

Les 10 ans de coopération entre la Politechnika Warszawska (Université Technique de Varsovie) et l'Université de Liège reposent sur une longue tradition : lorsque le Professeur Kazimierz Gamski émigra de sa terre natale et fut nommé à l'Université de Liège, il eut à cœur de promouvoir les échanges entre nos deux universités. Les vicissitudes de l'histoire n'ont pas toujours, comme aujourd'hui, facilité les échanges est-ouest. L'intelligence humaine est toutefois parvenue à surmonter les obstacles et les murs. C'est vraiment à partir de 2000 que les deux groupes de recherche, avec l'appui de leurs gouvernements respectifs et le support des Professeurs Lech Czarnecki et Robert Degeimbre, ont effectivement commencé à développer des projets de recherche en commun et à échanger étudiants, chercheurs et enseignants. Période féconde s'il en est puisque plusieurs fois par an, nous nous sommes rencontrés pour travailler, rédiger, mesurer, ... mais aussi créer un réseau amical et sympathique entre nos groupes de recherche, terreau indispensable à l'approfondissement de nos connaissances intellectuelles mais aussi humaines.

Car le secret du succès de notre collaboration réside avant tout sur cette reconnaissance mutuelle que nous avons besoin l'un de l'autre pour progresser, comprendre, évoluer. Nous avons, ensemble, participé à des congrès et publié dans des revues internationales, organisé un symposium à Varsovie en 2005 et des réunions internationales d'experts pour la RILEM et l'American Concrete Institute à Liège en 2007 et à Varsovie en 2009. Ce sont les signes tangibles de l'importance que revêt, à nos yeux, cette collaboration.

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

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

10 lat współpracy między Politechniką Warszawską i Uniwersytetem w Liege oparte jest na długoletniej tradycji: kiedy w latach siedemdziesiątych profesor Kazimierz Gamski wyemigrował z ojczyzny i został powołany na profesora na Uniwersytecie w Liege, miał w sercu wspieranie wymiany między naszymi uczelniami. Obecna edycja współpracy została podjęta w roku 2000 na wniosek strony belgijskiej w ramach 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*. Owocny okres współpracy trwa do dziś; kilka razy w roku, spotkamy się by redagować publikacje, prowadzić pomiary, ... obecnie staramy się kontynuować te działania aby tworzyć sieć znajomości i przyjaźni między naszymi zespołami badawczymi, która umożliwi pogłębienie zarówno naszej wiedzy jak również znajomości naszych krajów. Sekret sukcesu naszej współpracy jest przede wszystkim wzajemne zrozumienie, że musimy razem wzrastać, rozumieć i rozwijać się. Wspólnie uczestniczymy w kongresach i wspólnie publikujemy w międzynarodowych czasopismach. Zorganizowaliśmy symposium w Warszawie w 2005 roku, międzynarodowe spotkania ekspertów RILEM i American Concrete Institute w Liege w 2007 i w Warszawie w 2009 roku. To są, naszym zdaniem, namacalne oznaki naszej obopólnie korzystnej współpracy.

Jeśli celem uczelni jest poszukiwanie wiedzy w celu lepszego zrozumienia świata i rzeczy, oczywiste jest, że nasza wymiana myśli i nasza wspólna praca przyczyniła się do sformułowania większej ilości pytań niż udzielonych odpowiedzi: mimo to cel współpracy został spełniony! Rozważania te znajdują się w komunikatach, publikacjach i doniesieniach, których listę przytaczamy poniżej.

Mamy nadzieję, że podczas lektury tej monografii, będzie można docenić zarówno to co już zrobiliśmy, ale także z optymizmem patrzeć na drogę, która została do pokonania....

Professeur Luc Courard
Université de Liège

Profesor Andrzej Garbacz,
Politechnika Warszawska

LES MEMBRES ACTIFS DE LA COLLABORATION

L. Czarnecki, R. Degeimbre, B. Chmielevska, T. Piotrowski, S. Perkowicz, M. Gorka, P. Harassek, A. Darimont, G. Moczulski, St. Flamant, A. Van der Wielen, D. Schwall, F. Michel, F. Nguyen, A. Garbacz, L. Courard

LES DISTINCTIONS

- Prix du Ministère des Transports et des Constructions de la République de Pologne, pour l'encadrement par les Dr. A. GARBACZ et Dr. L. COURARD, du Master de T. PIOTROWSKI, intitulé *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, Professeur Honoraire à la Faculté d'Ingénierie Civile de l'Université Technique de Varsovie (2008)

LES PROGRAMMES DE COOPERATION

Les échanges ont eu lieu grâce au soutien financier du Gouvernement de la République de Pologne et de Wallonie-Bruxelles International. Nous tenons à les remercier pour la confiance qu'ils ont témoignée en soutenant nos projets.

- *Programme de coopération Wallonie-Bruxelles/Pologne (2010-2012) : Méthodes non destructives pour le contrôle des éco-matériaux utilisés pour la réparation des infrastructures*
- Programme de coopération Wallonie-Bruxelles/Pologne (2008-2009) : Comparaison, analyse et développements mathématiques relatifs aux techniques d'impact-echo and de geo-radar pour l'auscultation des liants à matrices cimentaires.
- Programme de coopération Wallonie-Bruxelles/Pologne (2005-2007) : Développement et emploi de mortiers auto-compactants pour l'entretien et la réparation des infrastructures en béton.
- Programme de coopération Wallonie-Bruxelles/Pologne (2003-2005) : Caractérisation de la surface du béton et de l'adhésion des produits de réparation au moyen de méthodes destructives et non destructives.
- Programme de coopération Wallonie-Bruxelles/Pologne (2002-2003) : Etude des mécanismes et caractérisation de l'adhésion des produits de réparation au moyen de méthodes destructives et non destructives.
- Visite de travail en 2000-2001 : Conditions de développement de l'adhérence des réparations et évaluation des infrastructures.

Avec le soutien des Gouvernements de Wallonie et de la République de Pologne

CHAPITRE DE LIVRE

- Evaluation and quality assessment of industrial floors (chapter 4). RILEM TC 184 – IFE Industrial floors for withstanding environmental attacks, including repair and maintenance. Co-ordinator: L. Courard – Authors: L. Courard, A. Garbacz (Poland) and L. Wolff (Germany). Rilem Report 33 (Ed. P. Seidler, Rilem Publication), pp.59-89 (August 2006).
- Testing procedures and other regulations (chapter 6). RILEM TC 184 – IFE Industrial floors for withstanding environmental attacks, including repair and maintenance. Co-ordinator: A. Zajc – Authors: A. Zajc (Slovenja), L. Courard, A. Garbacz (Poland) and L. Wolff (Germany). Rilem Report 33 (Ed. P. Seidler, Rilem Publication), pp.101-109 (August 2006).

ARTICLE DANS LIVRE

- Znaczenie inżynierii powierzchni w naprawach betonu (Concrete Surfology importance for repair), Garbacz A., Courard L., Piotrowski T., Współczesne metody naprawcze w obiektach budowlanych (Ed. M.Kamiński, J.Jasiczak, W.Buczowski, T.Błaszczkowski), Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2009, pp.59-76
- Concrete surface roughness characterization by means of opto-morphology technique. L. Courard, D. Schwall and T. Piotrowski. Monography: Adhesion in Interfaces of Building Materials: a Multi-Scale Approach (AMSR Advances in Material Science and Restoration, Eds. L. Czarnecki and A. Garbacz, Aedificio Publishers), 2007, pp.107-116.
- On the effect of concrete surface roughness on stress wave propagation in repair systems. T. Piotrowski, A. Garbacz, D. Schwall and L. Courard. Monography: Adhesion in Interfaces of Building Materials: a Multi-Scale Approach (AMSR Advances in Material Science and Restoration, Eds. L. Czarnecki and A. Garbacz, Aedificio Publishers), 2007, pp.247-257.

