Infrastructure. Trois étudiants de l'Université de Liège ont également réalisé leur thèse de maîtrise au travers de la coopération. Les résultats obtenus dans le cadre de six projets ont été présentés dans plus de 60 publications scientifiques par l'équipe ULg-WUT et ont permis le développement d'une approche scientifique originale applicable à la réparation des structures en béton. Cette approche est présentée dans le livre intitulé "Concrete surface engineering", publié par Taylor & Francis Group dans la série Modern Technology Concrete. Les résultats ont également été présentés lors de State-of-the-Art reports élaborés pour deux comités techniques RILEM : TC 193 RLS "Bonded cement-based material overlays for the repair, the lining or the strengthening of slabs or pavements" et TC 184 IFE "Industrial floors for withstanding harsh environmental attacks, including repair and maintenance".

Les résultats de plusieurs projets de coopération ont été présentés au cours d'un premier Symposium à Varsovie en 2005, intitulé «Trends in building materials engineering» et d'un deuxième à Liège en 2010 intitulé «Concrete Repair Science: new trends ». Le thème du présent colloque, correspondant aux thèmes développés lors des deux derniers projets, est lié à la mise en œuvre du concept de développement durable dans l'industrie du bâtiment. Il a pour but de préciser les conditions de la mise en œuvre d'un béton durable, composé de manière optimale - qualitativement et quantitativement -, peu impactant pour l'environnement et économe en ressources naturelles et en énergie. Cet objectif peut être atteint grâce à l'utilisation de ciment à faible émission de carbone et des additions provenant de sous-produits industriels, comme les fillers calcaires. Le caractère écologique du béton devrait être encore renforcé par l'utilisation de granulats recyclés à partir de base de béton concassé, mais aussi en combinaison avec des matériaux biosourcés.

L'organisation du Symposium est basée sur la volonté de présenter et de diffuser des résultats de recherche obtenus dans le cadre de la collaboration entre nos deux universités, mais aussi de l'Université des Technologies de Varsovie avec des instituts de recherche. Nos deux universités sont nées pratiquement en même temps (Liège 1817, Varsovie 1826). Aujourd'hui, nous voulons manifester notre volonté de contribuer à la création d'un espace éducatif et de recherche européen.

Luc COURARD
 University of Liège

Andrzej GARBACZ
 Warsaw University of Technology

WPROWADZENIE

Symposium Polsko-Walońskie "3R: reduce, reuse and recycle in constructions", które zostało zorganizowane w Warszawie staraniem Politechniki Warszawskiej i University of Liège, jest przejawem długoletniej współpracy naukowej między tymi uczelniami. Współpraca ta datuje się początku lat siedemdziesiątych, kiedy to szefem katedry materiałów budowlanych w Liege był profesor Kazimierz Gamski. Obecna edycja współpracy została podjęta w roku 2000 na wniosek strony belgijskiej. Współpraca ta została wpisana do protokołu wykonawczego międzyrządowej umowy o współpracy między Francuską Społecznością Belgii – Region Walonii a Polską. Koordynatorami pierwszego projektu (2000-2002) byli szefowie zakładów materiałów budowlanych profesor Robert Degeimbre z Uniwersytetu w Liège i profesor Lech Czarnecki z Politechniki Warszawskiej. Koordynatorami kolejnych projektów (2003-2016) byli profesor Luc Courard ze strony Walonii i profesor Andrzej Garbacz ze strony polskiej.

Współpraca była bardzo owocna dla obu stron i przyniosła obopólne korzyści. Siedmiu studentów z Politechniki Warszawskiej przeprowadziło w Liege badania laboratoryjne do swoich prac magisterskich i inżynierskich. Dwie prace zostały nagrodzone przez Ministra Infrastruktury. Trzech studentów z Uniwersytetu w Liege w ramach współpracy wykonało badania do swoich prac magisterskich. Wyniki uzyskane w ramach sześciu projektów, opublikowane w ponad 60 publikacjach polsko-walońskiego zespołu, doprowadziły do sformułowania oryginalnego podejścia naukowego stosowanego do napraw konstrukcji betonowych - inżynierii powierzchni betonu. To podejście zostało przedstawione w książce pod tytułem "Concrete Surface Engineering" opublikowanej przez Taylor & Francis Group w serii „Modern Concrete Technology”. Wyniki zostały również wykorzystane przy przygotowaniu State-of-the-art-raport przez dwa Komitety Techniczne RILEM TC 193 RLS "Bonded cement-based material overlays for the repair, the lining or the strengthening of slabs or pavements" i TC 184 IFE "Industrial floors for withstanding harsh environmental attacks, including repair and maintenance".

Wyniki pierwszych czterech projektów zostały zaprezentowane podczas pierwszego sympozjum w Warszawie w 2005 roku pod tytułem "Trendy w inżynierii materiałów budowlanych", oraz drugiego pod tytułem "Concrete Repair Science: new trends" w Liege w 2010 roku. Tematem niniejszego sympozjum są zagadnienia związane z wdrażaniem idei zrównoważonego rozwoju w budownictwie, które były przedmiotem ostatnich dwóch wspólnych projektów polsko - walońskich. Jednym z istotnych zagadnień jest określenie warunków wykonywania trwałego betonu, dzięki optymalnie dobranym składnikom - jakościowo i ilościowo, i oddziałującego minimalnie na środowisko i zasoby naturalne, a także zapewniającego oszczędność energii. Cel ten można osiągnąć w wyniku stosowania cementów o niskoemisyjnych i alternatywnych składników betonu, w tym również rozdrobnionych wapieni lub innych wypełniaczy. Ekologiczny charakter betonu może być wzmocniony przez wykorzystanie kruszyw z kruszonego betonu, w połączeniu z materiałami pochodzenia biologicznego.

Inicjatywa zorganizowania Symposium została podyktowana chęcią prezentacji rezultatów uzyskanych i udostępnionych w wyniku współpracy obu Uczelni oraz jednostek z nimi współpracujących. Obie nasze Uczelnie rozpoczęły działalność w tym samym czasie (Liège 1817, Warszawa 1826). Obecnie naszą intencją jest zadokumentowanie woli obu Partnerów uczestniczenia w kreowaniu wspólnej europejskiej przestrzeni badawczej i edukacyjnej.

Luc COURARD
University of Liège

Andrzej GARBACZ
Warsaw University of Technology

ACTIVE MEMBERS OF COLLABORATION

STUDENTS:

- WUT: Michał Górka, Piotr Harassek, Katarzyna Kostana, Grzegorz Moczulski, Sylwia Perkowicz - Nagórska, Tomasz Piotrowski, Paulina Urbańska
- ULg: Stephane Flamant, Frederic Michel, Damien Schwall, Xavier Willem, Audrey Van der Wielen

RESEARCHERS:

- WUT: Grzegorz Adamczewski, Bogumiła Chmielewska, Lech Czarnecki, Andrzej Garbacz, Wioletta Jackiewicz-Rek
- ULg: Luc Courard, Anne Darimont, Robert Degeimbre, Frederic Nguyen

AWARDS

Prize of the Ministry of Transport and Construction of the Republic of Poland

DR. A. GARBACZ and DR. L. COURARD for supervision of the Master Thesis by T. PIOTROWSKI entitled Effect of concrete substrate quality on stress wave propagation in repair systems (2006).

DR. A. GARBACZ conférencier invité de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège (2010).

DR. L. COURARD Honorary Professor at the Faculty of Civil Engineering of the Warsaw University of Technology (since 2008)

COOPERATION PROGRAMS

The exchanges took place with the financial support of the Government of the Republic of Poland and Wallonia-Brussels International.

We thank them for the confidence they have shown in supporting our projects:

- Cooperation program Wallonia-Brussels/Poland (2015-2016):
Application of waste and recycled products for durable sustainable concrete
- Cooperation program Wallonia-Brussels/Poland (2013-2014):
Development of CO2 zero emission concrete
- Cooperation program Wallonia-Brussels/Poland (2010-2012):
Nondestructive methods for the quality control of eco-materials used in repair works
- Cooperation program Wallonia-Brussels/Poland (2008-2009):
Improvement of signal interpretation for an adhesion evaluation in repair system investigated with impact-echo and geo-radar
- Cooperation program Wallonia-Brussels/Poland (2006-2007):
Selfcompacting mortars for repair
- Cooperation program Wallonia-Brussels/Poland (2000-2005):
Characterization of adhesion of repairs systems on concrete (destructive and non-destructive methods)

COOPERATION IN THE FRAMEWORK OF INTERNATIONAL TEAMS

Development of specifications and performance criteria for surface preparation based on issues related to bond strength (2005-2009), Research project granted by American Concrete Institute, cooperation between: University of Laval (Canada), University of Liege (Belgium), Warsaw University of Technology (Poland), Vaycon Consulting Inc. (USA), Bureau of Reclamation (USA)

Technical Committee RILEM TC 184 - IFE „Industrial floors for withstanding harsh environmental attacks, including repair and maintenance” (2000-2006)

Technical Committee RILEM TC 193 - RLS „Bonded cement-based material overlays for the repair, the lining or the strengthening of slabs or pavements” (2000-2006)

BOOKS

BISSONNETTE B., COURARD L., GARBACZ A.: Concrete Surface Engineering, series: Modern Concrete Technology, CRC Press Taylor & Francis Group, ISBN 9781498704885, 2016, pp.258

CHAPTERS IN BOOKS

COURARD L., GARBACZ A., WOLFF L.: Evaluation and quality assessment, in “Industrial Floors” (ed. P.Seidler), RILEM Publications S.A.R.L., RILEM Report no. 33, 2006, 59-89

ZAJC A., COURARD L., GARBACZ A., WOLFF L.: Testing procedures and regulations, in “Industrial Floors” (ed. P.Seidler), RILEM Publications S.A.R.L., RILEM Report no. 33, 2006, 101-110

ARTICLES IN BOOKS

GARBACZ A., PIOTROWSKI, T., COURARD, L., BISSONNETTE, B.: ***A repair quality control with elastic waves based methods vs. concrete substrate quality***, in Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting IV - Dehn et al. (Eds), Taylor & Francis Group, London, 2016, 295-301

BISSONNETTE B., MODJABI-SANGNIER F., COURARD L., GARBACZ A., VAYSBURD A.M.: ***A quantitative approach to the concept of concrete repair compatibility***, in Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting IV - Dehn et al. (Eds), Taylor & Francis Group, London, 2016, 711-716

COURARD L., BISSONNETTE B., GARBACZ A., ***Fundamental approach for the concept of concrete repair compatibility***, in Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting IV - Dehn et al. (Eds), Taylor & Francis Group, London, 2016, 727-732

GARBACZ A., COURARD L., PIOTROWSKI T.: ***Znaczenie inżynierii powierzchni naprawczych betonu***, in: “Współczesne metody naprawcze w obiektach budowlanych”, (Eds. Buczkowski W., Błaszczński T., Jaszczak J., Kamiński M.), Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2009, 59-76

COURARD L., SCHWALL D., PIOTROWSKI T.: ***Concrete surface roughness characterization by means of opto-morphology technique***, in “Adhesion in Interfaces of Building Materials: a Multi-Scale Approach”, series Advances in Material Science and Restoration (Eds. L. Czarnecki and A. Garbacz), Aedificio Publishers, 2007, 107-116

PIOTROWSKI T., GARBACZ A., SCHWALL D., COURARD L.: *On the effect of concrete surface roughness on stress wave propagation in repair systems*, in "Adhesion in Interfaces of Building Materials: a Multi-Scale Approach", series Advances in Material Science and Restoration (Eds. L. Czarnecki and A. Garbacz), Aedificio Publishers, 2007, 247-257

GARBACZ A.: *On usability of wavelet analysis for nondestructive evaluation of repair efficiency by impact-echo method*, in "Adhesion in Interfaces of Building Materials: a Multi-Scale Approach", series Advances in Material Science and Restoration (Eds. L. Czarnecki and A. Garbacz), Aedificio Publishers, 2007, 47-60

GARBACZ A., KOSTANA K.: *Characterization of concrete surface geometry by laser profilometry*, in "Adhesion in Interfaces of Building Materials: a Multi-Scale Approach", series Advances in Material Science and Restoration (Eds. L. Czarnecki and A. Garbacz), Aedificio Publishers, 2007, 147-157

INTERNATIONAL JOURNALS

COURARD L., PIOTROWSKI T., GARBACZ A.: *Near-to-Surface properties affecting bond strength in concrete repair*, Cement and Concrete Composites 46, 2014, 73-80

COURARD L., MICHEL F., PERKOWICZ S., GARBACZ A.: *Effects of limestone fillers on surface free energy and electrical conductivity of the interstitial solution of cement mixes*, Cement and Concrete Composites 45, 2014, 111-116

COURARD L., BISSENETTE B., GARBACZ A., VAYSBURD A., VON FAY K., MOCZULSKI G., MORENCY M.: *Effect of Misalignment on Pulloff Test Results: Numerical and Experimental Assessments*. ACI Materials Journal, vol. 111, 2, 2014, 153-162

GARBACZ A., COURARD L., BISSENETTE B.: *A surface engineering approach applicable to concrete repair engineering*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences 61 (1), 2013, 73-84

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, 25, 2011, 2488-2494

PIOTROWSKI T., GARBACZ A., VAN DER WIELEN A. (S), COURARD L., NGUYEN F.: *On the relation between bond quality and impact-echo frequency spectrum*, Int. Journal for Restoration of Buildings and Monuments, 16 (4/5) 2010, 303-314

COURARD L., GARBACZ A.: *Surfology: what does it mean for polymer concrete composites?*, Int. Journal for Restoration of Buildings and Monuments, 16 (4/5) 2010, 291-302

GARBACZ A., COURARD L., KOSTANA K.: *Characterization of concrete surface roughness and its relation to adhesion in repair systems*, Materials Characterization, 56, 2006, 281-289

GARBACZ A., GÓRKA, M., COURARD, L.: *On the effect of concrete surface treatment on adhesion in repair systems*, Magazine of Concrete Research, 57, 2005, 49-60

NATIONAL JOURNALS

VAYSBURD A.M., BISSENETTE B., GARBACZ A., COURARD L.: *Specifying Concrete Repair Materials*, Materiały Budowlane, 3, 2016, 42-45

ZAŁĘGOWSKI K., JACKIEWICZ-REK W., GARBACZ A., COURARD L.: *Ślad węglowy betonu*, Materiały Budowlane, 12, 2013, 34-37

CZARNECKI L., COURARD L., GARBACZ A.: *Ocena skuteczności napraw - wpływ jakości podkładu betonowego*, Inżynieria i Budownictwo, 12, 2007, 630-634

COURARD L., GARBACZ A., PIOTROWSKI T.: *Inżynieria powierzchni betonu. Część 3. Termodynamiczne uwarunkowania adhezji*, Materiały Budowlane, 2, 2007, 6-7

COURARD L., GARBACZ A., NIEWĘGŁOWSKA-MAZURKIEWICZ A., PIOTROWSKI T.: *Inżynieria powierzchni betonu. Część 2. Wpływ obróbki na zarysowanie betonu*, Materiały Budowlane, 12, 2006, 8-11

GARBACZ A., PIOTROWSKI T., COURARD L.: *Inżynieria powierzchni betonu. Część 1. Struktura geometryczna powierzchni*, Materiały Budowlane, 9, 2006, 3-7

INTERNATIONAL CONFERENCES, SEMINARS AND CONGRESSES

BISSONNETTE B., COURARD L., JOLIN M., THOMASSIN M., VAYSBURD A., GARBACZ A.: *Adhérence des réparations en béton: évaluation et facteurs d'influence*, Quinzième édition des Journées Scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton (RF)B, Douai (France), 2014

BISSONNETTE B., COURARD L., GARBACZ A., VAYSBURD A.M., VON FAY K.F.: *Concrete repair bond: Evaluation and factors of influence*, 5th International Conference on Concrete Repair, Belfast (N. Ireland), 2014, 101-107

COURARD L., BISSONNETTE B., VAYSBURD A.M., GARBACZ A.: *Evaluation of the mechanical integrity of a concrete surface by means of combined destructive methods*, 5th International Conference on Concrete Repair, Belfast (N. Ireland), 2014, 147-150

GARBACZ A., COURARD L., BISSONNETTE B., GŁODKOWSKA, VAYSBURD A.M.: *Patch repair: Compatibility issues*, 5th International Conference on Concrete Repair, Belfast (N. Ireland), 2014, 231-236

COURARD L., GARBACZ A., BISSONNETTE B.: *Topography evaluation methods for concrete substrates: Parametric study, in: Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III - Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2012, Cape Town (Republic of South Africa), 2012, 1053-1058*

COURARD L., MICHEL F., GARBACZ A., PIOTROWSKI T.: *Surfology Based Concrete Repair Engineering*, European Symposium on Polymers in Sustainable Construction - ESPSC 2011, Warsaw (Poland), 2011

PIOTROWSKI T., GARBACZ A., VAN DER WIELEN A., COURARD L., NGUYEN F.: *On the relation between bond quality and impact-echo frequency spectrum*, Proc. of the 13th Int. Congress of Polymers In Concrete - ICPIC 2010, Funchal (Portugal), 2010, 373 - 380

COURARD L., GARBACZ A.: *Surfology: What does it mean for polymer concrete composites?* Proc. of the 13th Int. Congress of Polymers In Concrete - ICPIC 2010, Funchal (Portugal), 2010, 355 - 362

GARBACZ A., PIOTROWSKI T., KWAŚNIEWSKI L., COURARD L., MICHEL F.: *The effect of concrete substrate quality towards evaluation of repair system using impact-echo method*, 17th Theoretical Foundations of Civil Engineering, Polish-Ukrainian-Lithuanian Transactions, Vol 17, Warsaw (Poland), 2009, 581-588

COURARD L., MICHEL F., SCHWALL D., VAN DER WIELEN A., PIOTROWSKI T., GARBACZ A., PEREZ F., BISSONNETTE B.: *Surfology: concrete surface evaluation prior to repair*, Materials Characterisation IV, Computational Methods and Experiments, WIT Press, 2009, 407-416

COURARD L., GARBACZ A., MOCZULSKI G.: *Evaluation of the effect of load eccentricity on pull-off strength*, Proc. of the 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Cape Town (Republic of South Africa), 2008, 367-368

COURARD L., GARBACZ A., PIOTROWSKI T.: *Effects of concrete surface quality on adhesion of repair mortars*, Proc of the International Conference "Challenges for Civil Construction", FEUP, Porto (Portugal), 2008, 224-225 + CD

COURARD L., GARBACZ A.: *Failure of concrete repair: how to avoid it?*, keynote lecture, RILEM PRO 51: 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, Quebec (Canada), 2006, 167-191

GARBACZ A., PIOTROWSKI T., COURARD L.: *An analysis of stress wave propagation in repair systems using wavelet approach*, RILEM PRO 51 (CD): 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, Quebec (Canada), 2006

COURARD L., SCHWALL D., GARBACZ A., PIOTROWSKI T.: *Effect of concrete substrate texture on the adhesion properties of PCC repair mortar*, Proc. Int. Symposium on Polymers in Concrete, Guimareas (Portugal), 2006, 99-110

GARBACZ A., GÓRKA M., COURARD L.: *Relationship between surface characteristics and superficial cohesion of concrete*, CD Proc. of the Int. Conf. on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting - ICCRRR 2005, Taylor&Francis, Cape Town (Republic of South Africa), 2005, 1021-1026

COURARD L., PEREZ F., BISSONNETTE B., GÓRKA M., GARBACZ A.: *Two different techniques for the evaluation of concrete surface*, CD Proc. of the Int. Conf. on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting - ICCRRR 2005, Taylor&Francis, Cape Town (Republic of South Africa), 2005

GARBACZ, A., KOSTANA, K., COURARD, L.: *On the characterization of concrete surface roughness and its relations*, 9th European Congress on Stereology and Image Analysis 2005, Zakopane (Poland), 2005

COURARD L. (W), GARBACZ, A., GÓRKA, M.: *Concrete surface treatments quantification by means of mechanical profilometry*, Proc. of the 11th Int. Congress on Polymers in Concrete - ICPIIC '04, Berlin (Germany), 2004, 125-132

NATIONAL CONFERENCES, SEMINARS AND CONGRESSES

COURARD L., GARBACZ A., PIOTROWSKI T., SUSTERCIC J.: *Surface properties of concrete and criteria for adhesion of repair systems*, Proc. of the 1st KOSOVA Seminar on Polymers in concrete, 2013, 69-82.