ARTICLE DANS REVUE SCIENTIFIQUE AVEC COMITE DE LECTURE

- *Saturation level of the superficial zone of concrete and adhesion of repair systems.* L. Courard, J. F. Lenaers, F. Michel and A. Garbacz. *Construction and Building Materials*. (under revision).
- *Effects of limestone fillers on the properties of the interstitial solutions of cement mixes.* F. Michel, S. Perkowicz, L. Courard and A. Garbacz. *Cement, Lime and Concrete* (sent for publication).
- Surfology: what does it mean for polymer concrete composites? L. Courard and A. Garbacz. *Restoration of Buildings and Monuments* **16** (4/5) (2010) pp.1-12.
- On the relation between bond quality and impact-echo frequency spectrum. T. Piotrowski, A. van der Wielen, F. Nguyen, A. Garbacz, L. Courard. *Restoration of Buildings and Monuments* (..) 2010, (article in press).
- Characterization of concrete surface roughness and its relation to adhesion in repair systems. A. Garbacz, L. Courard and K. Kostana. *Mater. Charact.*, **56** (2006) pp.281-289.
- Effect of concrete surface treatment on adhesion in repair systems, A. Garbacz, M. Gorka and L. Courard. *Mag. Concrete Res.*, **57**(1) (2005) pp.49-60.

ARTICLE DANS REVUE SANS COMITE DE LECTURE

- Ocena skuteczności napraw – wpływ jakości podkładu betonowego. L. Czarnecki, A. Garbacz and L. Courard. *Inżynieria Budownictwo*, **12** (2007) pp.630-634.
- Inżynieria powierzchni betonu. Część 3. Termodynamiczne uwarunkowania adhezji. L. Courard, A. Garbacz and T. Piotrowski. *Materiały Budowlane*, **2** (2007) pp.6-7.
- Inżynieria powierzchni betonu. Część 2. Wpływ obróbki na powstawanie rys. L. Courard, A. Garbacz, T. Piotrowski and A. Nieweglonska-Mazurkiewicz. *Materiały Budowlane*, **12** (2006) pp. 8-11.
- Inżynieria powierzchni betonu. Część 1. Struktura geometryczna powierzchni. L. Courard, A. Garbacz, and T. Piotrowski. *Materiały Budowlane*, **9** (2006) pp.3-7.

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

- On the relation between bond quality and impact-echo frequency spectrum. T. Piotrowski, A. van der Wielen, F. Nguyen, A. Garbacz, L. Courard. 13th International Congress on Polymers in Concrete (Ed. J. B. Aguiar, S. Jalali, A. Camoes and R. M. Ferreira), 10-12 February 2010, Madeira, Portugal, pp.373-380.
- Surfology: what does it mean for polymer concrete composites? L. Courard and A. Garbacz. 13th International Congress on Polymers in Concrete (Ed. J. B. Aguiar, S. Jalali, A. Camoes and R. M. Ferreira), 10-12 February 2010, Madeira, Portugal, pp.355-362.
- The effect of concrete substrate quality towards evaluation of repair system using impact-echo method. A. Garbacz, T. Piotrowski, L. Kwaśniewski, L. Courard, F. Michel. In: Theoretical foundations of civil engineering, (eds. W. E. Szczesniak and A. Zbiciak, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej), Sept. 2009, Warsaw, Poland, pp.581-588.
- Surfology: concrete substrate evaluation prior to repair. L. Courard, F. Michel, D. Schwall, A. Van der Wielen, A. Garbacz and T. Piotrowski, F. Perez and B. Bissonnette. Materials Characterization: computational methods and experiments IV (eds. A. Mammoli and C.A. Brebbia, Wessex Institute of Technology Press). The New Forest (U.K.), 17-19 June, 2009, pp.407-16.
- Evaluation of the effect of load eccentricity on pull-off strength. G. Moczulski, A. Garbacz and L. Courard. ICCRRR08 International Congress on Concrete Repair, Reinforcement and Retrofitting, (Alexander et al (eds), 2009 Taylor & Francis Group, London), Cape Town (2008), pp.1017-22.
- Effects of concrete surface quality on repair mortars. L. Courard, A. Garbacz and T. Piotrowski. CCC 2008 Challenges for civil construction (Torres Marques et al., Eds), FEUP, Porto (2008).
- A Analysis of stress wave propagation in repair systems using wavelet approach. A. Garbacz, T. Piotrowski and L. Courard. In: RILEM PRO 51 (CD): 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering (Ed. J. Marchand, B. Bissonnette, R. Gagne, M. Jolin, F. Paradis), Quebec, Canada, September 2006.
- Effect of concrete substrate texture on the adhesion properties of PCC repair mortar. L. Courard, A. Garbacz, D. Schwall and T. Piotrowski. In: ISPIC, International Symposium on Polymers in Concrete (Eds. J. Barroso de Aguiar, S. Jalali, A. Camoes and R. M. Ferreira), Guimaraès, Portugal (2-4 April 2006), pp.99-110.
- Relationship between surface characteristics and superficial cohesion of concrete. A. Garbacz, M. Gorka and L. Courard. In: ICCRRR 2005 International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (Eds. H. Beushausen, F. Dehn and M.G. Alexander, 2006 Taylor & Francis Group, London), Cape Town, South Africa (21-23 Nov. 2005), pp.1021-1026.
- Two different techniques for the evaluation of concrete surface roughness. F. Perez, L. Courard, B. Bissonnette, A. Garbacz and M. Gorka. In: ICCRRR 2005 International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (Eds. H. Beushausen, F. Dehn and M.G. Alexander, 2006 Taylor & Francis Group, London), Cape Town, South Africa (21-23 Nov. 2005), pp.1015-1020.
- On the characterization of concrete surface roughness and its relation to adhesion in repair systems. A. Garbacz, K. Kostana and L. Courard. 9th ECIAS European Congress on Stereology and Image Analysis (Eds J. Chraponski, J. Cwajna and L. Wojnar), Zakopane, Poland, (May 10-13, 2005), pp.56-64.
- Concrete surface treatments quantification by means of mechanical profilometry. L. Courard, A. Garbacz and M. Gorka. in: ICPIC, XIth International Congress on Polymers in Concrete (Ed. M. Maultzsch, Federal Institute for Materials Research and Testing), Berlin, Germany (2-4 June 2004), pp.125-132.

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

- Diagnostyka konstrukcji betonowych za pomocą impact-echo i radaru. A. Garbacz , P. Harassek, A. van der Wielen ,T. Piotrowski, L. Courard, F. Nguyen. Polish Concrete Day, 2010.
- Some theoretical and practical considerations about surface preparation of concrete and adhesion of repair systems. L. Courard, A. Garbacz and T. Piotrowski. 16th Slovenski kolokvij o betonih, Ljubljana, Slovénie (27 mai 2009), pp.19-28.
- Durabilité des réparations de béton : entre théorie et pratique. L. Courard et A. Garbacz. Journées scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation dans le domaine du béton, Toulouse, France (19-20 juin 2006), pp.167-191.
- Paramètres interfaciaux et environnementaux affectant la durabilité des travaux de réparation / Interfacial and Environmental Parameters Affecting Durability of Repair Works. L. Courard. Sympozjum Polsko-Walońskie/Symposium Pologne – Wallonie/Poland - Wallonia Symposium“Trendy w inżynierii materiałów budowlanych”/„Trends in building materials engineering” Warsaw, April 12th, 2005, 11p.
- Concrete surface treatments quantification by means of mechanical profilometry and relationship with adhesion of concrete. L. Courard and A. Garbacz. Sympozjum Polsko-Walońskie/Symposium Pologne – Wallonie/Poland - Wallonia Symposium“Trendy w inżynierii materiałów budowlanych”/ „Trends in building materials engineering” Warsaw, April 12th, 2005, 10p.
- 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. R. Degeimbre, J. Wiertz et L. Courard. Sympozjum Polsko-Walońskie/Symposium Pologne – Wallonie/Poland - Wallonia Symposium“Trendy w inżynierii materiałów budowlanych”/„Trends in building materials engineering” Warsaw, April 12th, 2005, 7p.
- Réparations des bétons avec un mortier auto-compactant: méthodologie et expérience belges / Repairing concrete with Self Compacting Concrete: Belgian testing methodology assessment and experience. St. Flamant, A. Darimont, X. Willem, C. Geers, R. Degeimbre, J. Wiertz et L. Courard. Sympozjum Polsko-Walońskie/Symposium Pologne – Wallonie/Poland - Wallonia Symposium“Trendy w inżynierii materiałów budowlanych”/„Trends in building materials engineering” Warsaw, April 12th, 2005, 11p.
- Travaux de réparation au Pont Kennedy / Repair works on Kennedy bridge (Liège). R. Degeimbre et L. Courard. Sympozjum Polsko-Walońskie/Symposium Pologne – Wallonie/Poland - Wallonia Symposium“Trendy w inżynierii materiałów budowlanych”/„Trends in building materials engineering” Warsaw, April 12th, 2005, 3p.

INVITATIONS

- par L . CZARNECKI, Professor and Vice-Rector, Institute of Construction Engineering and Management, Warsaw University of Technology. Interfacial and Environmental Parameters affecting the Durability of Repair Works. Coopération Wallonie-Bruxelles/Pologne (2004).
- par A .GARBACZ, Assistant-Professor, Institute of Construction Engineering and Management, Warsaw University of Technology. Repairing concrete with Self-Consolidating Concrete: testing methodology assessment. Coopération Wallonie-Bruxelles/Pologne (2002).

POSTERS

- On the effect of concrete substrate roughness on stress wave propagation in repair systems. T. Piotrowski and A. Garbacz, Technical University of Warsaw - D. Schwall and L. Courard, Université de Liège, Département GéomaC. In: E-MRS 2005 Fall meeting – Symposium G: Adhesion in Building Bonds- Macro, micro and nanoscale. Warsaw University of Technology (Poland), Sept. 5-9 (2005).
- A new method for concrete surface roughness characterization by opto-morphology technique. D. Schwall and L. Courard. In: E-MRS 2005 Fall meeting – Symposium G: Adhesion in Building Bonds- Macro, micro and nanoscale. Warsaw University of Technology (Poland), Sept. 5-9 (2005).
- Surface free energy of building materials. L. Courard and F. Michel. In: E-MRS 2005 Fall meeting – Symposium G: Adhesion in Building Bonds- Macro, micro and nanoscale. Warsaw University of Technology (Poland), Sept. 5-9 (2005)

Publications

Surfology: concrete surface evaluation prior to repair

Luc COURARD*, Frédéric MICHEL*, Damien SCHWALL*,
Audrey Van der WIELEN*, Tomacz PIOTROWSKI**, Andrzej
GARBACZ**, Fabien PEREZ *** and Benoît BISSONNETTE***
**University of Liège (Belgium), **Warsaw University of Technology
(Poland) and ***Laval University (Québec, Canada)*

Abstract

The study of adhesion of repair materials on concrete structures implies a good knowledge of the influence of concrete surface treatment. The effects of surface preparation technique are rarely clearly described and parameterised: it is consequently difficult to point out the real influence of roughness on adhesion results. A large research project has been realized with regards to the influence of concrete substrate strength and preparation technique efficiency. The surface roughness of concrete has been quantified by means of the projection “Moiré” technique, which is an interferometrical measurement method. Comparison between polished, scabbled and hydro-jetted surfaces evaluation is presented.

Keywords: concrete, surface, micro-cracking, NDT, roughness

1 Introduction

The study of adhesion of repair materials on concrete structures implies a good knowledge of the influence of concrete surface treatment (Courard [1]). Many authors describe the influence of the surface preparation technique on the superficial cohesion of concrete (Bissonnette [5]) or the adhesion (Garbacz [6]). However, the effects of surface preparation technique is never clearly described or quantified: it is consequently difficult to point out the real influence of roughness on adhesion results, as this is disturbed

by other effect like microcracking or bond coating (Bissonnette [5]). A first step was made by using mechanical profilometry to differentiate polished and sandblasted concrete surfaces (Courard [2], Courard [3] & Courard [4]). This technique is very accurate for investigations in laboratory, on a limited surface area. If Quality Control is requested or if it is impossible to core samples from the site, other procedures should be followed. That is the reason why optical analysis has been developed (Perez [7, 8]) in order to analyse larger surfaces. Some considerations about the two techniques are given hereafter.

2 Description of materials and surface preparation

Different types of surface preparation techniques were investigated: scarifying (SC), high pressure water jetting (HPW) and polishing (PTW) (Courard [2]). The visual observation of the concrete surfaces indicates that the high pressure water jetting technique induces a particular texture characterized by large waves mostly parallel to the water flow while scarifying will generally induce some oriented macro-roughness (grooved surface) (Fig.1).

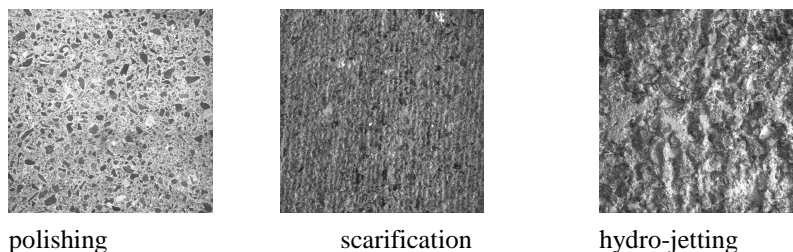


Figure 1. Different types of concrete surface preparation

3 Scale effect and roughness parameters

After treatment, concrete surfaces present fractal topography. As for any fractal object, it is possible to break up this surface or this profile in a sum of under-profiles. Each under-profile can be differentiated in terms of wavelengths; there is however no limit or precise criterion to validate the choice of decomposition method

(Fig.2). As the two surfometry methods have different resolutions, they make it possible to reach complementary scales of topography.

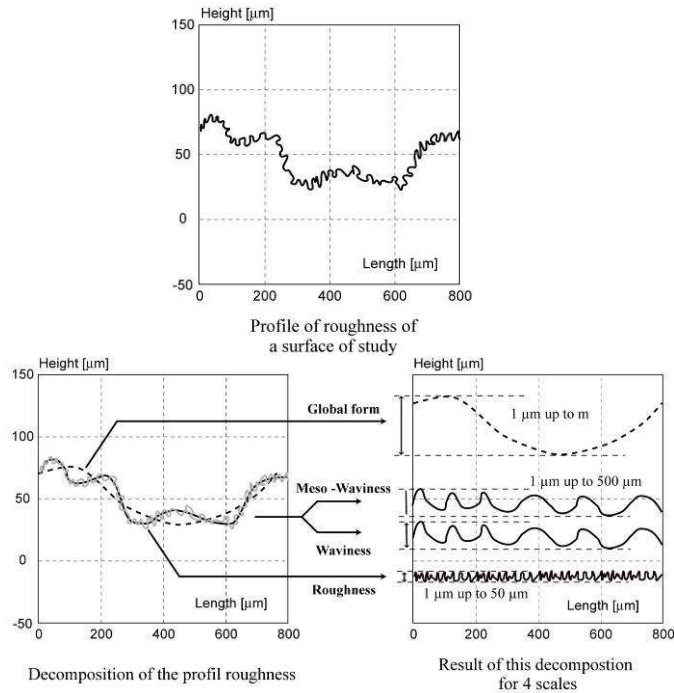


Figure 2. Scale effect on profile decomposition

The method with mechanical stylus and high resolution reaches two scales of roughness named: roughness (R) and waviness (W). The optical method, with a resolution of 0.200- μm , makes possible to reach two higher scales named meso-waviness (M) and form (F). A series of parameters make it possible to break up a total wave into two waves. The determination of surface parameters (Table 1) is realised on the basis of the mean line as a reference line (Courard [4]). Interesting information from surface analysis is the bearing ratio (Courard [3]) and the Abbott's curve (Fig. 3).