PIOTROWSKI T., GARBACZ A., COURARD L.: *Pośrednia metoda oceny przyczepności warstwy naprawczej do podłoża betonowego na podstawie analizy falkowej sygnału impact-echo*, CD Proc. 41 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Toruń (Poland), 2012.

ADAMCZEWSKI G., GARBACZ A., VAN DER WIELEN A., PIOTROWSKI T., COURARD L.: *Zastosowanie metody GPR do oceny jakości zespolenia w układach naprawczych*, CD Proc. 41 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Toruń (Poland), 2012.

GARBACZ A., HARASSEK P., VAN DER WIELEN A., COURARD L.: *Modelowanie wpływu jakości podkładu betonowego na propagację fali sprężystej w metodzie impact-echo*, 39 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Szczyrk (Poland), 2010.

GARBACZ A., HARASSEK P., VAN DER WIELEN A., PIOTROWSKI T. COURARD L., NGUYEN F.: *Diagnostyka konstrukcji betonowych za pomocą impact-echo i radaru*, Konferencja Dni Betonu, Wisła (Poland), 2010.

L. COURARD, A. GARBACZ AND T. PIOTROWSKI.: *Some theoretical and practical considerations about surface preparation of concrete and adhesion of repair systems*, 16th Slovenski kolokvij o betonih, Ljubljana (Slovenia), 2009, 19-28.

GARBACZ A., COURARD L., PIOTROWSKI T.: *Znaczenie inżynierii powierzchni w naprawach betonu*, II Konferencja Naukowa Trwałość i niezawodność napraw obiektów budowlanych, Poznań (Poland), 2008.

COURARD L., GARBACZ A.: *Durabilité des réparations de béton: entre théorie et pratique*, Journées scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation dans le domaine du béton, Toulouse (France), 2006, 167-191.

COURARD L.: *Paramètres interfaciaux et environnementaux affectant la durabilité des travaux de réparation (Interfacial and Environmental Parameters Affecting Durability of Repair Works)*, Sympozjum Polsko-Walońskie "Trendy w inżynierii materiałów budowlanych" (Poland - Wallonia Symposium „Trends in building materials engineering”), Warsaw (Poland), 2005, pp. 11.

COURARD L., GARBACZ A.: *Concrete surface treatments quantification by means of mechanical profilometry and relationship with adhesion of concrete*, Sympozjum Polsko-Walońskie "Trendy w inżynierii materiałów budowlanych" (Poland - Wallonia Symposium „Trends in building materials engineering”), Warsaw (Poland), 2005, pp. 10.

DEGEIMBRE R., WIERTZ J., COURARD L.: *Reconnaissance de la qualité et de la conformité pour les produits et systèmes de réparation pour béton: expériences belge et européenne (Recognition of quality and conformity of concrete repair products and protection systems: Belgian and European experiences)*, Sympozjum Polsko-Walońskie "Trendy w inżynierii materiałów budowlanych" (Poland - Wallonia Symposium „Trends in building materials engineering”), Warsaw (Poland), 2005, pp. 7.

FLAMANT ST., DARIMONT A., WILLEM X., GEERS C., DEGEIMBRE R., WIERTZ J., COURARD L.: *Réparations des bétons avec un mortier auto-compactant: méthodologie et expérience belges (Repairing concrete with Self Compacting Concrete: Belgian testing methodology assessment and experience)*, Sympozjum Polsko-Walońskie "Trendy w inżynierii materiałów budowlanych" (Poland - Wallonia Symposium „Trends in building materials engineering”), Warsaw (Poland), 2005, pp. 11.

DEGEIMBRE R., COURARD L.: *Travaux de réparation au Pont Kennedy (Repair works on Kennedy bridge in Liège)*, Sympozjum Polsko-Walońskie "Trendy w inżynierii materiałów budowlanych" (Poland - Wallonia Symposium „Trends in building materials engineering”), Warsaw (Poland), 2005, pp. 3.

POSTERS

COURARD L., MICHEL F.: *Surface free energy of building materials*, in: E-MRS 2005 Fall meeting – Symposium G: Adhesion in Building Bonds- Macro, micro and nanoscale, Warsaw University of Technology, Warsaw (Poland), 2005.

GARBACZ A., KOSTANA K.: *Characterization of concrete surface geometry by laser profilometry*, in: E-MRS 2005 Fall meeting – Symposium G: Adhesion in Building Bonds- Macro, micro and nanoscale, Warsaw University of Technology, Warsaw (Poland), 2005.

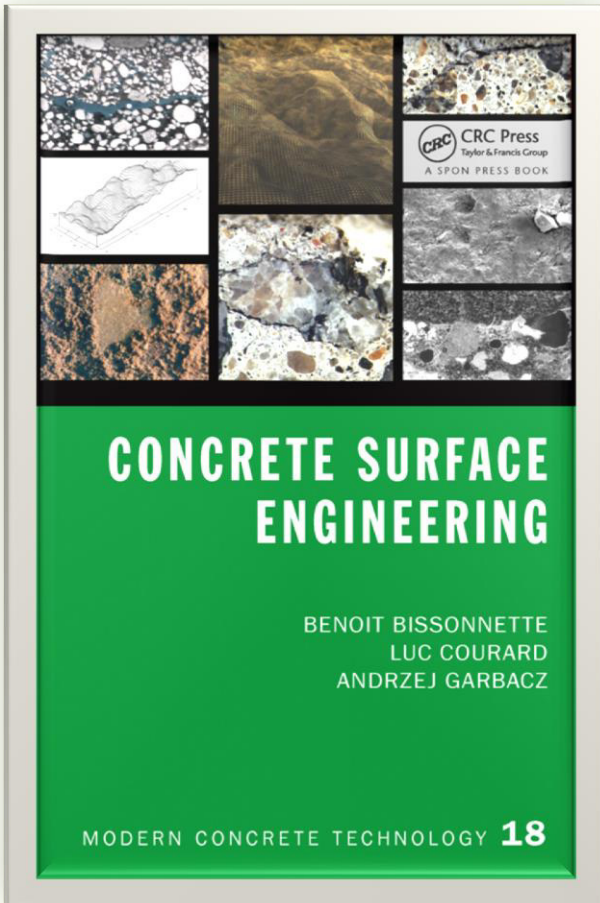
PIOTROWSKI T., GARBACZ A., SCHWALL D., COURARD L.: *On the effect of concrete substrate roughness on stress wave propagation in repair systems*, in: E-MRS 2005 Fall meeting – Symposium G: Adhesion in Building Bonds- Macro, micro and nanoscale, Warsaw University of Technology, Warsaw (Poland), 2005.

SCHWALL D., COURARD L.: *A new method for concrete surface roughness characterization by opto-morphology technique*, in: E-MRS 2005 Fall meeting – Symposium G: Adhesion in Building Bonds- Macro, micro and nanoscale, Warsaw University of Technology, Warsaw (Poland), 2005.



SELECTED PUBLICATIONS

1. BISSONNETTE B., COURARD L., GARBACZ A.: *Concrete Surface Engineering*, 12
series: Modern Concrete Technology, CRC Press Taylor & Francis Group, ISBN 9781498704885,
2016, pp.258
2. BISSONNETTE B., COURARD L., JOLIN M., THOMASSIN M., VAYSBURD A., GARBACZ A.: 14
Caractérisation de l'adhérence des réparations en béton: évaluation et facteurs d'influence,
Quinzième édition des Journées Scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche
et la Formation sur le Béton (RF)2B, Douai (France), 2014. (16 pages)
3. GARBACZ A., HARASSEK P., VAN DER WIELEN A., PIOTROWSKI T. COURARD L., NGUYEN F.: 27
Diagnostyka konstrukcji betonowych za pomocą impact-echo i radaru, Konferencja Dni
Betonu, Wisła (Poland), 2010. (8 pages)
4. COURARD L., MICHEL F., PERKOWICZ S., GARBACZ A.: *Effects of limestone fillers* 33
on surface free energy and electrical conductivity of the interstitial solution of cement
mixes, Cement and Concrete Composites 45, 2014, 111-116.
5. ZAŁĘGOWSKI K., JACKIEWICZ-REK W., GARBACZ A., COURARD L.: *Ślad węglowy betonu*, 44
Materiały Budowlane, 12, 2013, 34-37.



This book presents the fundamentals of concrete surface engineering, considered in view of repair and surface treatment. It is intended to serve as a leading-edge source of information for practicing engineers, architects, repair specialists, and researchers involved in concrete infrastructure maintenance. A comprehensive discussion of the various relevant topics is proposed, from concrete surface characterization to the achievement of a lasting bond, through physicochemical adhesion principles, repair /surface treatment compatibility requirements, and the various surface preparation considerations.

Features

- Delivers a comprehensive overview of concrete surface engineering basics and considerations
- Discusses the distinctive features of surface concrete
- Reviews the available surface preparation techniques and methods
- Provides guidance on materials and techniques for concrete surface treatments
- Caters to practitioners as well as researchers

Summary

Applying any material to an existing concrete surface intrinsically entails the development of a bond. Considering the ever increasing importance of concrete repair and protection, which imply the creation of an interface between two materials, an improved knowledge of concrete surface characteristics is paramount.

Surface engineering, which has evolved from the world of metallurgy, addresses all surface-related considerations, notably adhesion. It provides a fundamental understanding of what will make the contact between two materials effective or not, allowing for interactions of variable intensity. It also comes with a variety of scientific tools for characterizing the quality of the substrate, the properties of the new material layer and their interface. In the case of concrete surface treatment, this is especially important for achieving lasting results.

This book addresses the essentials of concrete surface engineering in view of a wide variety of concrete surface treatments, from protective coatings to repairs. It provides a leading-edge source of information for practicing engineers, architects, repair specialists, and researchers on the following topics:

- Surface engineering principles applied to concrete
- Methods and techniques for assessing concrete surface characteristics
- Fundamentals of adhesion between concrete and surface repairs/treatments
- Compatibility requirements for concrete surface repairs/treatments
- Review of surface preparation techniques available for concrete
- Achievement and appraisal of bond between existing concrete and surface repairs/treatments

Reviews

"The book is well written and thorough. It covers the pertinent topics related to concrete surfaces very thoroughly, in a logical order, and with very good documentation of the presented information. ... I believe that this book will be the standard on concrete surfaces for years to come."

—David Fowler, University of Texas at Austin, USA

"This book provides a thorough survey of the various aspects of the concrete surface, aspects that are relevant for the success of the repair."

—Prof. Johan Silfwerbrand, KTH Royal Institute of Technology, Sweden

Table of Contents:

Introduction

Fundamentals of surface engineering
Concept and significance of concrete
surface engineering applied to concrete

References

Surface of concrete

Surface of concrete: Concepts and
definitions
Concrete surface composition
Effective composition of the near-to-
surface layer
Conclusion

References

Characterization of concrete surface

Introduction
Surface profile
Mechanical properties
Cracking
Porosity
Moisture content
Surface composition
Chemical contamination
Aesthetics
Other properties
Conclusion

References

Interfacial phenomena

Adhesion: Principles
Adhesion: Thermodynamic approach
Contact angles and interfacial free energy
Evaluation of interfacial energies
Experimental studies
Conclusion

References

Compatibility

General considerations

Dimensional compatibility
Permeability compatibility
Chemical compatibility
Electrochemical compatibility
Aesthetical compatibility
Achievement of compatibility in repair
systems
Conclusion

References

Surface preparation

Objectives
Concrete removal techniques
Surface preparation techniques
Effects of preparation techniques on
surface roughness
Microcracking and bruising
Comparison and limitation of techniques
Moistening the surface
Conclusion

References

Surface treatment of concrete and adherence

Types of surface treatments for concrete
Evaluation of adherence
Influence of concrete surface
characteristics
Conclusion

References

Conclusions and perspectives

CARACTÉRISATION DE L'ADHÉRENCE DES RÉPARATIONS EN BÉTON ÉVALUATION ET FACTEURS D'INFLUENCE

B. Bissonnette,^A A. Garbacz,^B L. Courard,^C A. Vaysburd,^D et von Fay, K.F.^E

^A CRIB, Département Génie Civil, Université Laval, Québec, QC, Canada

^B Université de Technologie de Varsovie, Varsovie, Pologne

^C GeMMe Matériaux de bâtiment, Département ArGEnCo, Université de Liège, Liège, Belgique

^D Vaycon Consulting, Baltimore, MD, U.S.A.

^E 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 concernant la préparation de la surface avant réparation ont été émises dans un guide du USBR aux États-Unis.

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 in the USA.

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 (Courard, 2000): 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. 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;
- d'établir une corrélation entre les mesures d'adhérence (traction, cisaillement) et la rugosité de surface du substrat;
- d'évaluer quantitativement l'effet des défauts d'alignement sur les résultats de l'essai d'arrachement en traction;
- de déterminer et l'état humidité optimal dans le béton de support avant réparation;
- de 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'arrache-

ment en traction (ex. : ASTM C1583, EN 1542:1999). Cette méthode d'essai consiste à forer une carotte 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 rapportés 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).

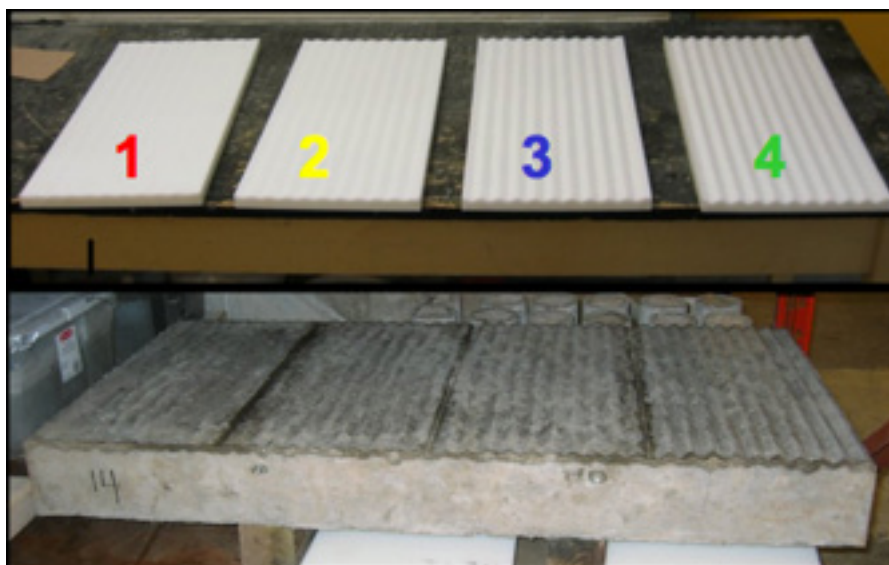


FIGURE 1. Matrices en acrylique usinées ($A = 2, 4, 6$ et 8 mm; $l = 30$ mm) avec un profil ondulatoire et surface résultante de la dalle profilée artificiellement.

Dans le cadre du programme d'essais rapporté ici, deux séries de dalles béton de $625 \times 1250 \times 150$ 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 (ICRI Guideline No. 03732).

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 Bissonnette (2004).

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) (Courard et coll., 2011). 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 échantillons ont ensuite été soumis 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 %. Suite à l'évaluation de la teneur en eau (mesures gravimétriques effectuées sur des éprouvettes témoins), les dalles ont finalement été réparées avec une chape en béton ordinaire (45 MPa) de 75 mm d'épaisseur. 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. RESULTATS ET ANALYSE

3.1 Influence de la préparation de la surface

3.1.1 Rugosité du substrat

Les valeurs de rugosité (demi-amplitude Ra) 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 grenillage 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.

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.

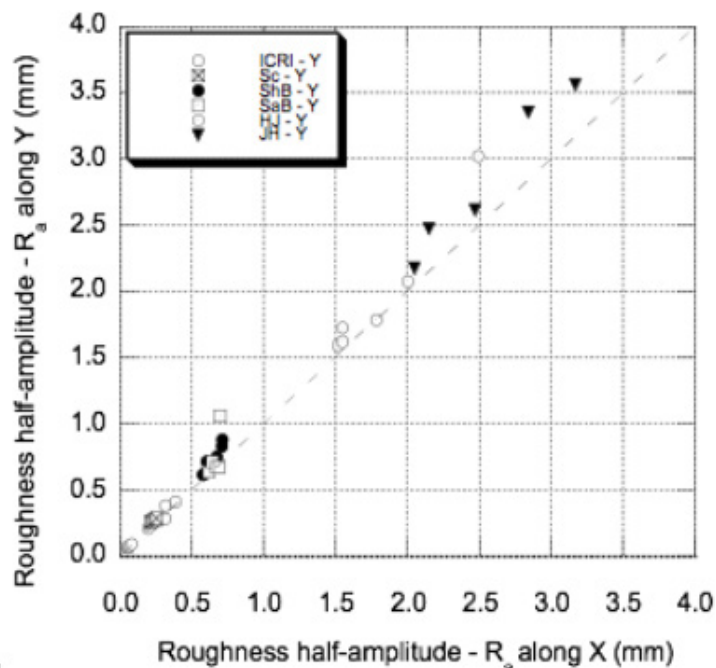


FIGURE 2. Résultats des mesures de rugosité effectuées par profilométrie optique sur des dalles de béton (25 et 35 MPa) préparées avec différentes techniques (ici et par la suite dans l'article: Sc: scarification; ShB: grenailage; SaB: jet de sable; HJ: hydrodémolition; JH: marteau-piqueur).

3.1.2 L'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.

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 (Bissonnette et coll., 2006).

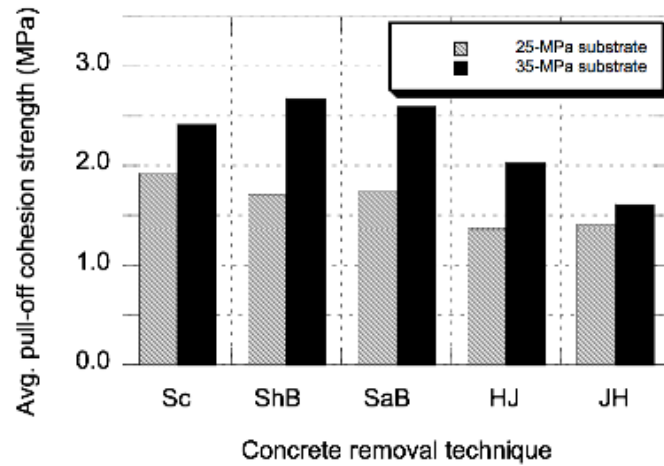


FIGURE 3. Résultats des essais d'arrachement en traction (CSA A23.2-6B modifiée) effectués sur les dalles d'essai après les opérations de préparation pour en évaluer l'intégrité mécanique superficielle.

Dans le cas de l'hydrodémolition, comme tendent à le démontrer subséquemment les résultats des essais d'arrachement en traction sur dalles réparées, les contraintes d'arrachement en traction plus basse enregistrées ne sont probablement pas dues à de l'endommagement, 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.

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. Quoi qu'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.

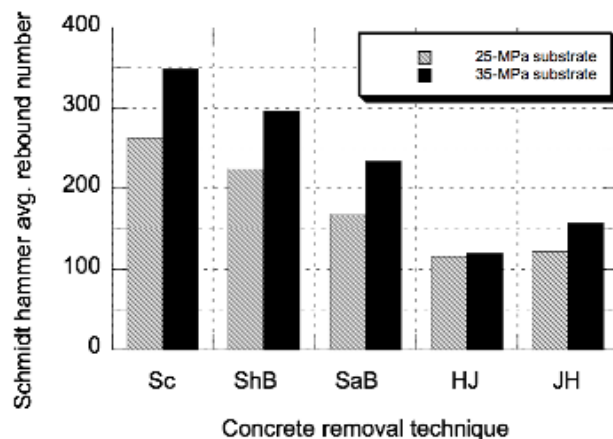


FIGURE 4. Résultats des sondages au marteau Schmidt (ASTM C805) effectués sur les dalles d'essai après les opérations de préparation pour en évaluer l'intégrité mécanique superficielle.

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.