The surface parameters defined on the basis of this curve let us to analyse not only the depth of the holes but also the shape of the profile: C_F represents the depth of the profile, excluding high peaks and holes; C_L is the relative height of the holes and C_R the relative height of the peaks.

Fourth International Conference on Computational Methods and
Experiments in Materials Characterization
MATERIALS CHARACTERIZATION 2009
17-19 June 2009
New Forest, U.K.

Table 1: Profile amplitude and statistic parameters.

<i>Parameter</i>	<i>Definition</i>
X_t	total height of the profile
X_v	maximum depth of the profile (holes)
X_p	maximum height of the profile (peaks)
X_a	arithmetic mean of the deviation of the profile from the mean line
X_q	quadratic mean of the deviation of the profile from the mean line
S_k	skewness of surface height distribution
S_m	mean spacing between profile peaks at the mean line, measured over the assessment length

The C_F parameter gives an idea of the flatness of the surface: the lower it is, the more flat the profile is. Parameter C_L gives an idea of the volume of voids, beneath the mean line of the profile, which could be fulfilled by the bond coat or the repair material.

4 Evaluation of the profile roughness by mechanical surphometry

The technique has been already described in details (Courard [3]) and is only here rapidly remembered. A stylus is walked along the surface to be analysed and the profile is continuously registered (Fig. 4). The total registered profile is filtered in high and low frequencies in order to separate roughness and waviness, respectively (Courard [3]). Filtering will reduce to 50 % of the initial amplitude of a wave when its wavelength corresponds to the filter characteristic.

5 Evaluation of the profile roughness by opto-morphometry

The projection “moiré” technique is an interferometrical measurement method. The “moiré” phenomenon appears when two networks of light rays, made of equidistant lines - alternatively opaque and transparent -, are superimposed.

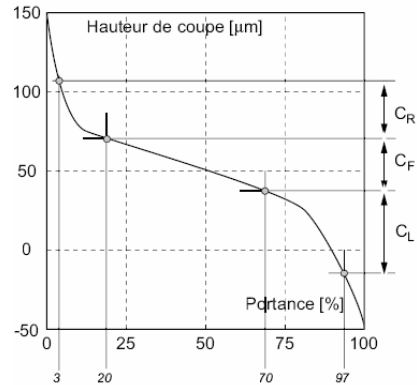


Figure 3. Abbott's curve (curve of bearing ratio) and curve parameters.

The technique of identification of relief is based on the deformation's measurement of a parallel fringes pattern projected on a surface (Fig. 5). The moiré's fringes are similar to level lines representing the variations height of the object. By projecting a network of parallel fringes on a plane surface, this network will not be deformed; however, when projected on an unspecified form, this same network will be deformed according to the level of rise in this form (Fig. 5).

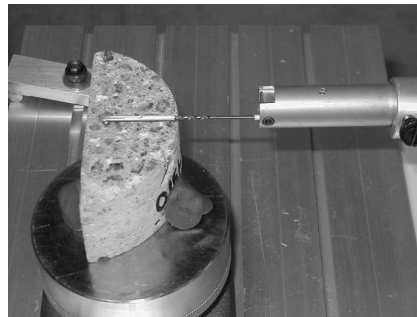


Figure 4. Stylus walking on the concrete surface.

Moreover, there is a relation between rise in the form and distance between each level line.

The measurement accuracy (Perez [8]) is directly related to the density of the fringes network and the capacity of differentiation of the network by the system of image analysis (Fig.6).

Fourth International Conference on Computational Methods and
Experiments in Materials Characterization
MATERIALS CHARACTERIZATION 2009
17-19 June 2009
New Forest, U.K.

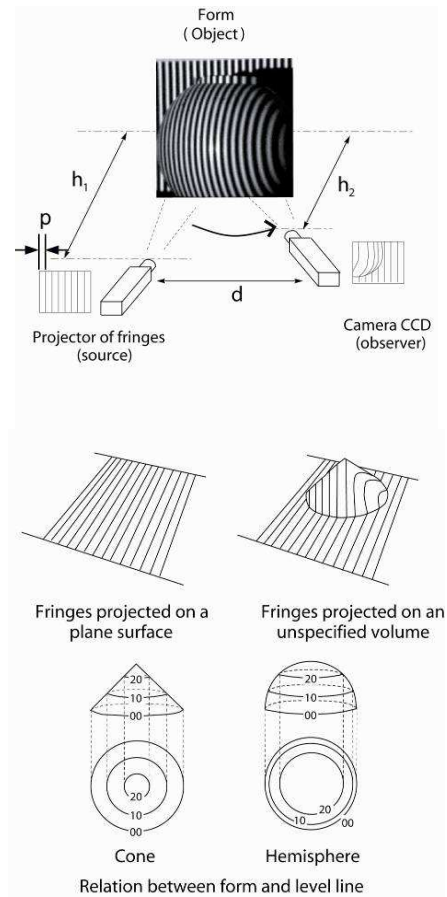


Figure 5. Principles of the Moiré projection technique.

Because of the vertical resolution of the device, it is impossible, in this case, to separate roughness from waviness. A profile obtained through this approach will consequently give the description of meso-waviness and global form. A program – RugoDS - based on MatLab 7.0 (Courard [9]) permits to process numeric data from representation of Moiré projection in order to get surfometric image of the profile (Fig. 6) as well as all the amplitude and statistic parameters before and after filtration (Table 2).



Figure 6. Testing system with camera CCD and parallel fringes pattern on surface.

6 Results

6.1 Mechanical evaluation

A first evaluation by mechanical profilometry has been realized by means of a stylus with diamond sphere radius of $6\ \mu\text{m}$. The length of measurement was 8 mm and the filter used to separate roughness from the profile was fixed to 0.8 mm. Three profiles were registered on one sample of each kind of preparation; each profile on the sample was made in different directions. A second measurement was made with stylus of 79-mm long and a diamond of 1.5 mm radius, in order to point out waviness. The length of the measurement was enlarged to 30-mm or more. The filter was again chosen at 0.8-mm and the filter to separate shape from the profile was 16mm (two times the dimensions of the aggregates). Observation of the values of the roughness amplitude parameters (Table 2) clearly shows that R_a , R_q , R_t parameters are between 1.5 and 3 times smaller for the polished concrete profile than for water jetting and scarification, and that the values of amplitude and statistical roughness parameters are equal for water jetting and scarification.

Fourth International Conference on Computational Methods and
Experiments in Materials Characterization
MATERIALS CHARACTERIZATION 2009
17-19 June 2009
New Forest, U.K.

Table 2: Waviness (W) and roughness (R) parameters for mechanical evaluation (μm)

<i>Treatment</i>	<i>Polishing</i>	<i>Water jetting</i>	<i>Scarification</i>
Wa	6	420	127
Wp	13	1003	346
Wq	9	501	158
Wv	47	923	445
Wt	60	1926	791
Ra	5	14	15
Rq	7	17	19
Rt	70	96	102
C _R	4	152	412
C _F	10	228	827
C _L	14	231	537

It is here confirmed that the surface treatment technique has no major influence on the micro-roughness (“high frequencies waves”) of the profile. However, the differences are more effective for waviness parameters (Fig. 7).

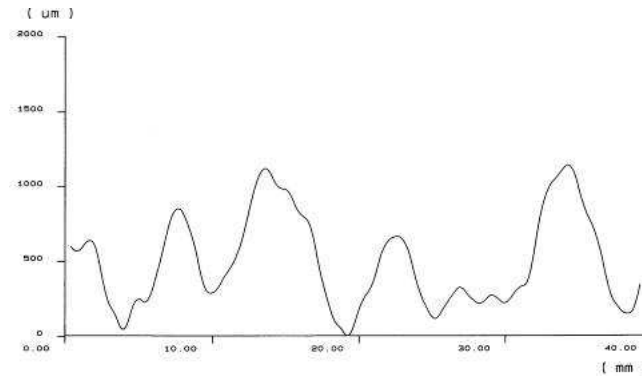
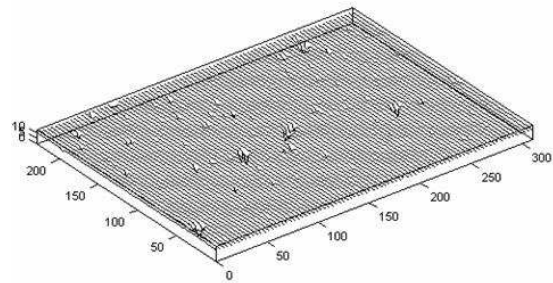


Figure 7. Waviness profile after hydro-jetting surface treatment.

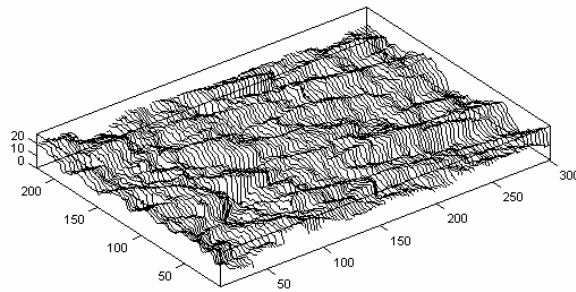
6.2 Opto-metrical evaluation

As the same way to mechanical evaluation, optometric topography evaluations have been realized. Fig. 8 presents the statements of the optical measurements. At this scale, water jetting seems to induce the largest “roughness”. Polishing and scarification are quite similar.

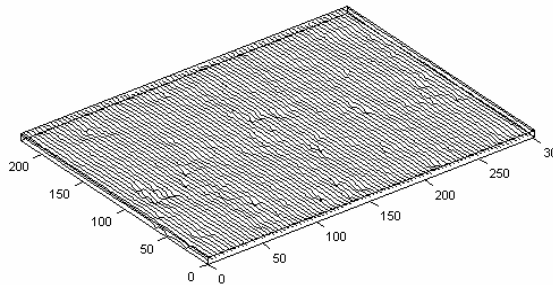
Fourth International Conference on Computational Methods and
Experiments in Materials Characterization
MATERIALS CHARACTERIZATION 2009
17-19 June 2009
New Forest, U.K.



(a) *polishing*



(b) *hydro jetting*



(c) *scarification*

Figure 8. Meso-waviness profiles (mm)

It's probably due to the bubble effect at the surface which gives roughness aspect.

Observation of the values of the roughness amplitude parameters (Table 3) clearly shows that M_a parameter is 20 times more important for hydro jetting than for scarification and polishing. At this scale, the other treatments induce smooth surface. Polishing

gives the less rough surface. The major part of apparent roughness of polishing surface comes from the bubble.

Table 3: Global form (F) and meso-waviness (M) parameters for opto-metric evaluation (mm)

<i>Treatment</i>	<i>Polishing</i>	<i>Water jetting</i>	<i>Scarification</i>
Fa	0.137	0.358	0.326
Ft	4.1	10.8	12.6
F Sm	129	85.3	102.3
Ma	0.169	2.85	0.315
Mt	19.7	27.8	10.2
M Sm	15.3	36.5	22.5
C _R	0.30	4.65	0.41
C _F	0.29	5.76	0.55
C _L	0.35	5.71	0.81

7 Conclusions

The following conclusions may be reached from the present investigations. For mechanical analysis technique, one may consider that:

- stylus: because of the shape of the stylus, it is impossible to make measurements on very rough surfaces prepared by hydro-jetting for example;
- air bubbles: some of the air bubbles in concrete are so large that the stylus falls and the measurement is interrupted. That means that the selection of the zone to be investigated is very important;
- dimensions: this measurement is very high time consuming and it is the reason why the surface of investigation is limited. Moreover, this system is not usable on site.

Considering the use of opto-morphometry technique for the concrete surface roughness characterization, it is important to point out that:

- all the amplitude and statistic parameters are higher for hydro-jetting than for scabbling and polishing at the end which is the equivalent of aggressiveness of treatment. Decreasing values are obtained for scabbling and polishing, respectively;
- for each profile, there are more high peaks than deep valleys. The highest asymmetry is present for scabbling profile;

Fourth International Conference on Computational Methods and
Experiments in Materials Characterization
MATERIALS CHARACTERIZATION 2009
17-19 June 2009
New Forest, U.K.

- opto-morphometric technique allows to analyze large surface areas (1000cm², with horizontal resolution of 500µm and vertical resolution of 300µm);

But it remains that the filtration process has a major influence on results and profiles; it should be clearly discussed, as well as the accuracy that is needed for roughness profile representation, with regards to adhesion.

References

- [1] Courard L., Bissonnette B. and Belair N. 2005. Effect of surface preparation techniques on the cohesion of superficial concrete: comparison between jack-hammering and water-jetting.. In: ICCRRR 2005 International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (Eds. H. Beushausen, F. Dehn and M.G. Alexander), Cape Town, South Africa (21-23 Novembre 2005)
- [2] Courard L., Garbacz, A. and Gorka, M. 2004. Concrete surface treatments quantification by means of mechanical profilometry. in: ICPIC, XIth International Congress on Polymers in Concrete (Ed. M. Maultzsch, Federal Institute for Materials Research and Testing), Berlin, Germany (2-4 June 2004): 125-132.
- [3] Courard, L. and Nélis, M. 2003. Surface analysis of mineral substrates for repair works: roughness evaluation by profilometry and surfometry analysis. *Magazine of Concrete Research*. **55**(4): 355-366.
- [4] Courard, L. 1998. Parametric Definition of sandblasted and polished Concrete Surfaces, in: IXth International Congress on Polymers in Concrete, Bologna, Italy (ICPIC, Ed. P. Sandrolini,): 771-778.
- [5] Concrete removal techniques: influence on residual cracking and bond strength. B. Bissonnette, L. Courard, A. Vaysburd and N. Bélair. *Concrete International*, **28**(12) (Dec. 2006), 49-55.
- [6] Garbacz, A., Courard, L., and Gorka, M. On the effect of concrete surface treatment on adhesion in repair systems. *Magazine of Concrete Research*. **57**(1):49-60.
- [7] Perez, F. 2005. Contribution à l'étude du comportement mécanique des éléments bicouches composés de bétons d'âges différents sous sollicitations statiques et cycliques. *PhD Dissertation*, Université Laval, Département de Génie Civil, Québec, Canada, 219p.
- [8] F. Perez, L. Courard, B. Bissonnette, A. Garbacz and M. Gorka Two different techniques for the evaluation of concrete surface roughness.. In: ICCRRR 2005 International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (Eds. H. Beushausen, F. Dehn and M.G. Alexander, 2006 Taylor & Francis Group, London), Cape Town, South Africa (21-23 Novembre 2005), 1015-1020.
- [9] L. Courard, D. Schwall and T. Piotrowski. 2007. Concrete surface roughness characterization by means of opto-morphology technique. Monography:

Fourth International Conference on Computational Methods and
Experiments in Materials Characterization
MATERIALS CHARACTERIZATION 2009
17-19 June 2009
New Forest, U.K.