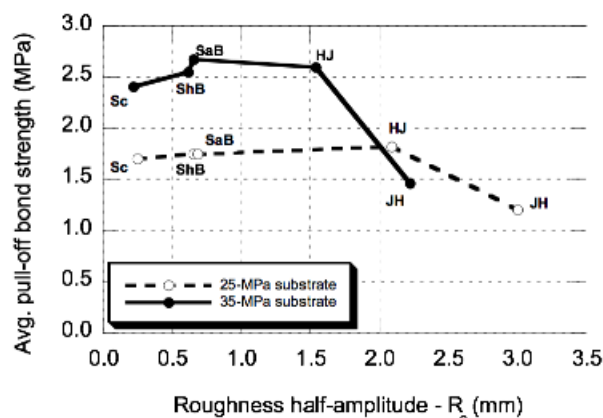


FIGURE 5. Résultats des essais d'arrachement en traction (ASTM C1583) effectués après réparation sur les dalles d'essai préparées avec différentes techniques.

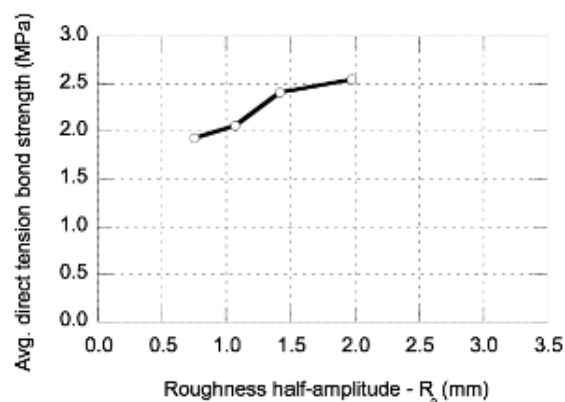


FIGURE 6. Résultats des essais d'arrachement en traction (ASTM C1583) effectués après réparation sur la dalle d'essai profilée artificiellement.

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 (fst-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.

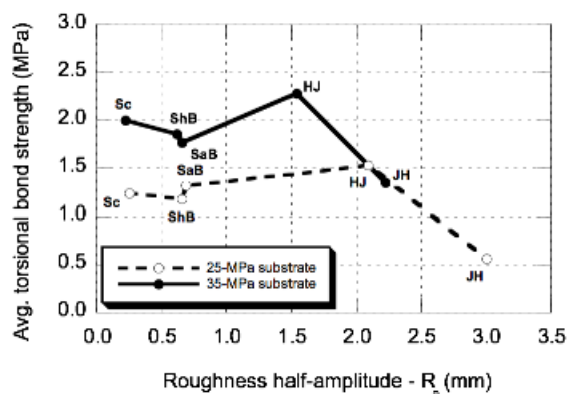


FIGURE 7. Résultats des essais d'arrachement en torsion effectués après réparation sur les dalles d'essai préparées avec différentes techniques.

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 augmentent 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.

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.

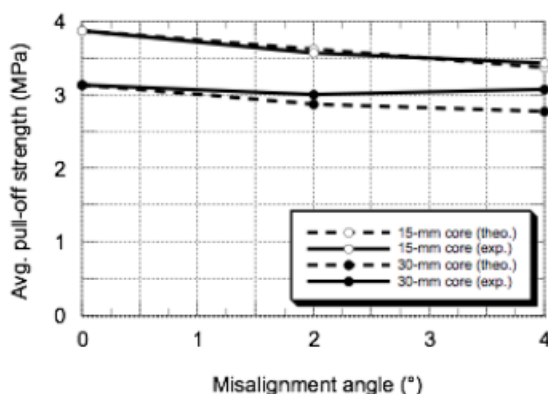


FIGURE 8. Influence de l'angle de désalignement sur les résultats des essais d'arrachement en traction: comparaison des résultats théoriques et expérimentaux.

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 dégagant 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.

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 %.

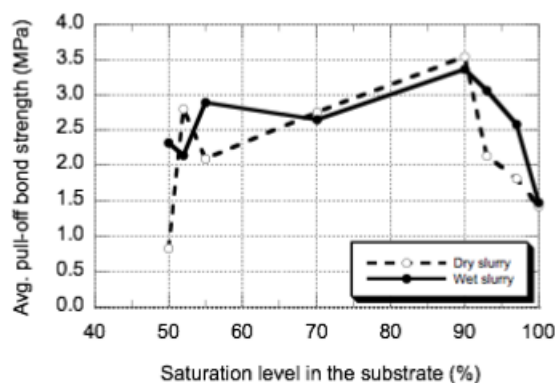


FIGURE 9. Résultats des essais d'arrachement en traction (EN 1542:1999) effectués sur des dalles d'essai réparées à différents niveaux de saturation avec un mortier de réparation modifié aux polymères, mis en place après application d'un coulis modifié aux polymères (sec ou humide).

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.

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.

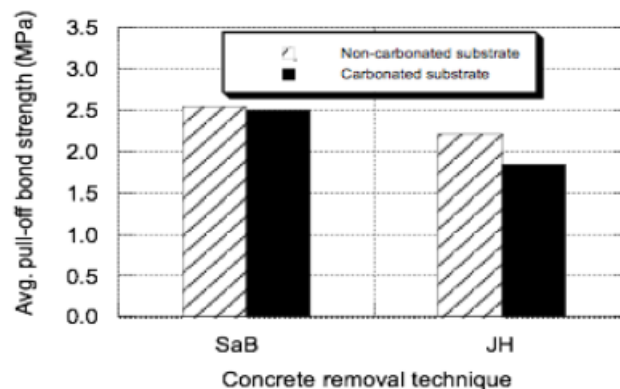


FIGURE 10. Résultats des essais d'arrachement en traction (ASTM C1583) effectués sur les dalles d'essai préparées avec différentes techniques, à l'état non carbonaté ou carbonaté.

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 été 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 présenté 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 (Bissonnette et coll., 2012).

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 (FRQNT), 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

ASTM C39. 2005. 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.

ASTM C469. 2002. 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.

ASTM C496. 2004. 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.

ASTM C805. 2002. 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.

ASTM C1583. 2004. 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.

Bissonnette, B.; Courard, L. & Vaysburd, A.M. 2006. Concrete Removal Techniques – Influence on Residual Cracking and Bond Strength, Concrete International, 28(12), pp. 49-55.

Bissonnette, B.; Vaysburd, A.M. & Von Fay, K.F. 2012. Best Practices for Preparing Concrete Surfaces

Prior to Repairs and Overlays, Report Number MERL 12-17, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, CO, USA, 92 p.

Courard, L. 2000. Parametric Study for the Creation of the Interface between Concrete and Repair Products, *Materials and Structures*, 33(225), pp. 65-72.

Courard, L. & Bissonnette, B. 2004. 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*, 37(269), pp. 342-350.

Courard, L.; Lenaers, J.F.; Michel, F. & Garbacz A. 2011. Saturation Level of the Superficial Zone of Concrete and Adhesion of Repair Systems, *Construction and Building Materials*, 25(5), pp. 2488-2494.

CRD-C 164. 1992. 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.

CSA A23.2-6B. 2000. Method of Test to Determine Adhesion by Tensile Load, CSA A23.2-00 Methods of Test for Concrete, Canadian Standards Association, Rexdale, ON, Canada

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.

ICRI Guideline No. 03732. 1997. Selecting and Specifying Concrete Surface Preparation for Sealers, Coatings, and Polymer Overlays, International Concrete Repair Institute,

Des Plaines, IL, USA.

DIAGNOSTYKA KONSTRUKCJI BETONOWYCH ZA POMOCĄ IMPACT-ECHO I RADARU

dr hab. inż., Andrzej Garbacz^A, mgr inż., Piotr Harassek^A, mgr inż., Audrey Van der Wielen^B,
dr inż., Tomasz Piotrowski^A, prof. dr inż., Luc Courard^B, prof. dr inż., Frederic Nguyen^B

^A Politechnika Warszawska

^B University of Liege

STRESZCZENIE: W świetle normy europejskiej PN-EN 1504 zapewnienie skuteczności naprawy konstrukcji betonowych wymaga diagnozy jej stanu technicznego, opracowania właściwego sposobu naprawy oraz kontroli skuteczności przeprowadzonej naprawy. Wśród metod nieniszczących stosowanych w diagnostyce konstrukcji betonowych za najbardziej obiecujące uważa się dwie metody: impact echo i ground penetrating radar. Celem niniejszej pracy jest analiza przydatności tych metod w dwóch szczególnych przypadkach diagnostyki: wykrywanie defektów w elementach betonowych o nieregularnym kształcie oraz wykrywanie cienkowarstwowych defektów zlokalizowanych na powierzchni zespolenia w układach naprawczych.

ABSTRACT: According the European standard PN-EN 1504 the efficient repair of concrete structures requires the diagnosis of its technical conditions, an elaboration of suitable repair technology and a quality control of repair efficiency. Among nondestructive methods applicable to diagnosis of concrete structures the two methods are considered as the most promising for this purpose: impact-echo and ground penetrating radar. The aim of this work is analysis of usability of these methods in two special diagnosis cases: the detection of various non-homogeneities in concrete structure of complex shape and the detection of thin defects at the interface in repair systems.

1. WPROWADZENIE

Zapewnienie skuteczności naprawy i w konsekwencji trwałego przywrócenia stanu użytkowania obiektu jest zagadnieniem skomplikowanym, wymagającym diagnozy stanu technicznego konstrukcji, opracowania właściwego sposobu naprawy oraz kontroli skuteczności przeprowadzonej naprawy [1]. Obecnie do praktyki inżynierskiej wprowadzana jest norma europejska o statusie normy polskiej EN 1504-1÷10 pod ogólnym tytułem „Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji z betonu” [2]. Arkusze PN-EN 1504-10 zawiera odpowiadające tym metodom zalecenia co do przygotowania podłoża betonowego i zbrojenia, stosowania wyrobów oraz sterowania jakością. System sterowania jakością obejmuje badania lub obserwacje, służące określeniu wartości cech potwierdzających skuteczność naprawy daną metodą. Większość badanych właściwości odnosi się do kontroli zmonolityzowania konstrukcji w wyniku naprawy. W ocenie tej wykorzystywane są również metody nieniszczące [3].

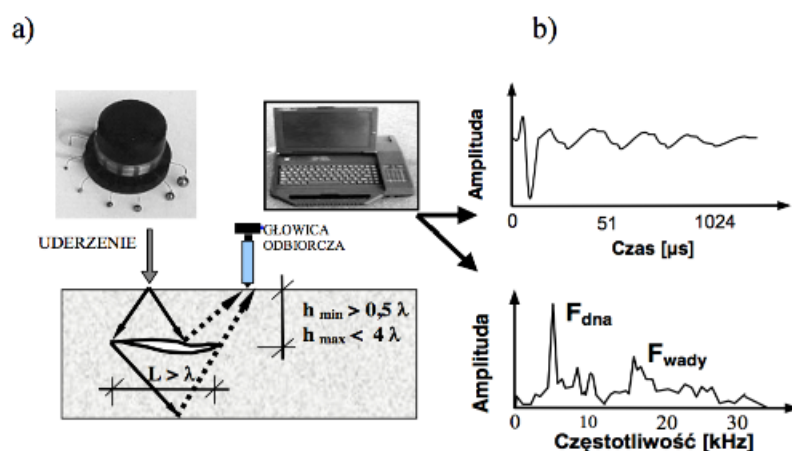
Metody nieniszczące NDT stosowane w diagnostyce konstrukcji betonowych można podzielić na dwie grupy: metody służące szacowaniu wytrzymałości betonu oraz metody stosowane do oceny integralności konstrukcji. Ta druga kategoria obejmuje metody wykorzystywane do wykrywania wad wewnętrznych oraz do lokalizacji i oceny stanu zbrojenia stalowego. Wśród grupy metod stosowanych do oceny integralności za najbardziej obiecujące uważa się dwie metody: impact echo i ground penetrating radar. Z każdą z tych metod związany jest określony obszar zastosowań jak i ograniczenia.

Celem niniejszej pracy jest analiza przydatności tych metod do dwóch szczególnych przypadków: wykrywanie defektów w elementach betonowych o nieregularnym kształcie oraz wykrywanie cienkowarstwowych defektów zlokalizowanych na powierzchni zespolenia w układach naprawczych.

2. CHARAKTERYSTYKA IMPACT-ECHO I RADARU

2.1 Impact-echo

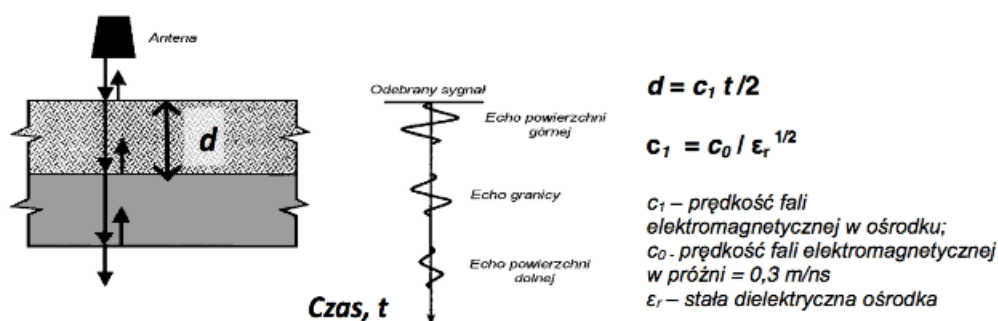
W metodzie tej wykorzystuje się propagację fal sprężystych generowanych w wyniku uderzenia stalową kulką o powierzchnię. Mają one relatywnie niską częstotliwość, a co za tym idzie mniejszą wrażliwość na naturalną niejednorodność betonu. Interpretacja wyników polega na jednoczesnej analizie sygnału w dziedzinie czasu oraz jego widma częstotliwości (rys.1). Standardowe procedury [4] dotyczą: szacowania grubości elementów betonowych, ich jednorodności wewnętrznej (wykrywanie delaminacji, pustek, efektów „plastra miodu”) oraz szacowania głębokości rys powierzchniowych. Oprócz tych zastosowań metoda jest wykorzystywana do oceny jakości układów wielowarstwowych, w tym będących wynikiem szeroko rozumianych napraw: szacowanie grubości warstw, lokalizacja wad w poszczególnych warstwach układu; ocena skuteczności napraw elementów betonowych (np. [3, 5, 6]). W przypadku układów wielowarstwowych w zarejestrowanym widmie częstotliwości wyznacza się częstotliwości odpowiadające głębokości występowania ewentualnych defektów z uwzględnieniem prędkości fali sprężystej w poszczególnych elementach. Najlepsze rezultaty uzyskuje się w badaniach elementów płytowych przy wykrywaniu defektów zawierających warstwę powietrza. Jeśli kształt obiektu odbiega od charakterystycznego dla obiektów płytowych rejestrowane widmo częstotliwości staje się bardziej złożone i trudniejsze w interpretacji.



Rys.1. Schemat metody Impact-Echo: a) droga fali w miejscu wystąpienia wady, b) zarejestrowany przebieg czasowy oraz odpowiadające mu widmo częstotliwości z pikami częstotliwości dominujących

2.1. Ground Penetrating Radar

Ground Penetrating Radar (GPR) jest metodą bezkontaktową, której zasada działania jest bardzo zbliżona do najczęściej stosowanej w defektoskopii ultradźwiękowej metody echa, lecz zamiast fal sprężystych wykorzystuje się fale elektromagnetyczne [7]. Różnica właściwości dielektrycznych dwóch materiałów determinuje ilość odbitej energii fali, która jest rejestrowana przez antenę (rys.2). Najważniejszą różnicą między radarem a impact-echo jest to, że w przypadku granicy ośrodków np. beton-powietrze tylko 50% energii fali elektromagnetycznej jest odbijana od granicy. Dlatego w badaniach za pomocą radaru można uzyskać informacje o warstwach znajdujących się np. pod delaminacją.



$$d = c_1 t / 2$$

$$c_1 = c_0 / \epsilon_r^{1/2}$$

c_1 – prędkość fali elektromagnetycznej w ośrodku;
 c_0 - prędkość fali elektromagnetycznej w próżni = 0,3 m/ns
 ϵ_r – stała dielektryczna ośrodka

Rys.2 Schemat badań za pomocą ground penetrating radar (wg [7])

W zastosowaniach budowlanych radar wykorzystywany jest do wykrywania rozwarstwień i wad, lokalizacji prętów zbrojeniowych w elementach żelbetowych, pomiar grubości nawierzchni drogowych, określania zawartości wilgoci i zawartości chlorków (np. [8,9]). Do najważniejszych ograniczeń zaliczyć można fakt, że wyniki zależą od warunków otoczenia, w których prowadzony jest pomiar (np. metoda nie powinna być stosowana do badań betonu w stanie nasycenia), a także duże błędy jeśli przyjęto niewłaściwe wartości stałych dielektrycznych.

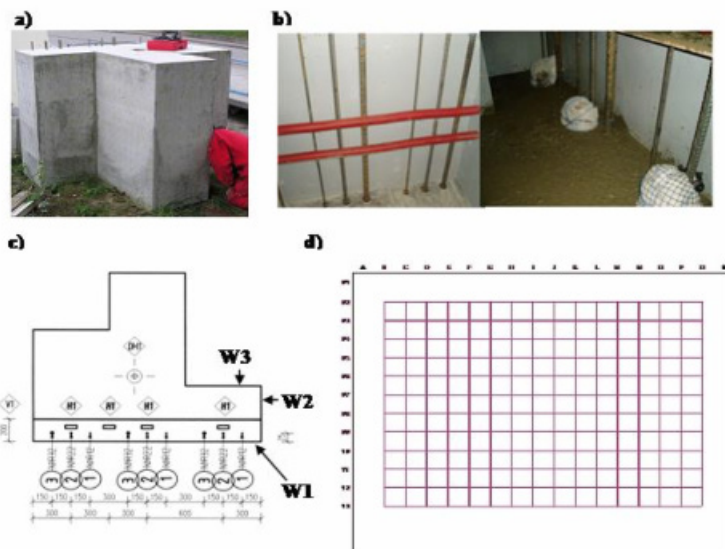
3. WYNIKI BADAŃ ELEMENTÓW BETONOWYCH METODĄ IMPACT-ECHO I RADAREM

3.1. Badanie elementu betonowego o nieregularnym kształcie ze sztucznymi wadami

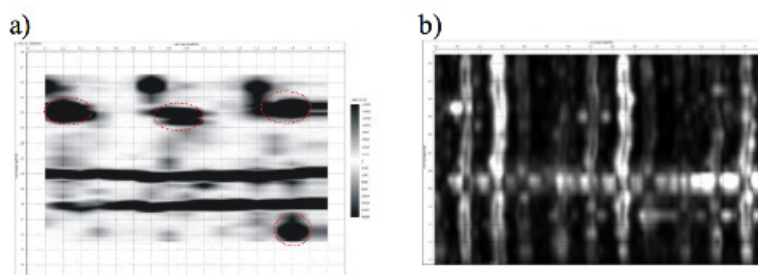
Przydatność obu metod do wykrywania defektów w elementach o skomplikowanym kształcie (Fig.3a,c) analizowano w ramach grantu koordynowanego przez Brno University of Technology. W elemencie tym zabetonowano różnego rodzaju nieciągłości mikrostruktury takie jak: pręty zbrojeniowe o różnej średnicy, kanały z tworzywa sztucznego wypełnione zaprawą cementową oraz umieszczony w workach żwir symulujący niezagęszczenie betonu (Fig.3b,c). Szczegółowe dane dotyczące badań zawarte są w publikacji Garbacza i in. [10]. Zaprezentowane dalej wyniki badań przeprowadzonych metodą impact-echo i radarem odnoszą się do ścian (rys.1c) oznaczonych W1 i W2. Ściana oznaczona jako W3 była dodatkowo badana metodą impact-echo. Skanowanie GPR zostały przeprowadzone wzdłuż linii siatki pomiarowej pokazanej na rysunku 3d za pomocą urządzenia RAMAC prod. Mala GeoScience. Badania metodą impact-echo wykonano w węzłach tej siatki urządzeniem DOCTer prod. Germann Instruments.

Przeprowadzone badania wykazały przydatność GPR do wykrywania defektów (rys.4) jeśli są ulokowane stosunkowo blisko powierzchni – do 20 centymetrów. Przy większych głębokościach należy stosować niższe częstotliwości. Obniża to znacznie rozdzielczość metody. W przypadku elementów betonowych o skomplikowanych kształtach defekty położone głębiej mogą być trudne do wykrycia ze względu na odbicie fali elektromagnetycznej od defektów położonych bliżej powierzchni.