Adhesion in Interfaces of Building Materials: a Multi-Scale Approach
(AMSR Advances in Material Science and Restoration, Eds. L. Czarnecki
and A. Garbacz, Aedificio Publishers), pp.107-116.

8 Acknowledgments

This research project was financially supported by the Government of Québec (MRI), Canada, the Government of Poland and the Regional Government of Wallonia (DRI), Belgium.

On the relation between bond quality and impact-echo frequency spectrum

T. Piotrowski, A. Garbacz

Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Building Materials Engineering, Warsaw, Poland

A. van der Wielen, L. Courard, F. Nguyen

University of Liege, ARGenCo, GeMMe, Liege, Belgium

ABSTRACT: According to EN 1504-10 and ACI Concrete Repair Manual, bond strength and interface quality are the main features of repair system necessary to be assessed. Pull-off test is most commonly used for bond strength evaluation but growing interest in nondestructive techniques (NDT) is recently noted. Impact-echo (IE) is treated as the most promising one for this purpose. The aim of this paper is to analyze an effect of bond quality on stress wave propagation in repair systems. A group of samples has been prepared in order to obtain repair systems of different bond quality. Prior to repair, quality of concrete substrates has been characterized according different techniques: compressive strength, superficial cohesion, surface roughness index and cracking quantification. Than a polymer-modified repair mortar has been applied. After hardening, IE signals have been recorded and pull-off bond strength determined. The relationships between parameters characterizing surface quality, bond strength, IE frequency spectrum and results of wavelet analysis of IE signal have been analyzed.

1 INTRODUCTION

The general requirement for repair of concrete structures is efficiency and durability - Czarnecki and Emmons (2002). Following the compatibility rule formed by Czarnecki et al. (2004), it can be assured if a proper repair material selection is made but it is not the only condition to fulfil. There are many factors affecting on bond quality – Silfwerbrand et al. (2005). The basic operation during repair, that can increase (but also decrease) bond strength between repair material and concrete substrate, is surface treatment – Courard (2000). In this paper relation between bond quality and impact-echo frequency spectrum was analysed.

2 EXPERIMENTAL PROGRAM

2.1 Repair systems description

Several repair systems with deferent quality of concrete substrate surface were tested (Tab.1). The effect of the concrete surface treatment is mostly dependent upon the nature and the quality of concrete substrate. Two groups of three different types of concrete were designed in order to obtain classes of compressive strength from C25/30 to C50/60. The given classes were verified by compressive strength, f_{ck} evaluation. On each of group of concrete slabs, four types surface preparation methods were investigated. In order to obtain differences in profile development and level of microcracking in the near-to-surface layer, the surface preparation methods for Group A were: polishing (PL), dry sandblasting (SB-D), jack hammering (JH) and hydrodemolition (HD). For Group B surface preparation methods were suited as not to much aggressive ones to obtain similar profiles, low-level microcracking but differences in bond quality; they were: brushing (NT), waterjetting (LC), wet sandblasting (SB-W) and scarification (SC).

Table 1: Characteristic of tested repair systems

	Group A			Group B		
Concrete substrate	C30	C40	C45	C25	C35	C50
Compressive strength classes	C30/37	C40/50	C45/55	C25/30	C35/45	C50/60
Surface preparation	PL, SB-D, JH, HD			NT, SB-W, SC, LC		
Sample dimensions	80x60x10 cm			50x50x7cm		
Repair material	PCC (A), $D_{\max} = 2,0\text{mm}$			PCC (B), $D_{\max} = 0,25\text{mm}$		
Repair layer thickness	3cm			3cm		

2.2 Results of substrate characteristics

The quality of substrates was characterized from point of view of their roughness, microcracking and surface tensile strength. The roughness was measured by sand patch test according to EN 1766 resulting Surface Rough Index SRI (Fig.1a). Substrates of Group A can be ranked from polished smooth surface (PL), by dry sandblasted (SB-D) and jack hammered (JH) to very irregular hydrodemolitioned one (HD). In Group B low-pressure waterjetting (LC) has no big influence on profile in comparison to brushed surface (NT), while wet sandblasting (SB-W) and scarification (SC) increase roughness a little. Microcracking of samples of Group A was observed on the cross-section of the 8 cm cores on the near-to-surface layer in the area of 2 cm depth. Density of microcracks was calculated (Fig.1b). It can be concluded, that more aggressive surface preparation technique influence more on microcracking: it was observed two times higher density of microcracks after jack hammering (JH) and hydrodemolition (HD) than after dry sandblasting (SB-D) and polishing (PL). As the aggressiveness of surface treatment of samples of Group B was small, the microcracking was not observed here, although it can be expected a little higher level for scarification.

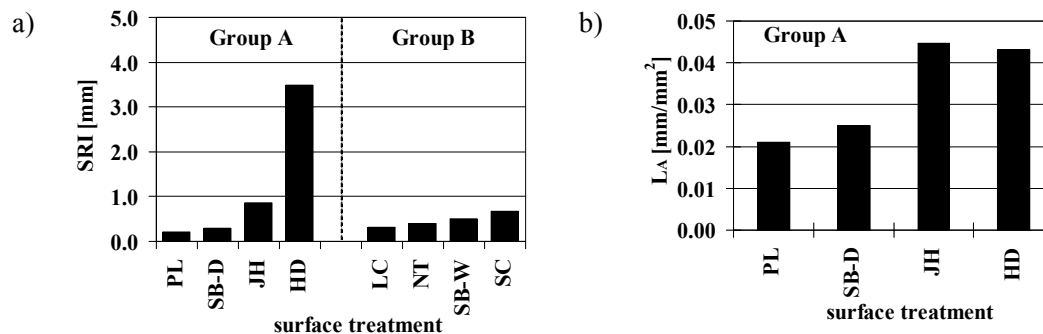


Figure 1: Surface Roughness Index, SRI (a) and density of microcracks, L_A (b) depending on the method of surface treatment

The pull-off test according EN 1542 and ASTM C 1583 04 commonly used for evaluation of bond strength (Fig.2b) was applied for surface tensile strength (f_{hs}) measurement (Fig.2a) including type of failure registration. In case of samples of Group A the concrete quality did not have a major influence on the surface tensile strength after surface treatment as it was for samples of Group B (Fig.3). It can be also observed (Fig.4) that for surfaces jack hammered (Group A) and scarified (Group B), more than 50 % of failures appeared near in the superficial zone (type A1, see Fig.2a). It is probably due to microcracking already mentioned.

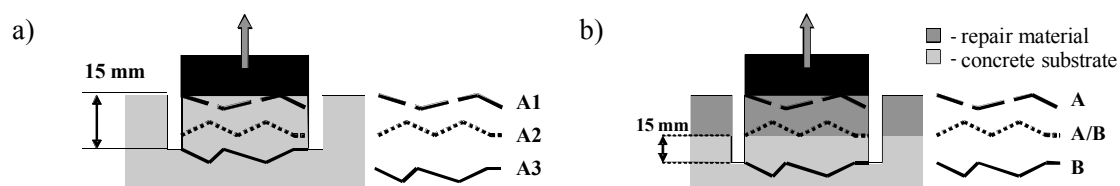


Figure 2: Pull-off for evaluation of surface tensile strength (a) and bond strength (b)