W odniesieniu do metody impact-echo uzyskane wyniki potwierdziły jej przydatność, przede wszystkim, do wykrywania defektów zawierających warstwę powietrza powodującą odbicie fali sprężystej (rys.5). W przypadku badań elementu betonowego o skomplikowanym kształcie stwierdzono występowanie wielokrotnych odbić od krawędzi elementu. W konsekwencji, oprócz podstawowego, w widmie występują kolejne mody drgań. Z tego względu interpretacja widm częstotliwości uzyskanych przy skanowaniu ściany W1 ubyła utrudniona - częstotliwości odpowiadające odbiciu fali sprężystej od badanych defektów była zbliżona do częstotliwości odpowiadającym kolejnych modom drgań. Ponadto, widma uzyskane dla ściany W1 były zaburzone oddziaływaniem fali z stosunkowo gęsto rozłożonym zbrojeniem. Skanowanie ścian W2 i W3 wskazywało na występowanie defektów wewnątrz elementu – linie 3, 5, 9 11 (brak zagęszczenia betonu). Stwierdzono również, że metoda-impact echo nie pozwoliła na zlokalizowanie występowania zbrojenia w tym elemencie, nawet o średnicy 32mm. Jednakże, na tej podstawie, można wnosić o dobrej jakości zespolenia między prętami a otuliną betonową – brak pustek powietrznych wokół prętów.



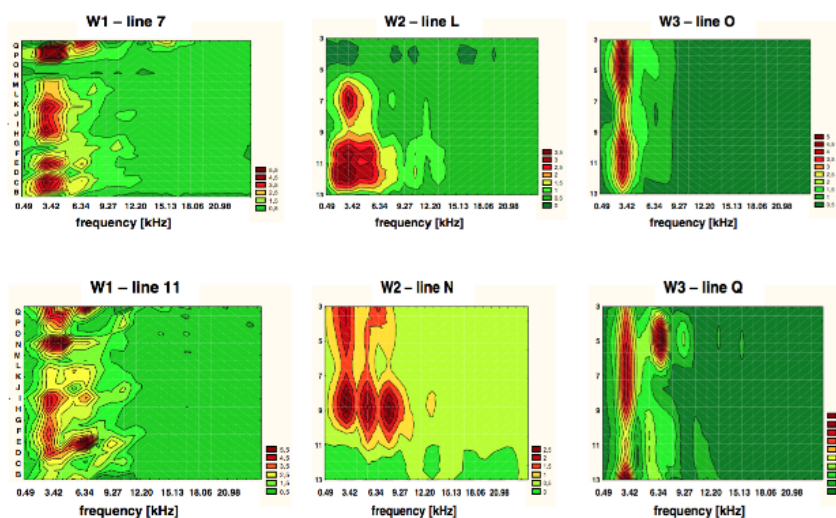
Rys.3. a) widok badanego elementu betonowego, b) widok nieciągłości mikrostruktury betonu, c) schemat rozmieszczenia nieciągłości w elemencie, d) siatka punktów pomiarowych stosowanych w badaniach impact-echo i GPR



Rys. 4. Wyniki badań elementu betonowego radarem z anteną o częstotliwości: a) 800 MHz GPR oraz b) 1600 MHz z zastosowanie programu komputerowego do wizualizacji 3D

3.2 Wykrywanie defektów na powierzchni zespolenia w układach naprawczych

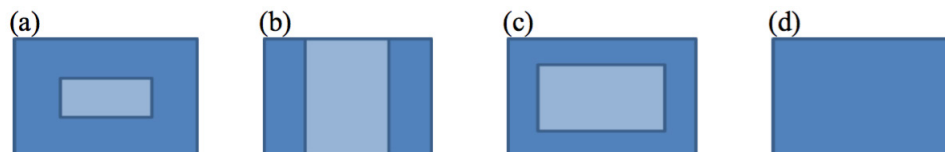
Celem projektu badawczego realizowanego we współpracy między Politechniką Warszawską i Uniwersytetem w Liege była ocena możliwości wykorzystania impact-echo i radaru do wykrywania defektów nie zawierających warstwy powietrza i zlokalizowanych na powierzchni zespolenia w układach naprawczych. Wybór rodzajów elementów podyktowany był praktycznymi potrzebami lokalnego Ministerstwa Transportu i Robót Publicznych. Tego rodzaju defekty są trudniejsze do wykrycia szczególnie w przypadku metody impact-echo.



Rys.5. Przykładowe rozkłady widm częstotliwości wzdłuż linii siatki pomiarowej ścian W1, W2 i W3 badanego elementu betonowego

Do badań przygotowano cztery podkłady betonowe o wymiarach 600 x 800 x 80 mm i klasie wytrzymałości betonu C20/25. Po 28 dniach dojrzewania powierzchnię podkładów poddano piaskowaniu. Na powierzchnię trzech kolejnych podkładów ułożono odpowiednio (rys.6):

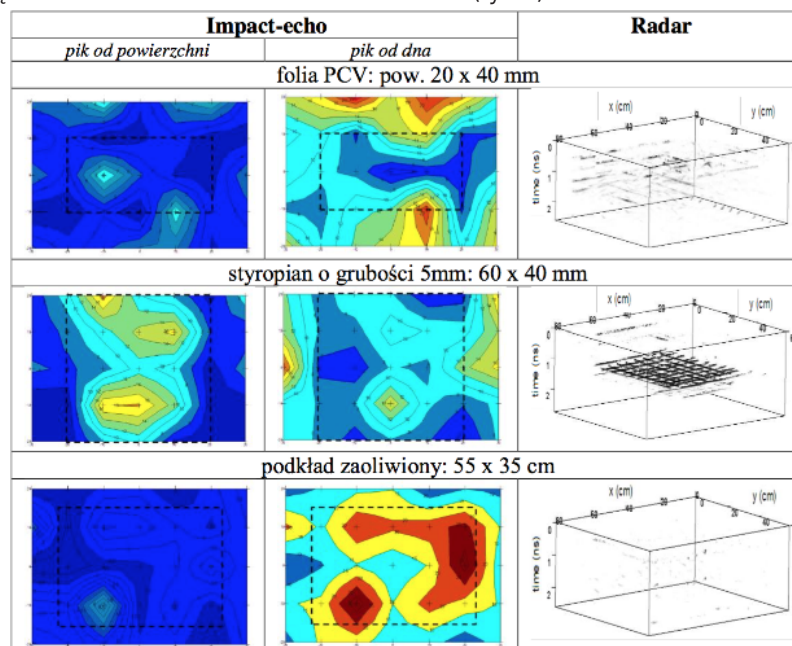
- folię z tworzywa sztucznego o wymiarach 20x40 mm,
- płytę styropianową o wymiarach 60 x 40 x 5mm,
- warstwę oleju używanego przy deskowaniu na powierzchni o przybliżonych wymiarach 55 x 35 mm.



Rys.6. Rozmieszczenie defektów na powierzchni zespolenia: a) folię z tworzywa sztucznego, b) płytę styropianową, c) warstwa oleju, d) układ bez defektów

Na tak przygotowane podkłady nałożono warstwę handlowo dostępnej zaprawy naprawczej o grubości 80 mm. Wykonano również referencyjny układ naprawczy bez defektów na powierzchni zespolenia (rys.6d). Po 28 dniach dojrzewania zaprawy wykonano badania impact-echo za pomocą urządzenia DOCTer prod. Germann Instruments oraz radaru prod. Mala GeoScience z anteną o częstotliwości 2,6 GHz. Prezentowane poniżej wyniki dotyczą badań nieniszczących. W kolejnym etapie ocena ta zostanie zweryfikowana metodami niszczących.

W badaniach impact-echo jako wskaźnik występowania defektów przyjęto amplitudę pików częstotliwości odpowiadającej odbiciu fali od powierzchni zespolenia (por. rys.1b). Widma częstotliwości dla próbki referencyjnej (bez defektów) zawierały wyraźny pik odpowiadający odbiciu fali od przeciwległej powierzchni próbki i nie zawierały pików odpowiadających odbiciu fali od powierzchni zespolenia. Również badania radarem nie wskazywały obecności powierzchni zespolenia. Badania próbek ze sztucznymi wadami wykazały odmienną czułość obu metod na ich obecność (rys.7).



Rys. 7. Rozkład amplitud pików odbicia fali od powierzchni zespolenia i dna (ta sama skala wartości amplitudy) oraz wizualizacja 3D sygnału radaru (skala szarości miarą intensywności sygnału) dla układów naprawczych zawierających różne typy defektów na powierzchni zespolenia

W przypadku układu zawierającego folię z tworzywa sztucznego nie obserwowano w widmie częstotliwości pików od powierzchni zespolenia oraz od dna próbki. W układzie zawierającej styropian

obserwowano wzrost amplitudy piku od powierzchni zespolenia i znaczny spadek amplitudy piku od dna. Badania wykonane radarem pozwoliły również na dokładne zlokalizowanie występowania płyty styropianowej. Natomiast, w badaniach impact-echo jak i za pomocą radaru nie wykryto obecności oleju na powierzchni zespolenia.

4. PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy analizowano przydatność metody impact-echo i radaru w dwóch szczególnych przypadkach diagnostyki konstrukcji betonowych: wykrywanie defektów w elementach o nieregularnym kształcie oraz wykrywanie cienkowarstwowych defektów zlokalizowanych na powierzchni zespolenia w układach naprawczych.. Wyniki badań potwierdziły, że metoda impact-echo jest przede wszystkim przydatna do badania obiektów płytowych oraz wad zawierających warstwę powietrza, np. delaminacje. Jednakże, w przeprowadzonych badaniach wykazano możliwość jej wykorzystania do wykrywania takich defektów jak płyty styropianowe i folie z tworzyw sztucznych. Radar stwarza większe możliwości wykrywania wad różnych typów, w tym nie zawierających powietrza, jeśli są one stosunkowo grube i płytko zlokalizowane. Obie metody są praktycznie nie przydatne do wykrywania warstwy oleju, np. pozostawionego na powierzchni podkładu betonowego przed naprawą.

5. LITERATURA

- [1] Czarnecki L., Emmons P., Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych, Polski Cement, Kraków, 2002
- [2] Czarnecki L., Łukowski P., Naprawa i ochrona betonu zgodnie z PN-EN 1504, Materiały Budowlane, Nr 2, 2009, 2-4, 22
- [3] Garbacz A., Nieniszczące badania betonopodobnych kompozytów polimerowych za pomocą fal sprężystych – ocena skuteczności napraw, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Budownictwo. z.147, Warszawa, 2007
- [4] Sansalone M. J., Street W. B., Impact-echo. Nondestructive evaluation of concrete and masonry, Ithaca NY, Bulbrier Press, 1997
- [5] Sansalone M., Carino N.J., Detecting honeycombing, the depth of surface-opening cracks and ungrouted ducts using the impact-echo methods, Concrete International, No.4, 1988, 38-46
- [6] Hola J., Schabowicz K., Sadowski L., Non-Destructive Evaluation of the Concrete Floor Quality Using Impulse Response S'Mash And Impact-Echo Methods, www.ndt.net, the e-Journal & Database of Nondestructive Testing - ISSN 1435-4934, 3, 2009
- [7] Malhorta V.M., Carino N.J., Handbook on nondestructive testing of concrete, CRC Press, 2004
- [8] Hugenschmidt J., Non-destructive-testing of traffic-infrastructure using GPR, CD Proc. of Int. Symp. on Non-Destructive Testing in Civil Engineering - NDT-CE 2003, Berlin, 2003, BB 85-CD
- [9] Laurens S., Balayssac J.P., Rhazi J., Klysz G., Arliguie G., Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: experimental study and direct modeling, Materials and Structures, 38, 2005, 827-832
- [10] Garbacz A., Stainbruch J., Hlaváč Z., Hobst L., Anton O., Defect detection in concrete structures with NDT methods: impact-echo versus radar, www.ndt.net, the e-Journal & Database of Nondestructive Testing - ISSN 1435-4934, 3, 2009

Podziękowania

Praca została przygotowana w ramach pracy statutowej WIL PW nr 504 G 1080 7007. Autorzy dziękują Panu prof. dr hab. inż. Lechowi Czarneckiemu, Kierownikowi Katedry Inżynierii Materiałów Budowlanych Politechniki Warszawskiej za cenne uwagi i dyskusje podczas przygotowywania artykułu. W pracy wykorzystano wyniki projektu badawczego prowadzonego we współpracy z University of Liege pt. „Improvement of signal interpretation for an adhesion evaluation in repair system investigated with impact-echo and geo-radar” wpisanego do Umowy między Polską a Belgią (Walonia) na lata 2008-2009. W pracy wykorzystano częściowo wyniki badań impact-echo zrealizowanych na zlecenie Brno University of Technology.

EFFECTS OF LIMESTONE FILLERS ON SURFACE FREE ENERGY AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE INTERSTITIAL SOLUTION OF CEMENT MIXES

Luc COURARD*, Frédéric MICHEL*, Sylwia PERKOWICZ** and Andrzej GARBACZ**

*University of Liege, ArGEnCo Département, GeMMe Building Materials, Belgium

**Warsaw University of Technology, Department of Building Materials Engineering, Poland

ABSTRACT : Most of concrete formulations actually contain mineral additives that are used as an inert filler or supplementary cementitious material (as type II addition). These materials are generally used in order to increase concrete performances both in its fresh and hardened states. The mineral additives usually improve the consistency and workability of fresh concrete and reduce the water demand for a required concrete slump because of an additional volume of fines. The way of action depends on the physical and chemical characteristics of fillers. The study of surface free energies and electric conductivities of interstitial solutions of cement mixes modified by blast furnace slags and limestone fillers contributes to a better knowledge of hardening and interaction process.

KEYWORDS: concrete, limestone fillers, blast furnace slags, electrical conductivity, surface free energy, dormant period.

1. INTRODUCTION

Mineral filler can be defined as "inert material that is included in a composition for some useful purpose" [1]. It can be added to compounds to fulfil a large variety of final results or to improve specific properties like: hardness, brittleness, impact strength, compressive strength, softening point, fire resistance, surface texture, electrical conductivity, ... etc [2, 3]. These effects are the result of the properties of the fillers, including chemical activity, hardness, particle size, shape and distribution, surface structure, colour, density [4, 5]. They may also be included in compounds to reduce the cost of the product.

Many types of fillers are largely used in concrete industry [6]. Specifically, the two essential properties of fresh Self-Compacting Concrete, i.e high fluidity and low segregation, can be achieved by using large amount of superplasticizer and fine particles [7, 8]. These are notably used as cement replacement materials (cement additives). Among additives, limestone fillers seem well-adapted, specifically for Belgian market, because of their local availability [3]. As the behaviour of fresh and hardened concrete depends on the intrinsic properties of fines [9, 10], the use of these by-products requires a thorough characterization. They usually differ from each other through their physical characteristics (Blaine fineness, particle size distribution, water requirement) but also chemical and mineralogical characteristics (presence of impurities such as clay, quartz and dolomite) [3, 4].

The objective of this research is to analyse the potential effect of limestone fillers on the surface free energy and electrical conductivity of interstitial solutions of Portland and Blast Furnace Slag cement-based slurries. These properties are indeed very often used for monitoring the early stage of hardening of various types of cement binders (eg. [11,12]). As soon as cement and water are mixed, physico-chemical interactions appears for ion transfers, components dissolution and products crystallization: they finally induce strength

development [13].

The surface free energies and their components between two interacting surfaces are extremely important since not only do they dictate the strength of interaction, but also control processes like the stability of aqueous colloidal suspensions, wetting, spreading and adhesion [14, 15]. The interactions solid-liquid are mainly controlled by the interfacial surface tensions between the two phases. The characterization of the surface properties and especially the surface free energy components of the solid are, therefore, recognized as the key to understanding the mechanism of surface-based phenomena [16]. This information provides essential insight into the mechanism of such interactions as the stability of colloidal suspensions, molecular self-assembly, wetting, spreading, bubble-particle, particle-particle interaction in the industrial applications [15, 16]. Moreover, electrical interactions, basically responsible for dissolution and combination of chemical species, maybe followed by means of electrical conductivity measurement: ion transfers will indeed induce modification of electrical resistivity of the solution. That's the reason why this technique is suitable for the observation of hydration process in the early stage.

Consequently, the techniques used in this work to analyse these solutions are based on the surface free energy and the conductivity of the liquid phases, respectively. The measurements are realized on centrifuged solutions, without solid particles in suspension [17].

2. EXPERIMENTAL PROGRAM

2.1. Materials

Slurries were considered as experimental materials because we intended to analyse the behaviour of the interstitial solution. Electrical conductivity may be different for concretes or mortars as inert materials can be considered as "insulating" materials [18].

The Portland cement of CEM I 42.5 R HES type was used. Blast furnace slag cement was re-composed with 65 % (by mass) of Portland cement (P) and 35 % of blast furnace slag (BFS).

The limestone fillers can be classified in two groups: natural and synthetic mineral-derived fillers. The first group includes ground calcium carbonate and the second group precipitated calcium carbonate. In this work ground calcium carbonates as additives to cement slurry were tested. Characteristics of limestone filler include physical properties such as hardness, natural particle size and shape but also chemical composition, chemical reactivity. Characteristic of four different commercial fillers and two binders used for investigations are presented in Table 1 and Table 2 respectively.

TABLE 1. Characteristics of limestone fillers

Filler	F1	F2	F3	F4
Physical characteristics				
Specific Gravity [kg/m ³]	2.7	2.7	2.7	2.7
Hardness, Mohs' Scale	3	3	3	3
x ₅₀ [µm]	12.00	9.00	12.58	7.27
Chemical characteristics				
CaCO ₃ [%]	98.20	98.20	98.10	98.86
MgO [%]	0.40	0.40	0.35	0.26
SiO ₂ [%]	0.40	0.40	0.53	0.16
Fe ₂ O ₃ [%]	0.15	0.15	0.08	0.05
Al ₂ O ₃ [%]	0.20	0.20	0.17	0.05
Mn ₃ O ₄ [%]	0.02	0.02	-	-

TABLE 2. Characteristics of cement (P) and blast furnace slag (BFS) binders

	Portland cement (P)	Blast furnace slag (BFS)
Composition (% by mass):		
CaO	62.80	38.46
SiO ₂	19.30	35.08
Al ₂ O ₃	5.10	13.47
Fe ₂ O ₃	3.10	0.51
MgO	0.80	8.50
SO ₃	3.10	0.10
Specific mass (kg/m ³)	3090	2890
Specific surface (m ² /kg)	385	440

For all mixtures, the Water- to- Binder ratio (W/B) remained constant and equals to 0.45 (by mass). Replacement percentage of cement and BFS cement was fixed to 15% in mass. Table 3 presents the ten cement slurries that have been tested.

TABLE 3. Composition of the cement slurries

Cement	Filler	Mix	Cement (%)	BF Slags (%)	Filler (%)	Water (%)
	-	P0	69	-	-	31
Portland (P)	F1	P/F1	58.50	-	10.50	31
	F2	P/F2	58.50	-	10.50	31
	F3	P/F3	58.50	-	10.50	31
	F4	P/F4	58.50	-	10.50	31
	-	BFS0	44.85	24.15	-	31
Slags (BFS)	F1	BFS/F1	38.15	20.50	10.35	31
	F2	BFS/F2	38.15	20.50	10.35	31
	F3	BFS/F3	38.15	20.50	10.35	31
	F4	BFS/F4	38.15	20.50	10.35	31

Deionized water has been used to prepare the samples at constant temperature (25±1)°C. All the samples used for conductivity test were prepared in the same way:

- mix of cement, water (limestone filler and blast furnace slag) for 3 minutes at high speed;
- fulfilling of the conductivity cells with slurries;
- registration of the temperature all along the test.

2.2 Measurement of surface free energy of liquids

Surface free energy is the result of the attraction between molecules situated in the bulk material and in the surface layer [17, 19]. Molecules in the surface layer are not submitted to the same attraction forces than in bulk material (Fig.1).

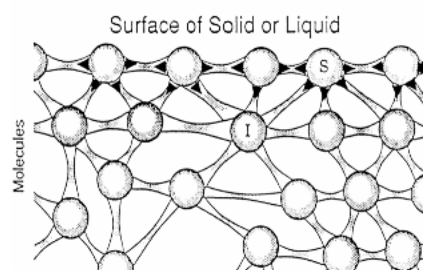


FIGURE. 1 The origin of interfacial energy

Resultant force for the surface molecules is oriented to liquid and perpendicular to the surface. The force tends to reduce the number of molecules in the surface region and to obtain minimal "free surface of liquid": this corresponds to the work necessary to surmount surface free energy (J/m² or mN/m).

In this work, a tensiometer has been used for the tests. The tensiometer is based on the measurement of the weight necessary to pull out a platinum plate or ring from the analysed liquid. The measurement is realized in a temperature regulated system, with the container for the liquid, a moving system to put into contact the ring or the plate with the liquid and a balance which continuously registers the interfacial forces between the plate or the ring and the liquid.

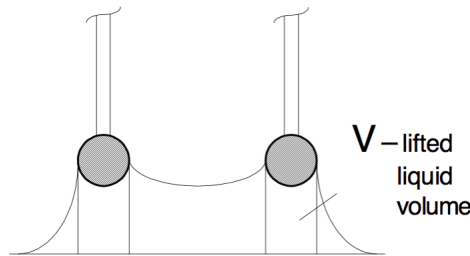


FIGURE 2. Cross section of the ring with liquid lamella.

The measurements with de Nouy's ring (Fig. 2) are done with horizontal hanging platinum ring of specific geometry; the ring is made of platinum-iridium due to good wetting properties, chemical resistance, temperature and high mechanical stability. The wetted length L_b is determined by the radius of the ring. The platinum ring is dipped into the liquid and pulled out afterwards (Fig.2). Force acting on the ring is a function of the lamella-height. The maximum force appears when the contact angle between the surface of liquid and vertical is equal to zero. Surface energy can be determined according to Eq. (1):

$$\sigma = \sigma^* \cdot F = \frac{K_{\max} \cdot F}{L_b \cdot \cos \theta}$$

where:

- σ - real surface free energy value (mN/m),
- σ^* - measured surface free energy value (mN/m),
- K_{\max} - maximum force (mN),
- L_b - wetted circumference of the ring = 120mm,
- θ - contact angle,
- F - correction factor.

A correction has however to be performed because the forces measured are always overestimated: when the ring is pulled above the level of the liquid surface, the measured force of the surface energy indeed includes the force that is created by the weight of the lifted liquid lamella (Fig.2). The correction factor can be determined according to Eq. (2):

$$F = 0.725 + \sqrt{\frac{0.01452 \cdot \sigma^*}{L_b^2 \cdot (D-d)} + 0.04534} - \frac{1.679}{r}$$

where:

L_b - the wetted length of the ring (cm),

D - the density of heavy phase (g/cm³),

d - the density of light phase (air in our case, g/cm³).

Results obtained with Ring method must take into account:

- high precision due to great wetted length;
- specific suitability for interfacial energy between two liquid phases;
- possibility of deformations larger than plate;
- disturbance of surface area during measurement.

The plate method, also known as Wilhelmy plate method, is based on the measurement of the force necessary to pull out the plate of the liquid. The testing device is a vertically hanged platinum plate with exactly known geometry. The surface of the plate is roughened to improve its wettability. The lower edge of the plate is brought into contact with the liquid surface: the liquid jumps the plate and pulls it into it. The Wilhelmy force results from the wetting. It is measured by moving up the plate to the level of the liquid surface (Fig.3). The contact angle is the angle between the tangent at the wetting line and the surface plate (Fig.3). In this case, it is assumed that contact angle is equal to zero [9]. Surface free energy is calculated according to Eq. 3:

$$\sigma = \frac{P_w}{l_w \cdot \cos\theta}$$

where :

σ – surface energy (mN/m),

P_w - Wilhelmy force (mN),

l_w - wetted length = 40mm.

In the case of the plate method there is no hydrostatic correction because there is no disturbance of surface during measurement and it presents greater mechanical stability than ring as well. The plate method is suitable for measurement of surface free energy over time and for measurement of low concentration surfactants containing solutions. It allows higher range of measurement but less precision due to plate geometry.

2.3. Evaluation of electrical conductivity and resistivity

The conductivity of solutions is measured by applying a voltage between two electrodes in a conductivity cell [4]. At any time, anions are migrating to the positive electrode and cations to the negative one. The conductivity of solutions (mS/cm) is the conductance which would be measured in a standard cell containing two ring electrodes held 3 cm from each other. The conductivity of a dilute solution is the sum of the individual contributions to conductivity of all the ions multiplied by their concentration, as conductivity is indeed directly proportional to concentration: this is the so called Kohlraush's law of independent migration [20]. The statement is that each ion contributes to the total conductivity without being affected by any other ion in solution (Eq. 4):

$$\kappa = \frac{\sum \lambda_i^\circ \cdot c_i}{1000}$$

where: κ is the measured conductivity (mS/cm), c_i is the concentration of the ions (equivalents/l) and λ_i° is the ionic limiting equivalent conductivity (Table 4), which is specific for each ion. The Conductivity Meter CDM 210 we used is able

to measure initial and maximal conductivity values and duration of the dormant period.

TABLE 4. Values of λ_i for some inorganic ions

Anions	λ_i	Cations	λ_i
OH ⁻	198	H ⁺	350
Cl ⁻	76	Na ⁺	50
SO ₄ ²⁻	80	K ⁺	74
		Ca ²⁺	60

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Surface energy

The liquid phase used for liquid surface free energies determination was obtained according to the following procedure [5]:

- mixing of water and cement (limestone fillers and blast furnace slags) for 3 minutes and dividing in 4 parts to fulfil containers of the centrifugation device;
- centrifuging for 20 minutes at 4000 rounds per min;
- collecting the centrifuged solutions (+/- 100 ml) into containers after filtration with Wathman paper nr. 41 (retention of 20-25 μm particles).

All samples were tested just after filtration. Tests are realized in thermal regulated conditions at the temperature of $(24 \pm 1)^\circ\text{C}$. The results indicate that the four Portland centrifuged solutions (P/F1, P/F2, P/F3 and P/F4) give lower surface free energy values than BFS mixes (Fig.4). Only the "pure" solution BFS0 gives lower value of surface free energy than correspondent solution with Portland cement (P0).

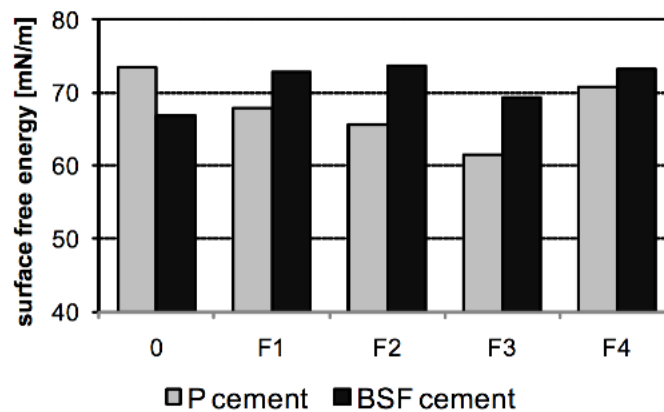


FIGURE 4. Comparison of surface free energy of slurries

The surface free energy analysis shows different behaviours between two compositions of Portland and BFS-based cement slurries in initial time. The results obtained on the Portland-based mixes are regularly lower than for BFS samples. Moreover, surface free energy was measured on two selected samples P0 and BFS0 in order to observe possible evolution of surface free energy with time. Figure 5 presents the surface free energy evolution of P0 and BFS0 mixes; the test has been performed during three weeks after preparation. Tests were realized in thermal regulated conditions at the temperature of $(24 \pm 1)^\circ\text{C}$. The initial value of surface free energy = 73.5 mN/m - is the highest; next surface free energies are decreasing. After 5 days, the surface free energy of P0 tends to a constant value around 70 mN/m, which corresponds to the surface free energy of water. For BFS0 mix, the initial value of surface energy 66.98 mN/m was the lowest; it increased afterwards up to a constant value of 72 mN/m after only 4 days. This investigation shows that surface free energy of mixes tends to surface free energy of water in a very short time.

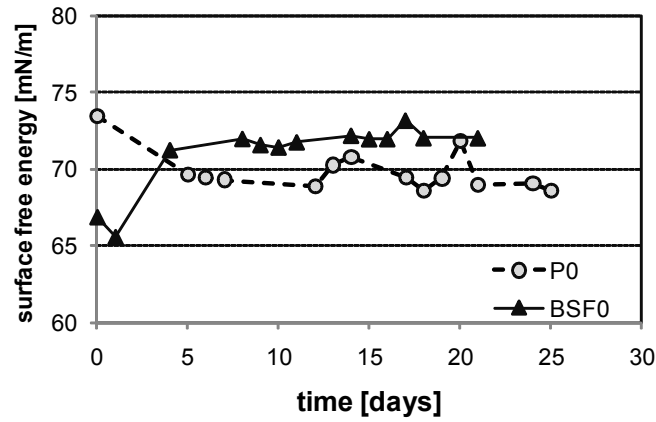


FIGURE 5. Evolution of surface energy versus time (P0 and BSF0 mixes)

Comparison of the two methods (Fig. 6) for surface free energy measurement shows quite good correlation, especially in the case of filler modified slurries. It means that each one may be used indifferently.

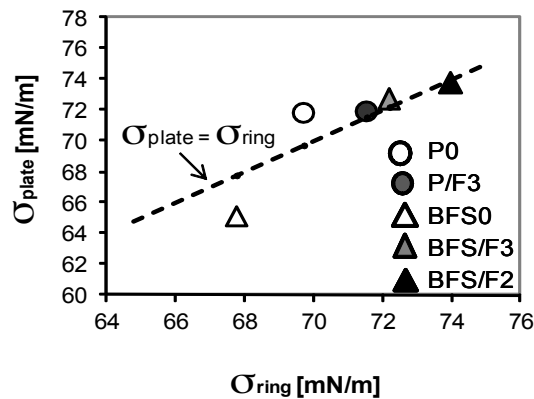
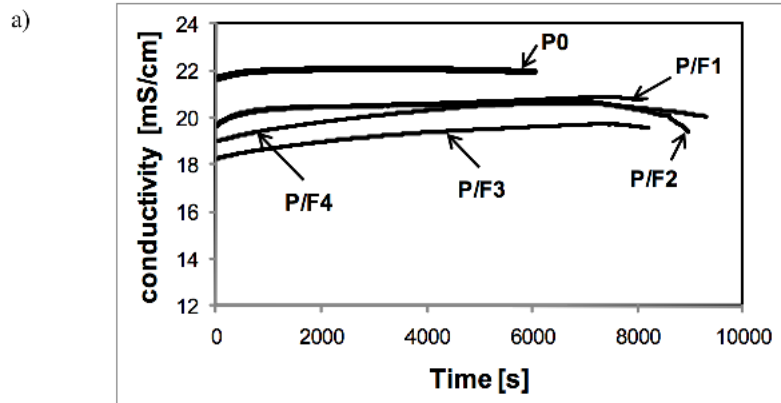


FIGURE 6. CORRELATION BETWEEN VALUE OF SURFACE FREE ENERGY OF LIQUIDS MEASURED WITH RING METHOD AND WILHELMY PLATE METHOD.

3.3. Conductivity

Because it is dependent on the ions dissolved in the solution, the measurement of electric conductivity evolution with time can give information about the hydration process. The "dormant" period is representative of the setting time: at the end of this period, the setting really begins.

The initial conductivity is measured during 8 minutes after the contact between water and cement at the temperature of $25 \pm 1^\circ\text{C}$. Maximal conductivity and beginning of the "dormant" period were also registered.



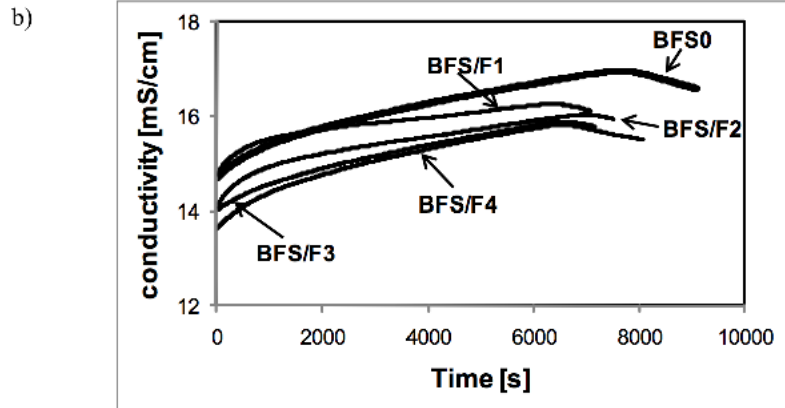


FIGURE 7. Conductivity of Portland cement slurries (a) and BFS cement-based slurries (b) modified by limestone fillers

Some specific behaviour may be pointed out with regard to the conductivity of Portland cement and BSF modified slurries (Fig. 7a and b):

- initial dissolution of clinker components and gypsum is high. The slope at the beginning (0-1000s) is high and the ions passing into solution instantaneously increase the conductivity;
- in the case of Portland cement based mixes, the lowest value of conductivity - 18.7 mS/cm is obtained for P/F3, while the highest - 22.1-mS/cm - is obtained with P0. This value is not corresponding to the initial value but the maximum value observed on the curve: it represents the initial time of the so-called "dormant period". One of the reasons of the lower value obtained for mixes with limestone is maybe related to the lower water-to-cement ratio: P0 is supersaturated with ions and reaches the maximum resistivity after one hour;
- in the case of BFS modified slurries, the conductivity is close to each other and lower in comparison to all the Portland cement-based mixes. The maximum conductivity - 16.96-mS/cm is observed for BFS0 and the lowest value of conductivity - 15.8-mS/cm - is obtained for BFS/F3 and BFS/F4;

The initial time of the dormant period significantly increases when limestone filler is added to the mix with Portland cement (Fig. 8). Moreover, the initial time of BFS0 dormant period is more than two times higher than P0, which confirms the lower activity of slags. More interesting is the effect of fillers in BFS cement-based mixes: they induce a slight decrease of the initial time dormant period, which could be attributed to the formation of carboaluminates that accelerate the setting [2, 21] but also the so-called "nucleation effect" of the small limestone particles. This effect may contribute to the increase of the speed of hydration process. The type of limestone filler does not seem to have any discriminant effect.

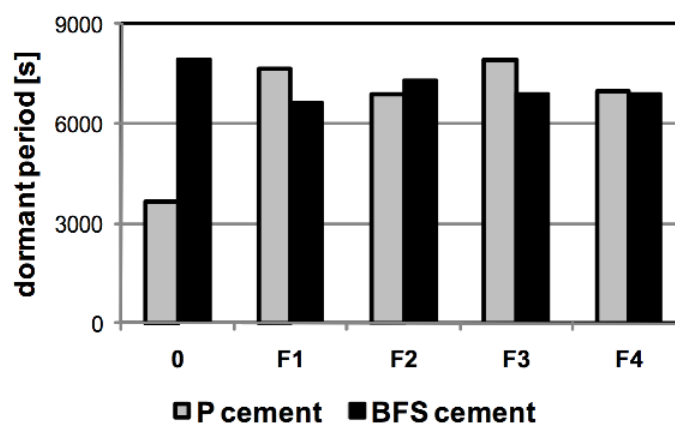


FIGURE 8. Comparison of the initial time of the dormant period for Portland (P) and blast furnace slag (BFS)-based cement slurries.

These results do not contradict previous observations where it is concluded that the reaction mechanism of the Portland cement is clearly influenced by the addition of the limestone filler: the setting time is reduced [22]. These phenomena are not found when a quartzite type filler is used in the mixes [23]. In this case, that's the initial time of the dormant period that has been measured.

4. CONCLUSIONS

The following conclusions may be reached from the investigations:

- the results obtained confirmed usefulness of surface free energy and conductivity for monitoring of early stage of cement hydration at presence of various mineral additives and/or fillers
- the results of surface energy measured with plate method are very similar to the results with the ring method, particularly in the case of filler modified solutions;
- the results showed that the surface energy is always higher for blast furnace slag cement-based solutions than for Portland cement; the time induces an increase of the surface energy for BFS solutions while a decrease for Portland cement-based mixes;
- the mixes with filler F1 gave the higher values of conductivity for Portland and BFS cement. Mixes with filler F3 gave the lower values of conductivity in Portland and BFS cement. The induction of the dormant period of pure cement mix is more than two times higher for blast furnace slag cement mix, which confirms the lower activity of blast furnace slag cement;
- the initial time of the dormant period significantly increases when limestone filler is added to Portland mixes. It confirms the effect of limestone fillers on the hydration process and the delay that can occur before attending dormant period. Positive effect of limestone fillers in this case happen during this dormant period;
- the fillers added to BFS mixes also induce a slight decrease of the dormant period, which could be attributed to the so-called "nucleation effect" of the small limestone particles, that could contribute to the increase of the hydration process.

Limestone fillers seem to be more effective in the case of BFS mixes in the very early time, i.e. before the dormant period. Literature usually indicates a positive effect of limestone fillers in reducing setting time for Portland cement mixes: the present research clearly show that this effect is not observed in the first minutes following mixing of products.

These conclusions are of course available for test conditions described here above and for the materials that have been tested. Other types of fillers (mineral and chemical compositions) could induce other types of behaviours and effects on the hydration process. Conductivity test however already gives clear indications on the effect of additives on the hydration process and the initial time of the dormant period. Moreover, surface free energy of the interstitial solutions gives us also the information of a more positive effect of the limestone fillers on electro-chemical activity of ions in the case of BFS mixes.

5. REFERENCES

1. Severinghaus, N. (1983) Fillers, filters and Absorbents in Industrial Minerals and Rocks. 5th edition (ed. S.J. Lefond. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., New York): 243-257.
2. Courard, L., Degeimbre, R., Darimont, A., Michel, F., Willem, X. and Flamant, St. (2005). Some effects of limestone fillers as a partial substitute for cement in mortar composition. ConMat'05 Third International Conference on construction materials: performance, innovations and structural implications (ed. N.

Banthia). Vancouver, Canada, (August 22-24, 2005), Theme 3-Chapter 5, 10p.

3. Meerseman, J., Descamps, P., Lucion, C., Piérard, J. and Pollet, V. (2006) Characterization of limestone fillers from Wallonia for using in concrete technology. *Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux (CBPC)* (882), 29-36 (in French).
4. Michel F. Physical characterization of limestone fillers. Master Thesis 2006. Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgium: 204p (in French).
5. Michel, F., Pirard, E. and Courard, L. Particle size distribution of limestone fillers: granulometry and morphometry investigations. *Particulate Science and Technology* (sent for publication).
6. Piérard J., Courard L. and Michel F. Durabilité des bétons additionnés de fillers calcaires. Journées scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation dans le domaine du béton, Lausanne, Suisse (28-29 septembre 2008), 10p. (in French).
7. Okamura, H., Maekawa, K. and Ozawa, K., 'High performance concrete', 1st ed., 1993, 323pp.
8. Baron, J. and Ollivier, J.-P. (1997) *Les bétons : bases et données pour leur formulation.* (ed. Eyrolles, Paris), 522pp. (in French).
9. Gallias, J.L., Kara-Ali, R. and Bigas, J.P. (2000) The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 30: 1543-1549.
10. Topcu, I. B. and Ugurlu, A. (2003) Effect of use of mineral filler on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 33: 1071-1075.
11. Heikal, M., Aiad, I. and Helmy, I.M. (2002) Portland cement clinker, granulated slag and by-pass cement dust composites, *Cement and Concrete Research*, 32 (11): 1805-1812.
12. Haque M. N., Cook D. J., Morgan D. R., The influence of admixtures on the surface energy of Portland cement paste. *Materials and structures*, 9 (4), 1976: 291-296
13. Bishnoi, S. and Scrivener, K. Optimised continuum cement hydration modelling. 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering (ed. J. Marchand, B. Bissonnette, R. Gagné, M. Jolin, F. Paradis). Québec, Canada, (September 11-13, 2006), 63-74.
14. Courard, L., Michel F. and Martin M. (2011) The evaluation of the surface free energy of liquids and solids in concrete technology. *Construction Building Materials*, 25(1): 260-266.
15. Comyn, J. (1992) Contact angles and adhesive bonding, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 12(3): 145-149.
16. Possart, W. and Kamusewitz, H. (1993). The thermodynamics and wetting of real surfaces and their relationship to adhesion, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 13(2): 77-84.
17. Courard, L. (2002) Evaluation of thermodynamic properties of concrete substrates and cement slurries modified with admixtures. *Mater. Struct.*, 35, 149-155.
18. Tumidalski, P.J. (1996) Electrical conductivity of cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 26 (4): 529-534.
19. Kinloch A.J., "Adhesion and Adhesives: science and technology" (Chapman and Hall, London, 1987).
20. Maximilien, S., Péra, J. and Chabannet, M. (1997) Study of the reactivity of clinkers by means of the conductometric test. *Cement and Concrete Research*, 27(1): 63-73.
21. Bonavetti, V.L., Rahhal, V.F. and Irassar, E.F. (2001) Studies on carboaluminate formation in limestone filler-blended cements. *Cement and Concrete Research*, 31: 853-859.
22. Heirman, G., Vandewalle, L. and Van Gemert, D. Influence of mineral additions and chemical admixtures on setting and volumetric autogenous shrinkage of SCC-equivalent mortars. 5th International

RILEM Symposium on Self Compacting Concrete (ed. G. De Schutter and V. Boël) Gent, Belgium (September 3-5, 2007), 553-558.