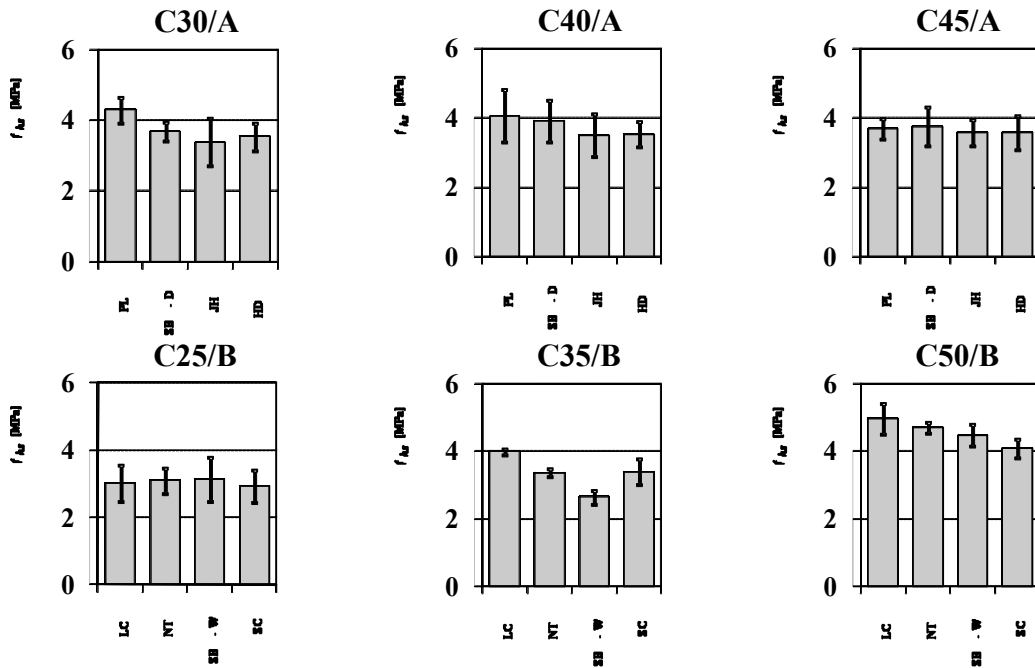


Figure 3: Surface tensile strength, f_{hs} of samples

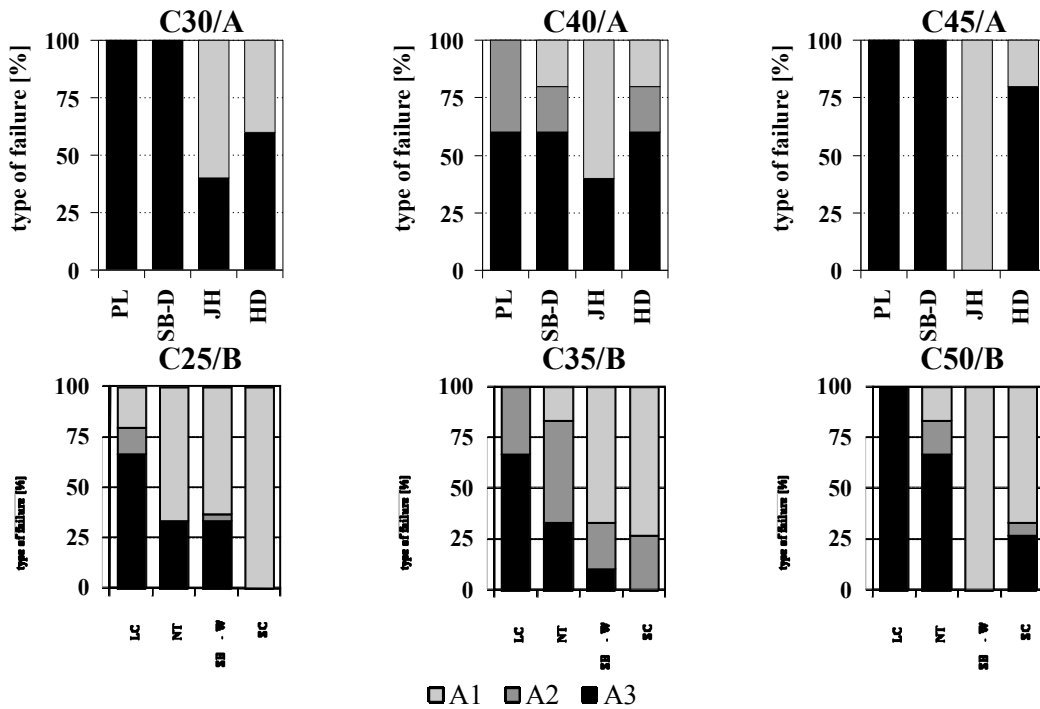


Figure 4: Type of failure in the evaluation of surface tensile strength, f_{hs}

2.3 Results of bond strength evaluation in repair systems

When repair was 28 days old, the pull-off tests were performed for evaluation of bond strength between concrete substrate and repair layer (Fig.5). Surface preparation effect on samples of Group A can be divided in two groups in regards to EN 1504-10: bond strength after hydrodemolition (HD) and sandblasting (SB-D) is greater than the threshold minimum values for laboratory performance both for structural repair (2.0MPa) and non structural (1.5MPa). The bond strength for polishing (PL) and jack hammering (JH) is close to or below this limit. For the Group B only the results on substrate C25 and C35 are at this level. In comparison to Group A, bond strength is much lower probably due to not sufficient development of surface profile.

Moreover, there was observed total delamination with substrate water jetted (LC) and brushed (NT) for samples C50. These methods seem to be not effective also for C35. Looking at the type of failure (Fig.6), an effect of microcracking is still visible for jack hammering (JH), where all failures were in the superficial zone of substrate (type A, see Fig.2b). For polishing (PL) all failures appeared at the interface (type A/B, see Fig.2b), because mechanical interlocking between substrate and repair layer was not sufficient. Situation is more unclear for dry sandblasting (SB-D) and hydrodemolition (HD) where cohesive B and interface A/B failures were observed. Analysing Group B samples, many failures in concrete (type A, see Fig.2b), appeared where concrete was weak (C25), especially when aggressive surface treatment like scarification (SC) was applied.