23. Poppe, A.M. and De Schutter, G. (2005) Cement hydration in the presence of high filler contents. *Cement and Concrete Research* 35: 2290 – 2299.

Acknowledgments

This research was financially supported by the cooperation project (2005-2007) “Development and use of self-compacting mortars for the repair of concrete infrastructures” between the Government of Poland (MNiSW) and the Regional Government of Wallonia (Wallonia-Brussels International), Belgium.

ANALIZA ŚLADU WĘGLOWEGO BETONU

Mgr inż. K. Załęgowski ^A, Dr inż Wioletta Jackiewicz-Rek ^A, Dr hab. inż Andrzej Garbacz, prof. PW ^A,
 Prof. dr inż. Luc Courard ^B

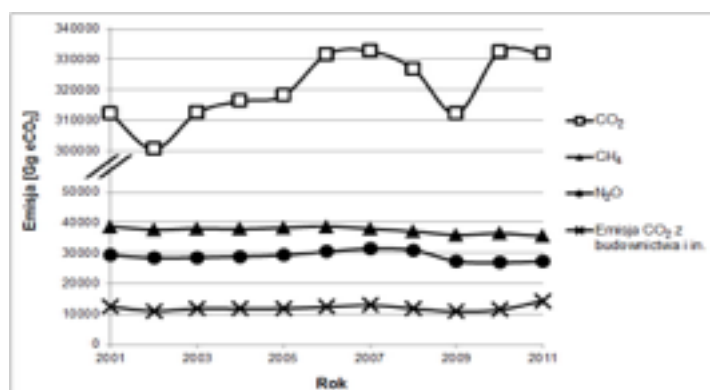
^A Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

^B Uniwersytet of Liege, ArGEnCo

1. WPROWADZENIE

Przeciwdziałanie zmianom klimatu stało się w ciągu ostatnich lat jednym z najistotniejszych elementów polityki światowej. Przyczynił się do tego wzrost średniej rocznej temperatury na Ziemi w ostatnim stuleciu o 0,7°C (1°C w Europie) oraz świadomość, że brak reakcji może doprowadzić do dalszego wzrostu nawet o 6,4°C w ciągu następnych stu lat [1]. Ilość energii słonecznej zaabsorbowanej lub wyemitowanej przez Ziemię jest modulowana przez atmosferę i zależy od jej składu. Gazy cieplarniane takie jak: para wodna, dwutlenek węgla, metan występują naturalnie w małych ilościach, efektywnie zatrzymując ciepło i będąc źródłem naturalnego efektu cieplarnianego podtrzymującego życie. Ludzka działalność powoduje zwiększenie koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze, głównie CO₂, który utrudnia emisję ciepła w przestrzeń kosmiczną, tym samym przyczyniając się do globalnego ocieplenia i zmiany klimatu.

Obecnie we wszystkich sektorach przemysłu obserwuje się dążenia do kwantyfikacji emisji gazów cieplarnianych, pozwalającej na identyfikację czynników i etapów produkcji najbardziej zanieczyszczających środowisko oraz stanowiącej pierwszy krok w kierunku wdrożenia rozwiązań redukujących emisję. Miarą wielkości emisji jest ślad węglowy (ang. carbon footprint), pojęcie definiowane przez normę ISO 14067 i „Carbon footprint of products - requirements and guidelines for quantification and communication” jako „suma emitowanych i pochłanianych przez produkt gazów cieplarnianych, wyrażana ekwiwalentem CO₂, bazująca na ocenie cyklu życia”. Ślad węglowy obejmuje, zatem oprócz emisji CO₂ - głównego źródła wzmocnienia efektu cieplarnianego, także metan – CH₄, podtlenek azotu – N₂O, fluorowęglowodory – HCFs, perfluorowodory (rys. 1).



Rys. 1. Emisja gazów cieplarnianych w Polsce: CO₂, CH₄, N₂O, CO₂ w budownictwie i innych przemysłach [2]

TABLICA 1. Ślad węglowy wytworzenia przykładowych produktów

Źródło emisji	Wielkość emisji	Źródło danych literaturowych
Energii z gazu	0,5 kg eCO ₂ /kWh	[3]
Energia z węgla	>1,0 kg eCO ₂ /kWh	[3]
Energia nuklearna	0,005 kg eCO ₂ /kWh	[3]
Energia słoneczna	0,088 kg eCO ₂ /kWh /	[4]
Energia geotermalna	0,015 - 0,053 kg eCO ₂ /kWh	[4]
Energia wiatru	0,020 - 0,096 kg eCO ₂ /kWh	[4]
Spalanie paliwa	2,3 kg eCO ₂ /l	[5]
Spalanie diesla	2,7 kg eCO ₂ /l	[5]
Produkcja chleba	0,98-1,24 kg eCO ₂ /bochenek (0,8 kg)	[6]
Produkcja butelek PET	0,096 kg eCO ₂ /butelka (0,020 kg)	[7]
Produkcja stali	1900 kg eCO ₂ /t	[8]
Wydanie The Times	0,29 kg eCO ₂ /kopię	[9]
Drewno	127 kg eCO ₂ /t	[10]

Głównym źródłem emisji gazów cieplarnianych z ludzkiej aktywności jest spalanie paliw kopalnych dla pozyskiwania energii elektrycznej, ogrzewania mieszkań i w transporcie. Z uwagi na to, największym śladem węglowym cechują się produkty, których wytworzenie jest procesem wysokoenergetycznym. Znacznie mniejszym poziomem emisji cechuje się energia pozyskana ze źródeł odnawialnych takich jak: promieniowanie słoneczne, wiatr, geotermia (tablica 1). Ważnym czynnikiem jest też transport surowców do zakładów produkcyjnych, gdyż zużycie litra paliwa uwalnia do atmosfery około 2,3 kg CO₂, natomiast litra diesla 2,7 kg CO₂. W celu ujednoczenia jednostek i rozszerzenia pojęcia śladu węglowego na pozostałe gazy wprowadzono termin ekwiwalent dwutlenku węgla (eCO₂). Jest to miara metryczna, określana dla danego gazu w wyniku pomnożenia masy tego gazu przez odpowiedni dla niego wskaźnik potencjału tworzenia efektu cieplarnianego (ang. Global Warming Potential, GWP, tablica 2). Przykładowo dla podtlenku azotu N₂O GWP wynosi 310, więc emisja 1 mln ton N₂O odpowiada 310 mln ton CO₂.

TABLICA 2. Wartości wskaźnika GWP dla głównych gazów cieplarnianych [11]

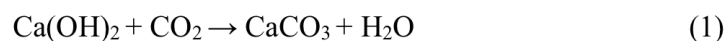
	GWP
Dwutlenek węgla CO ₂	1
Metan CH ₄	21
Podtlenek azotu N ₂ O	310
Fluorowęglowodory HCFs	124 – 14800
Perfluorowęglowodory PFCs	7390 – 12200
Sześć fluork siarki SF ₆	22800

2. OBLICZANIE ŚLADU WĘGLOWEGO BETONU

Rozważania dotyczące emisji gazów cieplarnianych oraz działań na rzecz zrównoważonego rozwoju nie ominęły przemysłu budowlanego. Istotnym źródłem emisji gazów cieplarnianych w tym sektorze jest najszerzej stosowany i najczęściej używany materiał na świecie – beton. Przygotowanie mieszanki betonu zwykłego zanieczyszcza atmosferę ziemską o 140 – 310 kg CO₂ ekw./t. Jest to wartość kilkukrotnie mniejsza niż w przypadku produkcji stali (~1900 kg CO₂ ekw./t) [10]. Wpływ betonu na środowisko naturalne przybiera na znaczeniu przy uwzględnieniu ogromnej ilości tego materiału produkowanych rocznie na świecie – ponad 3,8 bln m³ [12].

Obliczanie śladu węglowego betonu opiera się na analizie cyklu życia, obejmującej najczęściej wydobycie i przygotowanie surowców, ich transport do betonowni, przygotowanie mieszanki betonowej, kończąc na jej transporcie na plac budowy [13]. Proces powinien być bardziej kompleksowym, uwzględniającym również etap użytkowania oraz tzw. drugie życie betonu, okres po eksploatacji, czyli rozbiórkę i ewentualne ponowne użycie.

Istotną kwestią, rzadko podejmowaną w ekologicznych debatach o materiałach na bazie cementu jest sekwestracja CO₂ następująca w procesie zwanym karbonatyzacją. W wyniku ekspozycji na powietrze, beton absorbuje atmosferyczny CO₂, który reaguje z wolnym wodorotlenkiem wapnia Ca(OH)₂ dając węglan wapnia CaCO₃:



Wpływ karbonatyzacji na ogólny bilans CO₂ w cyklu życia betonu jest marginalny. Powodem jest mała głębokość absorpcji CO₂ i mała powierzchnia betonu w konstrukcji. Według Woyciechowskiego i Jackiewicz-Rek wiadukt betonowy o objętości 62 m³ może pochłonąć 450 kg CO₂ [14]. Sekwestracja CO₂ na ośmiokrotnie wyższym poziomie zachodzi w czasie drugiego życia betonu, gdyż po rozbiórce obiektu wzrasta wielkość powierzchni eksponowanej na działanie powietrza.

Brak jednolitego podejścia przy określaniu śladu węglowego jest powodem rozbieżności uzyskiwanych wyników. Dowodzi tego tablica 3, przedstawiająca zmiany wielkości emisji CO₂ w zależności od liczby źródeł uwzględnionych przez autorów przy obliczaniu śladu węglowego. Według Marceau [17] przy produkcji betonu o wytrzymałości na ściskanie 35 MPa uwalnia 313 kg CO₂/m³ (tablica 3, pozycja 1), natomiast zdaniem Wcisło i Kuniczuka [13] beton o wytrzymałości niższej jedynie o 5 MPa i zawierający popiół lotny (tablica 3, pozycja 9) emituje o 54 kg CO₂/m³ więcej. Nie uwzględnili oni jednak emisji związanej z magazynowaniem składników betonu, transportu paliwa oraz eksploatacji betoniarni. Występujące różnice mogłyby być także spowodowane nie uwzględnieniem efektu stosowania domieszek, których produkcja i transport zostały wzięte pod uwagę w obliczeniach Wcisło i Kuniczuka. Udział domieszek wydaje się jednak mało istotny, gdyż są one dodawane do mieszanki betonowej w małych ilościach (do 5% masy cementu) i ich wpływ na środowisko można oszacować jako 220 kg CO₂/t [19]. Autorzy przeanalizowanych publikacji nie brali pod uwagę zmian CO₂ zachodzących w procesie karbonatyzacji i „drugim życiu betonu”.

Kruszywo (drobne i grube), popiół lotny, czy woda mogą stanowić do 90% masy mieszanki betonowej, jednakże wydobycie i rozdrobnienie materiałów kamiennych, mieszanie składników, czy transport materiałów lub mieszanki na budowę wymagają małych ilości energii i emitują relatywnie małe ilości CO₂ – odpowiednio 5,4; 1,5; 0,9 kg CO₂/t [18]. Czynnikiem determinującym stopień oddziaływania betonu na środowisko jest udział cementu w mieszance betonowej. Produkcja klinkieru portlandzkiego jest procesem wysokoemisyjnym - 700 kg CO₂/t cementu [20], wymaga po pierwsze dużych ilości energii do kalcynacji węglanu wapnia zachodzącej w temperaturze dochodzącej do 1500°C, a po drugie produktem ubocznym wypalania obok tlenku wapnia jest CO₂ [21].

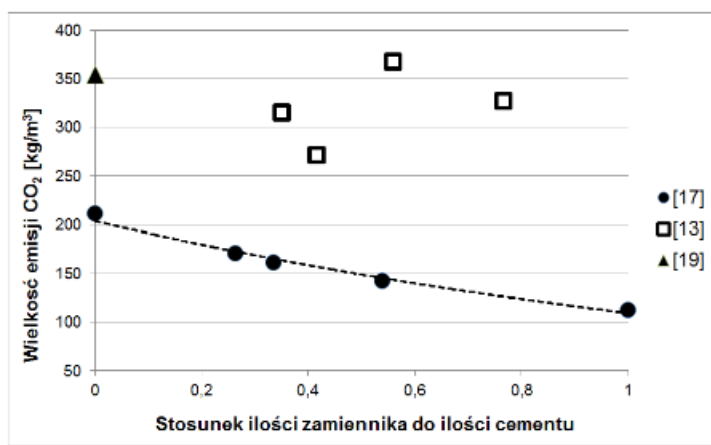
Wysoki poziom emisji CO₂ przy produkcji cementu potwierdzają dane przedstawione w tablicy 3 i na rys. 3, z których wynika, że redukcja ilości cementu w mieszance betonowej powoduje prawie liniowy spadek ilości CO₂ oddawanego do atmosfery przez beton. W roli substytutów cementu stosowane są np.: popiół lotny, żużel wielkopiecowy, mikrokrzemionka [22]. Są to materiały odpadowe powstające w procesie spalania węgla kamiennego w elektrowni, wytopiania rudy żelaza, czy produkcji krzemu i żelazokrzemu, zatem źródłem emisji w tym przypadku jest jedynie ich transport do betonowni.

Coraz powszechniej stosowanym sposobem otrzymywania bardziej korzystnego ekwiwalentu CO₂ betonu jest używanie domieszek upłynniających (superplastyfikatorów), które umożliwiają obniżenie zawartości wody zarobowej w mieszance betonowej, a tym samym pozwalają na redukcję ilości cementu przy zachowaniu odpowiedniego stosunku wodno-cementowego i konsystencji.

TABLICA 3. Emisja CO₂ w zależności od uwzględnionych źródeł emisji

ŹRÓDŁA EMISJI CO ₂																						
L.p.	f _{cm} [MPa]	SKŁAD BETONU [m ³]	CEMENT			KRUSZYWO			WODA	DODATKI		DOM-IESZKI		PALIWA		EKSPLOATACJA BETONIARNI	BETON			KARBONATYZACJA	"DRUGIE ŻYCIE BETONU"	ŁĄCZNA EMISJA CO ₂ [kg/m ³]
			PRODUKCJA	TRANSPORT	MAGAZYNOWANIE I PODAWANIE	PRODUKCJA	TRANSPORT	MAGAZYNOWANIE I PODAWANIE	TRANSPORT	POPIÓŁ LOTNY - TRANSPORT	ŻUŻEL WIELKOPIECOWY - TRANSPORT	PRODUKCJA	TRANSPORT	PRODUKCJA	TRANSPORT		PRZYGOTOWANIE MIESZANKI	TRANSPORT NA BUDOWĘ	UKŁADANIE I WYKOŃCZENIE			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	35	Cement - 335 kg, woda - 141 kg, kruszywo - 1899 kg [17]	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	313
2	25	Cement - 279 kg, woda - 141 kg, kruszywo - 1958 kg [17]	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	262
3	20	Cement - 223 kg, woda - 141 kg, kruszywo - 1958 kg [17]	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	211
4	20	Cement - 179 kg, popiół lotny - 44 kg, woda - 141 kg, kruszywo - 1958 kg [17]	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	171
5	20	CEMENT - 167 KG, POPIÓŁ LOTNY - 56 KG, WODA - 141 KG, KRUSZYWO - 1958 KG [17]	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	161
6	20	CEMENT - 145 KG, ŻUŻEL WIELKOPIECOWY - 78 KG, WODA - 141 KG, KRUSZYWO - 1958 KG [17]	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	142
7	20	CEMENT - 112 KG, ŻUŻEL WIELKOPIECOWY - 112 KG, WODA - 141 KG, KRUSZYWO - 1958 KG [17]	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	112
8	25	CEMENT 300 KG, POPIÓŁ 230 KG, KRUSZYWO 1547 KG, PŁASTYFIKATOR 0,88; SUPERPŁASTYFIKATOR 2,51; WODA 160 KG [13]	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	327
9	30	CEMENT 340 KG, POPIÓŁ 190 KG, KRUSZYWO 1647 KG, PŁASTYFIKATOR 0,81; SUPERPŁASTYFIKATOR 2,34; WODA 160 KG [13]	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	367

		ŹRÓDŁA EMISJI CO ₂																				
L.p.	f _{cm} [MPa]	SKŁAD BETONU [m ³]	CEMENT			KRUSZYWO			WODA	DODATKI		DOM-IESZKI		PALIWA		EKSPLOATACJA BETONIARNI	BETON			ŁĄCZNA EMISJA CO ₂ [kg/m ³]		
			PRODUKCJA	TRANSPORT	MAGAZYNOWANIE I PODAWANIE	PRODUKCJA	TRANSPORT	MAGAZYNOWANIE I PODAWANIE	TRANSPORT	POPIÓŁ LOTNY - TRANSPORT	ŻUŻEL WIELKOPIECOWY - TRANSPORT	PRODUKCJA	TRANSPORT	PRODUKCJA	TRANSPORT		PRZYGOTOWANIE MIESZANKI	TRANSPORT NA BUDOWĘ	UKŁADANIE I WYKOŃCZENIE		KARBONATYZACJA	"DRUGIE ŻYCIE BETONU"
10	25	CEMENT 240 KG, POPIÓŁ 100 KG, KRUSZYWO 1786 KG, STABILIZATOR 0,28; SUPERPLASTYFIKATOR 2,25; WODA 170 KG [13]	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	271
11	30	CEMENT 285 KG, POPIÓŁ 100 KG, KRUSZYWO 1760 KG, STABILIZATOR 0,27; SUPERPLASTYFIKATOR 2,24; WODA 170 KG [13]	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	315
12	40	CEMENT – 328 KG, KRUSZYWO – 2023 KG, WODA – 190 KG [19]	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	-	-	+	-	+	+	+	-	-	354

 Rys. 3. Zależność emisji CO₂ od stosunku ilości zamiennika (popiół lotny, żużel wielkopiecowy) do ilości cementu


Do wciąż rozwijanych sposobów mających na celu redukcję śladu węglowego betonu zaliczyć można: stosowanie spoiw na bazie geopolimerów (zastosowanie ich w produkcji betonu według Turnera pozwoli na co najmniej 10% redukcję emisji CO₂ [19]) wychwytywanie CO₂ ze spalania paliw [23][24], i dekompozycji węgla wapnia w cementowniach [25], czy sekwestrację CO₂ w prefabrykacjach betonowych [26] itd.

3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Podejście do określania śladu węglowego betonu powinno stać się bardziej kompleksowe i uwzględniać „główne życie” (pozyskiwanie surowców, ich transport, produkcję materiału, transport na plac budowy, układanie itp.), „drugie życie” (rozbiórka i ewentualny recykling), a także sekwestrację CO₂ w procesie karbonatyzacji. Dokładne zdefiniowanie warunków obliczania śladu węglowego jest konieczne w celu umożliwienia kalkulacji

i porównać śladów węglowych różnych betonów na drodze poszukiwań jak największych redukcji CO₂ w przemyśle betonowym. Pomocne może być to również w opracowywanych coraz powszechniej kalkulatorach emisji CO₂.

4. LITERATURA

1. Zmiana klimatu i środowisko naturalne, Dokumenty informacyjne o Unii Europejskiej 2013
2. Krajowy Raport Inwentaryzacyjny – Inwentaryzacja gazów cieplarnianych w Polsce dla lat 1988-2011, Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami, 2013
3. Carbon Footprint of Electricity Generation, Parliamentary Office of Science and Technology 268, 2006
4. Carbon Footprint of Electricity Generation, Parliamentary Office of Science and Technology 383, 2011
5. <http://www.environment.gov.au>
6. Espinoza-Orias N., Stichnothe H., Azapagic A.: The carbon footprint of bread, The International Journal of Life Cycle Assessment Volume 16, Issue 4, 2011, s. 351-365
7. Griffin S.: The toxic footprint of PET - bottled water in British Columbia, A raport prepared for toxic free Canada, 2009
8. Kundak M., Lazić L., Crnko J.: CO₂ emissions in the steel industry, Metalurgia 48, 2009, s. 193-197
9. Abbott J.: What is a Carbon Footprint?, Report - The Edinburgh Centre for Carbon Management, 2008
10. Concrete CO2 fact sheet, National ready Mixed Concrete Association, 2012
11. Wasilewski M.: Wprowadzenie do zagadnienia metodyki wyliczania carbon footprint, Podsumowanie seminarium Ministerstwa Gospodarki i CSRIinfo, 2009
12. www.cement.org/basics/concretebasics_lessonone.asp
13. Wcisło A., Kuniczuk K.: Eco-SCC, Green-SCC – ekonomiczna i ekologiczna alternatywa dla betonów samozagęszczalnych, Dni Betonu, Wisła, październik 2012,
14. Woyciechowski P., Jackiewicz-Rek W.: Ecological aspects of concrete carbonation, Central European Congress on Concrete Engineering, 2013
15. <http://www.polskicement.pl>
16. <http://www.ermco.eu>
17. Marceau M.L., Nisbet M.A., VanGeem M.G.: Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete, Portland Cement Association, 2007
18. Cement and Concrete Institute, Concrete Industry, Greenhouse Gas Emissions, InEnergy, 2010
19. Turner L.K., Collins F.C.: Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolimer and OPC cement concrete, Construction and Building Materials 43, 2013, s. 125-130
20. Uliasz-Bocheńczyk A., Mokrzycki E.: Emisja dwutlenku węgla w przemyśle cementowym, Polityka Energetyczna t. 6, 2003, s. 367-375
21. The concrete conundrum, Chemistry World, 2008, s. 62-66
22. Park J., Tae S., Kim T.: Life cycle CO₂ assessment of concrete by compressive strength on construction site in Korea, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 2012, s. 2940-2946
23. Hoenig V.; Hoppe H., Emberger B.: Carbon Capture Technology - Options and Potentials for the Cement Industry, European Cement Research Academy, 2007
24. Baker D.J. Turner S.A., Napier-Moore P.A., Clark M., Davison J.E.: CO₂ capture in the cement industry, Energy Procedia 1, 2009, s. 87-94

25. Rodriguez N., Alonso M., Grasa G., Abanades J.C.: Process for capturing CO₂ arising from the calcination of the CaCO₃ used in cement manufacture, *Environmental Science and Technology* 42, 2008, s. 6980-6984
26. Hamilton T.A.: Concrete fix to global warming - A new process stores carbon dioxide in precast concrete. *Technology review – a publication of MIT*, 2008
27. Lee S., Park W., Lee H.: Life cycle CO₂ assessment method for concrete using CO₂ balance and suggestion to decrease LCCO₂ of concrete in South-Korean apartment. *Energy and Buildings* 2013, 58, s. 93–102

Artykuł przygotowano w ramach realizacji pracy statutowej WIL PW nr 504P 1088 1307.

SYMPOSIUM PROGRAM

Raw materials in the circular economy (KEYNOTE LECTURE) <i>Eric PIRARD (ULg, BEL)</i>	52
Recycled and bio-based materials for sustainable constructions <i>Luc COURARD (ULg, BEL)</i>	54
Vision 2020: an integrated initiative for concrete repair towards sustainability <i>Benoit BISSONNETTE (Laval University, CAN)</i>	55
Utilization of waste mineral powders as components of Cement-Polymer Composites <i>Paweł ŁUKOWSKI, Joanna J. SOKOŁOWSKA, Beata JAWORSKA (WUT, PL), Waldemar PICHÓR (AGH, PL)</i>	57
Low carbon footprint cements <i>Zbigniew Giergiczny (Silesian University of Technology, Górażdże Cement Group, PL)</i>	59
Sustainable diagnosis of historical building objects <i>Wojciech TERLIKOWSKI, Andrzej GARBACZ (WUT, PL)</i>	61
Sustainability vs legal requirements <i>Robert GERYŁO (ITB, POL)</i>	62
Sustainable pavements <i>Igor RUTTMAR (TPA, POL)</i>	63

UNDER AUSPICES OF:

Deputy Prime Minister, Minister of Science and Higher Education Jarosław GOWIN

Delegate of the Wallonia - Brussels Federation Franck PEZZA

Rector Magnificus of Warsaw University of Technology Professor Jan SZMIDT

MEDIA PARTNERS:



RAW MATERIALS IN THE CIRCULAR ECONOMY

Prof. Eric Pirard, Université de Liège

Despite the fact that it is more than four and a half billion years old, our planet is extremely dynamic. Next to the astronomic cycle perceptible through seasonal changes and next to the violent shocks generated by earthquakes and volcanic eruptions, there is a permanent movement of decomposition and recomposition affecting not only the biosphere but also the geosphere. Surface waters percolate through the substratum, warm up and become enriched in heavy metals while at the same time rocks are enriched in aluminium or nickel through surface alteration.

“Nothing gets lost, nothing is created, everything is transformed” as Anaxagore already stated in 500 BC. The geological cycle is imperceptible and often invisible but it is responsible for the formation of exceptional mineral concentrations. These are the one we call deposits.

Since the dawn of times, men have exploited mineral deposits to satisfy their needs. Quite logically, they extracted the most valuable and most accessible parts of a deposit, just like a spoiled child would pick the cherry from the cake. We are left today with large pieces of cake, but they are less attractive. In other words, there are still plenty of mineral resources but they are less and less rich and more and more difficult to access.

It is improper to say that mining is a sustainable activity as it consists in extracting material and altering the environment. This being said, because nothing is lost, it is more important to consider in our reasoning what raw materials become after having been removed from the earth crust. When one succeeds in extracting gold out of four tons of ore (at 1 g/t) to make a ring, it is fair to say that this gold is still available for future generations. On the contrary, when the same gold is being used to manufacture malaria tests... or electronic components one can reasonably question the diffusion within the environment and the non-availability for future generations. The same holds when a ton of coal is being burned to get 5 grams of germanium which are amply sufficient to manufacture 350 km of optical fibre. Not to mention gallium being used in the trendy LED lighting devices and indium being a key element of our flat screen technology.

Another explicit example, is the usage we make of river sand to manufacture high-performance concrete that could be very durable but will, often for simple esthetical reasons, not exceed a fifty years lifetime. The sand grains have not dissapeared but no known process is able to recover them from concrete with economic benefit. The only alternative is to make new sand from crushing massive rock material but this is one of the most energy-intensive processes. Energy and materials are closely correlated in a never ending dilemma!

All these examples are there to illustrate that if we want to speak about circular economy or in other words the idea that end-of-life products (waste) can be useful resources for new manufacturing processes, it is key to act in a concerted manner at all levels of the raw materials value chain. Material selection, assemblage techniques and product design are essential parameters that we will need to reconsider if we aim at increasing the recyclability of our products. The building sector is a key area for innovation because of the enormous volumes of material that are being handled and because of the possibility to act on construction techniques. At the other end, the electronic goods make use of limited quantities but require critical metals and tend to privilege nanomaterials and inextricable microcomponents.

Our engineering schools have the mission to educate a new generation of engineers who will, beyond the silos of traditional disciplines (Mining, Metallurgy, Construction, Mechanics,...), be capable of considering the whole material value chain and establishing a dialogue among professionals to really progress towards a sustainable use of our resources.

RAW MATERIALS IN THE CIRCULAR ECONOMY

Prof. Eric Pirard, Université de Liège

Malgré ses quatre milliards d'années, notre planète est extrêmement dynamique. Au-delà de son cycle astronomique qui se manifeste par l'alternance des saisons et au-delà des épisodes de soubresauts violents que sont les tremblements de terre ou les éruptions volcaniques, il y a une dynamique perpétuelle de décomposition et de recomposition qui affecte non seulement la biosphère, mais également la géosphère. Dans notre sous-sol des eaux s'infiltrant, se réchauffent et entraînent des métaux lourds tandis qu'en surface des roches s'altèrent et s'enrichissent en aluminium ou en nickel. « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme » disait déjà Anaxagore au V^{ème} siècle avant Jésus-Christ. Ce cycle géologique imperceptible et souvent invisible est celui qui a permis à des concentrations minérales exceptionnelles de se former. C'est ce que nous appelons aujourd'hui les gisements.

Depuis la nuit des temps, l'homme a exploité ces concentrations minérales pour satisfaire à ses besoins. Très logiquement, il a pris ce qui était le plus facile à prendre, un peu comme l'enfant gâté prendrait la cerise qui est sur le gâteau. Il reste aujourd'hui de grandes parts de gâteau, mais elles sont moins attractives. Autrement dit, il reste énormément de ressources mais elles sont de moins en moins riches et de plus en plus difficile d'accès.

Il est erroné de dire que l'exploitation des mines est une activité durable puisque que par essence elle consiste à extraire la matière et à altérer l'environnement. Ceci étant dit, puisque rien ne se perd, il est plus important d'intégrer dans le raisonnement de développement durable le devenir des matières premières que nous avons extraites du sous-sol. Quand on parvient à extraire de l'or de quatre tonnes de roches (à 1g/t) pour en faire une bague, on a contribué à rendre cet or plus accessible aux générations futures. En revanche, quand on utilise cet or pour fabriquer un test de malaria... ou des composants électroniques on peut s'interroger sur la dispersion environnementale de l'or. Ainsi, lorsque l'on brûle une tonne de charbon pour obtenir 5g de germanium qui suffiront largement pour la fabrication de 350 km de fibre optique, on peut aussi s'interroger sur la dispersion environnementale et la non-disponibilité pour les générations futures. C'est exactement ce qui se passe aujourd'hui avec l'utilisation du gallium dans l'éclairage LED ou de l'indium dans les GSM.

Tout aussi explicite est l'utilisation que nous faisons du sable de nos rivières pour la fabrication de bétons qui pourraient être très durables, mais qui pour des raisons souvent simplement d'esthétique architecturale ne dépasseront pas une durée de vie de cinquante ans. Le sable n'a pas disparu mais aucun procédé connu ne permet de l'extraire du béton dans des conditions économiquement rentables. La seule alternative consiste dès lors à fabriquer du sable en broyant des roches massives ce qui est l'un des procédés les plus gourmands en énergie. Qu'on le veuille ou non, les dilemmes de l'énergie et des matières premières sont étroitement corrélés !

Ces quelques exemples nous montrent bien que si nous voulons parler d'économie circulaire, c-à-d de l'idée que les produits en fin de vie (déchets) peuvent être des ressources utiles pour de nouveaux procédés de fabrication il est indispensable d'agir de manière concertée à différents niveaux du cycle de production. Le choix des matériaux, les techniques d'assemblage et le design des produits sont des paramètres essentiels à reconsidérer si nous voulons que les produits de demain soient plus recyclables. Le secteur de la construction est un enjeu essentiel en raison des volumes de matière qu'il mobilise et de la possibilité d'agir concrètement sur les techniques de construction. A l'autre bout, le secteur de l'électronique se contente de quantités plus faibles mais mobilise des métaux rares et privilégie les nanomatériaux ou les microcomposants inextricables.

Nos écoles doivent former de nouvelles générations d'ingénieurs qui au-delà du clivage traditionnel des disciplines (Mines, Métallurgie, Construction, Mécanique,...) doivent être capables d'envisager le cycle de la matière, d'établir un dialogue entre les métiers et de nous faire progresser vers une utilisation réellement durable de nos ressources.

RECYCLED AND BIO-BASED MATERIALS FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION

Luc Courard, University of Liège, Department of Architecture, Geology, Environment and Constructions

Recycling is not a luxury or a fashion but a necessity that comes from a very simple fact: we live in a limited world. Contrary to what we have believed for a long time, our human activity is not infinitely expandable but limited in terms of energy, natural resources, space or simply adaptation capacity of nature. From this finding and that awareness must result a behavior that essentially is based on the respect we have for ourselves and therefore for nature (to take care and not to convert).

Recycling, reuse, re-use, regeneration or recovery are behaviors that aim to minimize the energy used, to take maximum advantage of the material and to reduce the risk of pollution during the manufacture, use or disposal of these materials. In general, this means that it is desired to delay as much as possible when an object becomes waste. This requires a vision of the life of material or object (Life Cycle Assessment), in which a balance sheet is prepared at every stage of life - from raw material extraction, manufacturing, processing, recycling and elimination.

Additionally to materials known as "natural" or "bio-based", the construction industry increasingly incorporates these alternative materials, even if not without some psychological, normative and technical reservations. As a significant source of pollution (CO₂, solid waste, ...), construction is a major reservoir for recovery of waste and industrial by-products: alongside the traditional production process of construction materials and the resurgence of bio-based materials, recycled materials also contribute to the development of materials for future.

MATÉRIAUX RECYCLÉS ET BIO-SOURCÉS POUR UNE CONSTRUCTION DURABLE

Luc Courard, Université de Liège, Département d'Architecture, Géologie, Environnement et Constructions

Le recyclage n'est pas un luxe ou une mode mais une nécessité, qui provient d'une constatation fort simple : nous vivons dans un monde limité. Contrairement à ce que nous avons cru fort longtemps, notre activité humaine n'est pas infiniment développable, car bornée en termes d'énergie, de ressources naturelles, d'espace ou simplement de capacité d'adaptation de la nature. De cette constatation et de cette prise de conscience doit découler un comportement qui, essentiellement, est basé sur le respect que nous avons de nous-mêmes et donc de la nature (à ménager et non à aménager).

Le recyclage, la réutilisation, le réemploi, la régénération ou la valorisation sont des comportements qui visent à minimiser l'énergie utilisée, à tirer un parti maximum des matériaux, à réduire les risques de pollution au moment de la fabrication, de l'utilisation ou de l'élimination de ces matériaux. D'une manière générale, cela signifie que l'on cherche à retarder le plus possible le moment où un objet devient un déchet. Cette démarche nécessite une vision d'ensemble de la vie du matériau ou de l'objet (Analyse du Cycle de Vie), au cours de laquelle un bilan est établi à chaque étape de vie - extraction des matières premières, fabrication, transformation, recyclage, élimination.

Complémentairement aux matériaux dits « naturels » ou d'origine végétale, l'industrie de la construction intègre de plus en plus ces matériaux alternatifs, non sans quelques réticences psychologiques, normatives et techniques. Source de pollution importante (CO₂, déchets solides, ..), la construction constitue aussi un réservoir majeur pour la valorisation de déchets et de sous-produits industriels : à côté de la filière traditionnelle de production des matériaux de construction et de la résurgence des matériaux bio-sourcés, les matériaux recyclés contribuent également au développement des matériaux du futur.

VISION 2020: AN INTEGRATED INITIATIVE FOR CONCRETE REPAIR TOWARDS SUSTAINABILITY

B. Bissonnette, CRIB, Département Génie Civil, Université Laval, Québec, QC, Canada

Ten years ago, the annual cost to owners for repair, protection, and strengthening was estimated to be of the order of \$20 billion in the U.S. alone. The result is a repair industry that supports engineers, architects, equipment suppliers, material manufacturers, researchers, educators, testing companies, contractors, and lawyers. The explosive growth of the industry in the past three decades has resulted in the need for many improvements in materials, design practices, installation procedures, contracting processes, QA/QC procedures, education, and more. These improvements are needed to improve service life, to reduce costs and conflicts, and ultimately, to ensure sustainability of our concrete infrastructure.

What is Vision 2020?

In 2004, North American concrete repair industry leaders came together to develop an industry-wide strategic plan (Vision 2020). The Strategic Development Council (SDC), an inter-industry development group dedicated to supporting the concrete industry's strategic needs, facilitated Vision 2020 at the request of the concrete repair and protection industry.

The purpose of Vision 2020 was to establish a set of goals to improve the efficiency, safety, and quality of concrete repair and protection activities. By focusing on the most important industry goals, it is hoped that the repair industry will achieve these goals faster than if the industry is left to evolve on its own. The focus on goals for repair is also related to the major issue of sustainability, because extending the useful life of existing installations is a key factor in producing a sustainable environment. Over 100 North American industry leaders, including contractors, engineers, material manufacturers, researchers, educators, owners, and industry association executives participated in focused workshops to define the most important industry issues and needs used to establish the goals in Vision 2020.

As part of the "visioning" process, each goal has been road-mapped to establish strategies and action plans. A major part of the road-mapping task was to critically examine the suggested dates by which completion of strategies related to the goals could be reasonably expected, and then to construct a timetable of goals. The timetable is needed because many goals are dependent on achieving other goals; thus the timetable will help to define the order in which goals must be achieved.

Industry leadership teams will use the Vision 2020 documents (Goals and Roadmaps) to guide industry activities by prioritizing efforts and resources to the established goals and action plans. Research and materials organizations will use the established needs to prioritize research and development projects. Contractors and engineers will use this document to better understand the current state of the concrete repair industry and develop ideas for implementation of industry envisioned improvements. Owners will understand that we take our industry very seriously and will use these tools to help them understand their structures and continued investments in repair and protection.

Why do we need a vision?

A vision provides a glimpse of the future state of the industry. If most key people in the repair industry believe that no improvements are necessary, and that there are no significant problems to solve, their vision would result in a future state of the industry no different than what we see today. That is actually not the case. Repair industry leaders have spoken in the Vision 2020 workshops, and they envision a great need for improvement. These improvements include reducing repair mistakes, miscalculations, poor performance, and poor workmanship, and finding better repair methodologies that reduce costs while improving quality. This vision, and the goals related to achieving it, became the basis for moving forward and helping industry organizations, research establishments, and educational institutions to accelerate progress in the repair industry.

Unified vision and goals

The diverse concrete repair and protection industry have recognized the importance of a unified vision. In developing Vision 2020, leaders throughout the North American industry have described the desired state of the industry by 2020. They have identified potential breakthroughs in materials, equipment, industry cooperation, research and funding, professional practice, design methodology, environmental impact, workforce supply, and owner education. They realized that creating an accurate and attainable vision, establishing goals, and seeing the goals completed will require a strong effort, but they also believe this effort would significantly advance the industry by improving repair quality, reducing repair cost, and enhancing the safety of workers and the public. All of these results will directly contribute to enhance the image of the industry and encourage increased owner investment in repair and protection of their structures by providing a more cost-effective product.

Industry leaders have categorized Vision 2020 into 15 key goals, including specific strategies. These are presented herein without order of preference.

1. Promote repair industry cooperation;
2. Accelerate the publication of repair industry documents;
3. Create a code of practice for concrete repair and rehabilitation;
4. Develop adapted specifications for repair and rehabilitation;
5. Improve repair materials;
6. Develop environment- and user-friendly repair materials and methods;
7. Develop tools to predict the performance of repaired structure;
8. Establish a research clearing house;
9. Educate and train repair professionals;
10. Improve repair project relationships;
11. Educate owners;
12. Improve knowledge and techniques for accurate infrastructure assessment;
13. Develop specific repair technologies;
14. Improve the branding and promotion of concrete repair industry;
15. Ensure sustainability of concrete repair.

The presentation will provide an update of the progress accomplished so far towards each of these ambitious goals.

UTILIZATION OF WASTE MINERAL POWDERS AS COMPONENTS OF CONCRETE-POLYMER COMPOSITES

Paweł Łukowski, Joanna J. Sokołowska, Beata Jaworska - Warsaw University of Technology, Warsaw

Waldemar Pichór - AGH University of Science and Technology, Cracow

Utilization of the waste materials for production of building composites is required by sustainable development in construction. One of such wastes is fly ash, used over the years in production of cement and concrete. The need for utilization of the other waste materials, like perlite powder, has also appeared. The ways of rational use of such by-products were the subject of the research project, financed by the National Centre for Research and Development, recently carried out together by Warsaw University of Technology and AGH University of Science and Technology.

Fly ash (Fig. 1, left) is a by-product of coal burning in energetic plants. Perlite powder (Fig. 1, right) is created during the treatment of natural perlite, which is a material of volcanic origin, used in construction as a light aggregate, a component of thermo-insulating plasters and mortars or acoustic insulations, etc. Perlite powder has bulk density about 100 kg/m³, which makes it very difficult to storage and re-processing.

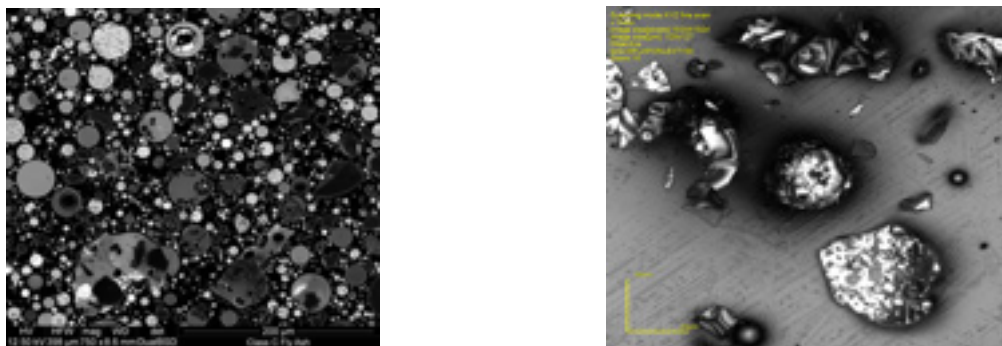


Fig. 1. Microscopic images of siliceous fly ash (left) and perlite powder (right)

The research presented here is focused on the possibility of utilization of mineral waste powders – fly ashes and perlite – for the production of polymer-cement and resin composites.

The polymer-cement composites (PCC) are the materials, in which the polymer creates an interpenetrating network with cement matrix; co-operation of these two binders brings the improvement of flexural and tensile strength, adhesion to various substrates and tightness. Fly ash is a pozzolanic material and the perlite has some pozzolanic ability, too. Therefore, they can be introduced into PCC as a partial substitute of cement (Fig. 2).

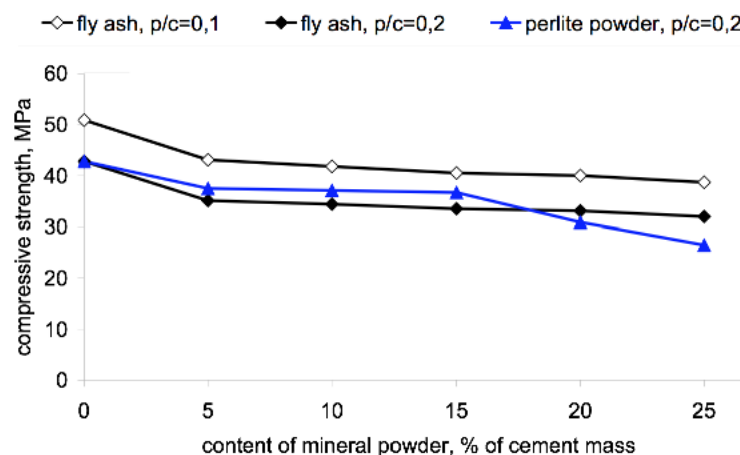


Fig. 2. Compressive strength of polymer-cement mortars containing various amounts of waste powders at constant level of polymer to cement (p/c) ratio by mass

Polymer, or resin, composites (PC) are the materials consisting of the resin binder and the aggregate, without any mineral binder. They have high mechanical strength and chemical resistance. Since no water is used for PC production, the pozzolanic properties of the waste powders are not useful there. However, they can be utilized as partial substitutes for the microfiller, the finest fraction of the aggregate used in PC (Fig. 3). The considered waste powders would be much cheaper alternative for usually used quartz powder.

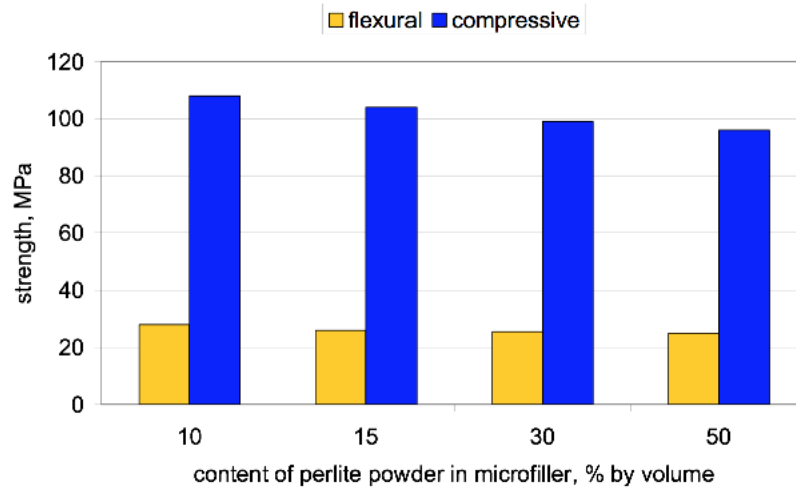


FIG. 3. Flexural and compressive strength of PC containing various volumes of perlite powder in microfiller at constant resin to aggregate ratio and resin to microfiller ratio

The results of the investigation show that the mineral waste powders, like fly ash and perlite powder, cause only slight decrease in the mechanical properties of PCC and PC. Therefore, under some conditions they can be utilized as components of these materials. Further tests are necessary, however, for establishing the basis for the rational designing and use of such materials.

LOW CARBON FOOTPRINT CEMENTS

Zbigniew Giergiczny, Politechnika Śląska, Góraźdże Cement S.A.

The production process of cement is directly correlated with the energy and raw materials consumption. While producing one tone of cement, 600-700 kg CO₂ is being emitted to the atmosphere. It is so, because cement production requires a lot of energy - not only the heat energy but also the electric one - and whilst chemical reactions occur, the CO₂, that was bonded in the materials (mainly in limestone), is being released. In the global scale, cement production represents about 5% of anthropogenic CO₂ emission.

In order to decrease Green House Gases emission (especially CO₂), European as well as National cement industry is taking several actions to make the negative influence of the cement production as insignificant as possible - i.e.: sustainable raw materials management. Taken actions lead to the alternative fuel usage, to replacing raw materials with by-waste materials in the production process of cement clinker (ideally after thermal treatment), and to increased production and usage of cements with lowered cement clinker quantity such as (CEM II ÷ CEM V) and with increased amount of the industrial byproducts such as ground granulated blast furnace slag, fly ashes or ground limestone fillers.

During different activities the population produces significant amounts of waste, which contain combustible particles - this applies to both municipal and industrial waste. Energy acquisition from by-waste materials is still the most underestimated source of the energy. The rational use of this energy source would bring many advantages not only to economy but also to environment. Lately, national cement industry has been more and more open-minded when it comes to the co-combustion of the alternative fuels, reaching the ratio of the alternative fuels of almost 46% (fig. 1). Biomass, which is contained in sewage sludge and has zero CO₂ emission, is being used more and more often in green energy production.

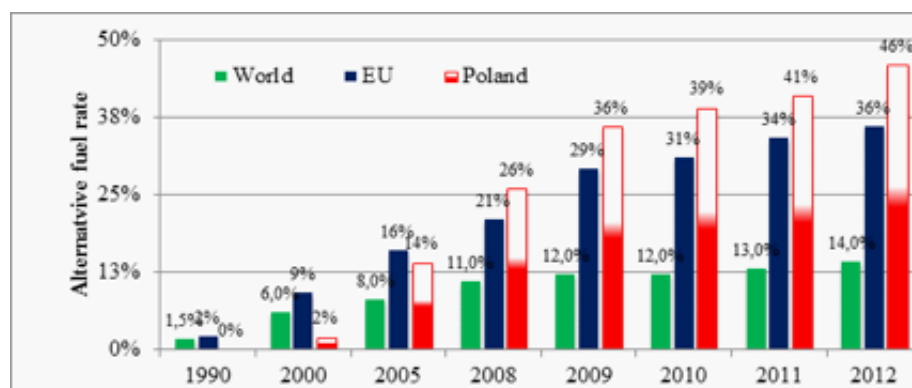


FIG. 1. Alternative fuels usage in national cement industry compared to the world and UE

Development of cement production with additions (CEM II÷CEMV according to EN197-1) is a significant action that has to be taken in order to decrease the GHG emission. Most commonly used additions in Polish National cement industry are granulated ground blasted slag, siliceous fly ashes and limestone fillers. The components mentioned above, differ in the terms of their activity, especially after grinding. Development of different grinding technologies allows the production of cements, with different additions, to maintain the high strength class in 32.5N(R), 42.5N(R) and 52.5N(R), therefore, these cements can be used in any construction field - from ordinary and special concrete production to prefabricated and modern concrete production. They can be use in the road industry as well as in the bridge construction. Cements with the high mineral additions content (CEM III/A,B and CEM V/A,B) are irreplaceable in the construction of massive structures and structures that are exposed to chemical aggressive compounds. In table 1, the offer of national cement industry is being presented and in the figure 2 the content of clinker in the cement composition can be observed.

TABLE 1. National cement industry offer

Portland cement CEM I	CEM I 32,5R; CEM I 32,5R-NA CEM I 42,5R; CEM I 42,5N-NA; CEM I 42,5R-NA; CEM I 42N-HSR/NA; CEM I 42,5R-HSR/NA;CEM I 42,5R-MSR/NA; CEM I 52,5R; CEM I 52,5R-NA; CEM I 52,5N-HSR/NA
Portland-composite cement CEM II/A,B	CEM II/B-V 32,5R; CEM II-B-V 32,5R-HSR CEM II/B-S 32,5R-NA; CEM II/A-LL 32,5R CEM II/B-M(V-LL) 32,5R; CEM II/B-M(S-V) 32,5R CEM II/B-M(V-W) 32,5R;CEM II/A-S 42,5R; CEM II/B-S 42,5N-NA;CEM II/B-S 42,5R; CEM II/A-V 42,5N; CEM II/A-V 42,5R; CEM II/B-V 42,5N; CEM II/B-M(S-V) 42,5N; CEM II/B-M(V-LL) 42,5R;CEM II/A-LL 42,5N-NA CEM II/A-M(S-LL) 52,5N; CEM II/A-S 52,5N
Blast furnace cement CEM III/A,B	CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA CEM III/A 42,5N; CEM III/A 42,5N-HSR/NA CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA, CEM III/B 42,5L-SR/NA/LH; CEM III/A 52,5N-NA
Pozzolan cement CEM IV/A,B	CEM IV/B (V) 32,5R-LH/HSR; CEM IV/B (W) 32,5N
Composite cement CEM V/A,B	CEM V/A (S-V) 32,5R-LH

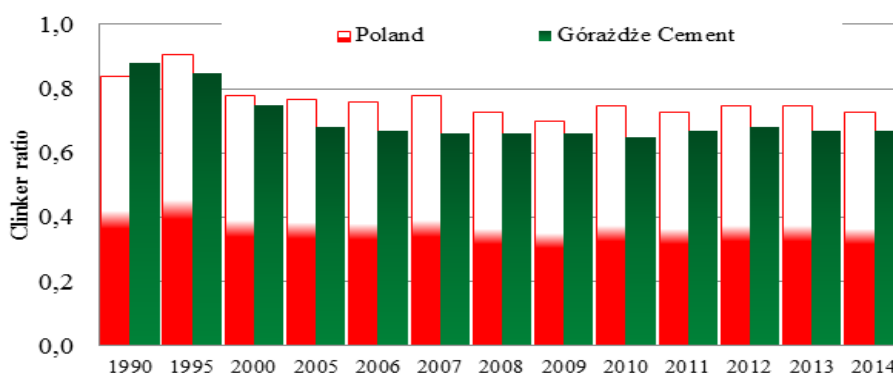


Fig. 2. Clinker ration in national cement industry

National cement industry applies rational and cost-efficient compounds management for raw materials. In Portland clinker and cement production a significant amount of the alternative fuels is being used, obtained from the combusted waste materials. It offers the high quality cements with the lowered clinker content to the building industry. This results in the significant decrease of the CO₂ emission, sustainable management of wastes and by-products as well as decrease of raw materials usage.

SUSTAINABLE DIAGNOSIS OF HISTORICAL BUILDING OBJECTS

Wojciech TERLIKOWSKI, Andrzej GARBACZ, Warsaw University of Technology

Diagnosis is necessary step of any repair of building object. While in the case of “ordinary” concrete structures it is relatively easy to carried out, a diagnosis of historical objects is much more complicated. This is due to that historical buildings in addition to the measurable material values result among others in the technical condition of the building, the location, the aesthetic value, have also added value in the form of cultural or historical one, which are often part of the cultural heritage of local, regional, or global level. Revitalized and re-used historical buildings, reconstitute or create a new feature, can be a source of economic recovery. Not-used historic buildings accelerate (or start) the process of degradation and leads to the degradation of the environment and the natural environment located around the building.

According to current regulations rehabilitated historic building should meet the same basic technical requirements, which the newly designed building. This implies the need to adapt the structure of the building, the architectural design, equipment and installation of the building to the suitable technical requirements, which are associated with the acceptable comfort of use. Diagnostic of historic buildings, should take into account interdisciplinary diagnostics. It covers diagnostics commonly used in the classical approach. However, looking through the principles of sustainable development, implying interdisciplinary revitalization process, use extended diagnostics - balanced, which can reveal a number of issues beyond technical, finally affecting the achievement of the objectives of revitalization.

In very general terms, the ability to a revitalization can bring to estimate the value of the many features, defining the technical condition of the building, in terms of technical and construction, as well as the characteristics resulting from the approach taking into account the principles of sustainable development. Overall assessment carried out can give an estimate of the ability of revitalization, revealing in the process of assessing the strengths and weaknesses of the revitalized building. The developed algorithm of assessment of the revitalized historic buildings, included approx. 100 parameters in 8 main groups of issues, which is run diagnostics interdisciplinary. In the process of determining the ability of the person building the revitalization of these characteristics and conditions referred to the assessment scale (e.g., 0 to 5). The result of the analysis is obtained from the result point, which implies assessment (tabl.1). Apart from the result point are given relevant information from the analysis.

TABLE 1. Evaluation of the ability to a revitalization

No.	Number of points	Rating	evaluation
1	0 - 40	Not satisfactory	Revitalization not recommended
2	40 - 60	Satisfactory	Revitalization difficult (some problems can appear)
3	60 - 80	High	Revitalization recommended
4	80 - 100	Very high	Revitalization with high probability of success

Above approach will be recently validated for building located in the Warsaw Praga district in the framework of cooperation with city of Warsaw.

SUSTAINABILITY VS. LEGAL REQUIREMENTS

Robert Geryło, Instytut Techniki Budowlanej

The Constitution of the Republic of Poland of 1997, in Article 5 states that The Republic of Poland shall (...) ensure the protection of the natural environment pursuant to the principles of sustainable development. As the EU member state, Poland has introduced harmonized provisions, including requirements, relating not only to safety of buildings and other construction works but also to energy economy, protection of the environment, economic aspects, and other important aspects in the public interest. According to Polish building regulations and the national plan for increasing the number of nearly zero-energy buildings, by 31 December 2020 all new buildings will have to meet nearly zero energy performance requirements, set with a view to achieving the cost-optimal level which means the energy performance which leads to the lowest cost during the estimated economic lifecycle. The total cost is determined taking into account energy-related investments, maintenance and operating costs, energy costs, earnings from energy produced and disposal costs.

Laws, regulations, administrative measures and assessment systems concerning construction works have an impact on the requirements of construction products. According to European Construction Product Regulation No 305/2011 (CPR) construction works must satisfy basic requirements for construction works for an economically reasonable working life. Three of them are directly 'sustainable-related': BR3 - Hygiene, health and the environment, BR6 - Energy economy and heat retention and BR7 - Sustainable use of natural resources. Where applicable, the declaration of performance should be accompanied by information on the content of hazardous substances in the construction product in order facilitate the development of environment-friendly products. The sustainability of buildings and construction works, their integrated design and assessment should be based on the multidimensional optimization of the performances (energy, indoor comfort, etc.) which takes into account life cycle costs and life cycle environmental impacts.

The placing on the market of a construction product which is covered by a harmonised standard or for which a European Technical Assessment (ETA) or European Assessment Document (EAD) has been issued should be accompanied by a declaration of performance in relation to the essential characteristics of the construction product in accordance with the relevant harmonised technical specifications. ITB as the European Technical Assessment Body, the member of European Organisation for Technical Assessment has issued more than 300 ETA's and more than 100 EAD's for innovative construction products.

Since the sustainable development requirements become a particularly current necessity, ITB has been involved in development of international standards for sustainability of construction works (CEN TC 350) and the implementation of assessment methodology. ITB by this activity supports a formal process of Environmental Product Declarations implementation on the Polish market and support construction industry in developing sustainable building products based on renewables. ITB EPD Program (established in 2004) provides the procedure for EPD Type III development in accordance to the requirements of PN EN ISO 14025 and PN-EN 15804. ITB EPD is a technical information that provides quantifiable environmental data for construction products with a specified technical function. ITB EPD enables to analyse the life cycle of products with regard to their environmental impacts and the use of natural resources. The highest quality of EPD Program was proved by third party verification (ECO Platform audits). The EPD Program covers all construction products as it is defined in Annex IV of CPR.

SUSTAINABLE PAVEMENTS

Dr. Igor Ruttmar, TPA Technical Research Institute

Sustainability is a journey, not a destination. There is still no clear classification on definition sustainable pavements. However, there was a lot of implementation in road structures. The author describes the sustainable design solutions applied to pavement structure in Poland such as exposed aggregate concrete pavement, mastic asphalt paving on bridge, pavement with asphalt-rubber binder and the perpetual asphalt pavement.

Exposed aggregate concrete pavements

Exposed aggregate concrete (EAC), is characterized by specific treatment of the pavement surface, placed in two technological layers. Application of dual-layer system of plain concrete pavement enabled to optimise the recipe of concrete for upper and bottom layer (different content of cement and quality of aggregate). Sustainable road construction using EAC guarantees better durability, higher and long-lasting safety due to improved skid resistance, furthermore contributes to better driving comfort and positive environmental effect due to noise reduction. Additionally the intensively dowelled slabs, which improve the load transfer over transverse joints, have also positive influence on longitudinal pavement evenness. Finally, the next contribution to comfort and safety is to be assumed because of minimising of traffic diversions and limitations due to less necessity of maintenance works related with usual improvement of skid resistance in time. Pavement was designed to meet the high expectations on safety and comfortable exploitation of the concession motorway over the next more than 30 years, using performance concept and assuming minimal maintenance costs.

Mastic asphalt bridge pavements

The bridge structure pavements made of mastic asphalt are characterized by high stiffness which provide the protection against permanent deformations in high temperatures, as well as high elasticity in low temperatures minimizing the risk of cracking. High technological rigor resulting of using of profiled trackway and the paver with integrated spreader of hot aggregate gives the perceptible comfort and safety of the user's driving. The natural tightness of mastic asphalt layers in connection with modern spraying insulation made of PMMA are probably the best insulation-pavement system protecting against water penetration into the bridge structure. The high asphalt content in asphalt mix affect to higher durability of pavement, and using of polymer modified asphalt together with additives reducing the production temperature, provide the resistance to permanent deformations. Using of mastic asphalt for protection layer and wearing course allows for double protection of insulation and bridge structure, at the same time extending the durability of wearing course for the time of using longer than 20 years without necessity of any major maintaining works.

Pavements with asphalt-rubber binder

Pavements with rubber modified asphalt from the used tires are characterized by high fatigue durability, resistance for reflected cracking, low-temperature cracking, rutting and aging. Using of properly grained mixes with rubber modified asphalts it is possible to build the durable „quiet pavements“, characterized by low noisiness in relation to standard technologies. Additionally, such a pavements are characterized by higher friction coefficient between the tire and the pavement, which resulting in reducing of braking distance. The pavements of asphalt- rubber binder are also more economical in relation to pavements with road asphalts and polymer modified asphalts.

Perpetual asphalt pavements

Perpetual pavement means that pavement will be designed to withstand at least 50 years trafficking and no heavy (structural) maintenance will be required. Only renewing of the wearing course will regularly take a place. At the bottom of asphalt layers, at the place of tensile strain occurrence, so called anti-fatigue course with high fatigue resistance, has to be designed (figure 1). Underneath the pavement surface, in the zone of high compression and shear stresses there is, the course with high resistance to deformation and resistance to low temperature cracking (depending on the climate) has to be designed. This will minimize the permanent deformation occurrence, such as rutting and risk of low temperature cracking.



FIGURE1. Idea of perpetual asphalt pavement structure, application on S8 express way

The above presented technological solutions are the examples of sustainable pavements. These are the pavements, which are characterized by high durability and life period, which minimize the costs of exploitation and maintenance, during the whole investment life calculated using LCCA method. Performance pavement design enabled to apply materials according to their “usefulness” and “compatibility” eliminating wasting of natural resources. We possess wide range of solutions and technologies, but it is necessary that the road administration have to force it into practice to make sustainability a strategic priority in all areas of pavement design, materials and construction.

Avec
le soutien de la



Wallonie



Ministry of Science
and Higher Education

Republic of Poland