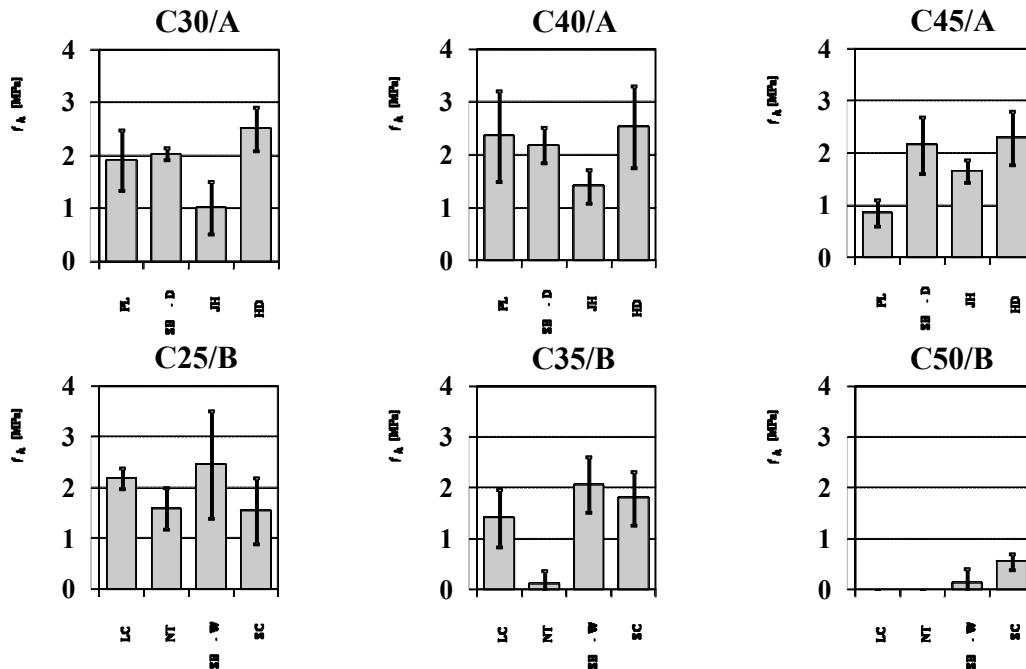


Figure 5: Bond strength, f_h between concrete substrate and repair layer

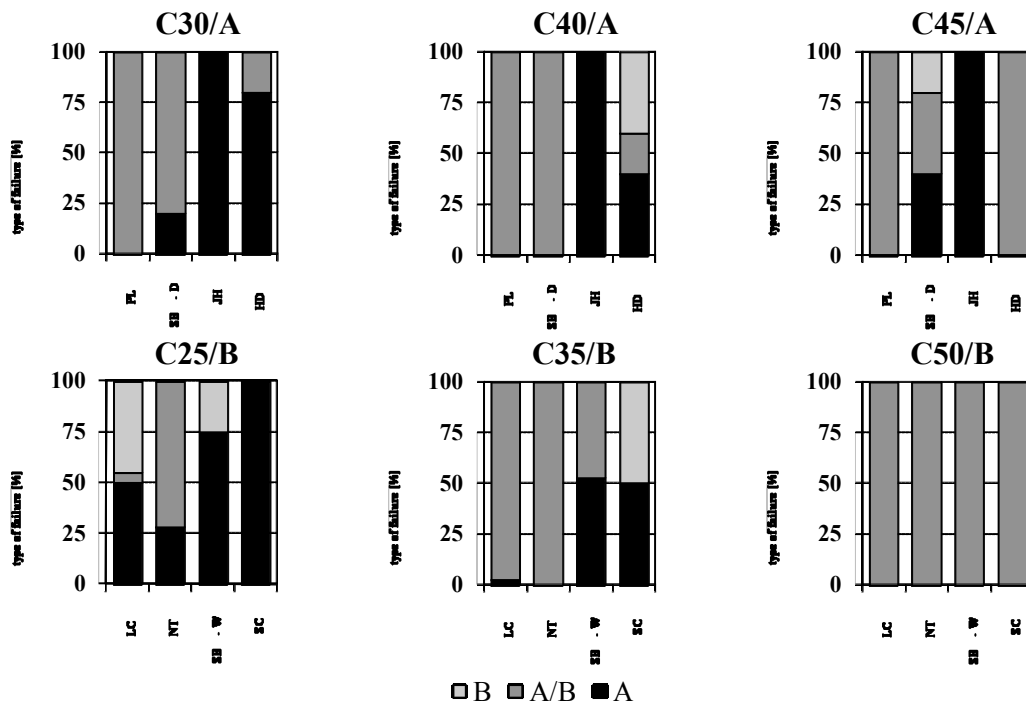


Figure 6: Type of failure in the evaluation of bond strength, f_h

2.4 Influence of substrate characteristic on bond strength

Multiply regression approach for evaluation of bond quality using calculated parameters of substrate characteristic (f_{ck} , SRI, L_A , f_{hs}) as explanatory variables showed, that the biggest part in prediction of bond strength, f_h have f_{hs} and SRI. When using these parameters only the regression coefficient, R was 0.70 for Group A and 0.82 for Group B. Interesting is observation that while influence of SRI increase is in both cases positive, the influence of f_{hs} for Group A is positive and for Group B negative. This situation is clear visible on the graph of usability, defined as a value of high usability $u = 1.0$ for bond strength $f_h = 2.5$ MPa, medium usability $u = 0.5$ for $f_h = 1.5$ MPa and low usability $u = 0.0$ for $f_h = 0.5$ (Fig.7).

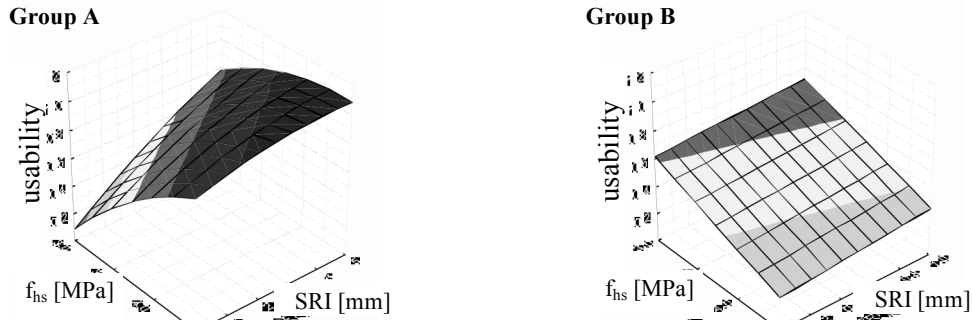


Figure 7: Usability graph for evaluation of bond strength using f_{hs} and SRI as explanatory variables

3 IMPACT-ECHO TESTS

3.1 Impact-echo method description

Impact-echo (IE) is a method for non-destructive evaluation of concrete, based on the use of an elastic, low energy impact of a steel ball on the surface generating low frequency stress waves (mainly below 60 kHz). These waves propagate through the structure and are reflected by interfaces within the material (internal flaws such as voids, honeycomb, cracks, delaminations) or external boundaries (Fig.8a). IE method is often used for quality control of various types of repair, e.g. injection of cable ducts, overlays etc.- Sansalone et al. (1997). As the stress waves generated in IE method have low frequencies (in comparison to e.g. ultrasonic), this method is less sensitive to heterogeneity of concrete. Additional feature of IE method is application besides a time-domain analysis (Fig.8b) a frequency analysis (Fig.8c). Based on frequency spectrum the depth of the reflecting interface (e.g. flaws) can be determined according to formula:

$$d = \frac{c_p}{2 \cdot f_d} \quad (1)$$

where: d = depth of interface, c_p = wave velocity, f_d = frequency of dominant peak.

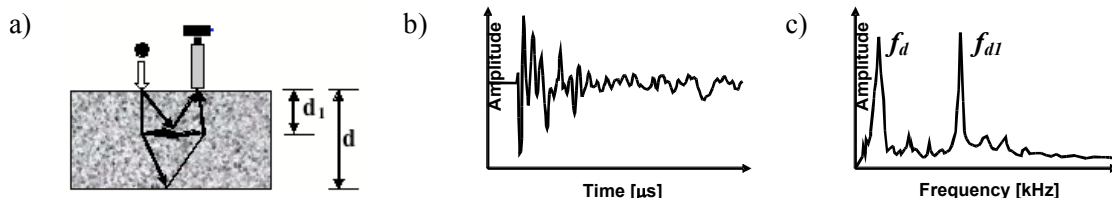


Figure 8: Scheme of impact-echo method (a), example of waveform (b) and corresponding frequency spectrum (c) when defect in concrete is observed

3.2 Influence of substrate characteristic on impact-echo stress wave propagation

First two specific ranges of the frequency spectrums were analyzed: first around of the bottom peak frequency and second one around frequencies corresponding to the interface. The relation-

ships between amplitude of bottom and interface peaks and parameters describing quality of repair systems were not statistically significant - Piotrowski et al.(2007) and Garbacz et al.(2008). It means that amplitude of characteristic frequency peaks is not proper measure to estimate bond quality in repair systems. In next studies normalized frequency spectrums was spread on 3D amplitude - frequency distribution where the number of IE measurement (from 1 to 10 - Group A, and from 1 to 7 - Group B) was the third axe parameter. It can be observed (Fig.9) that for jack hammering (JH) and hydrodemolition (HD) in Group A, apart from the bottom peak at about 20 kHz, there are some high peaks in lower frequencies suggesting rough surface and microcracking. In case of C50 group B samples where total delamination and zero bonding in pull-off test was obtained (NT and LC) there are clear vibration peaks that have very low frequency and bottom peak is no visible (Fig.10) Obtained 3D amplitude - frequency distribution surfaces were characterized with RugoDS program using surface profile analysing approach – Garbacz et al. (2006). The statistical parameters for 3D amplitude – frequency distribution were calculated but still no statistically significant relationship between these parameters and pull-off strength was found.

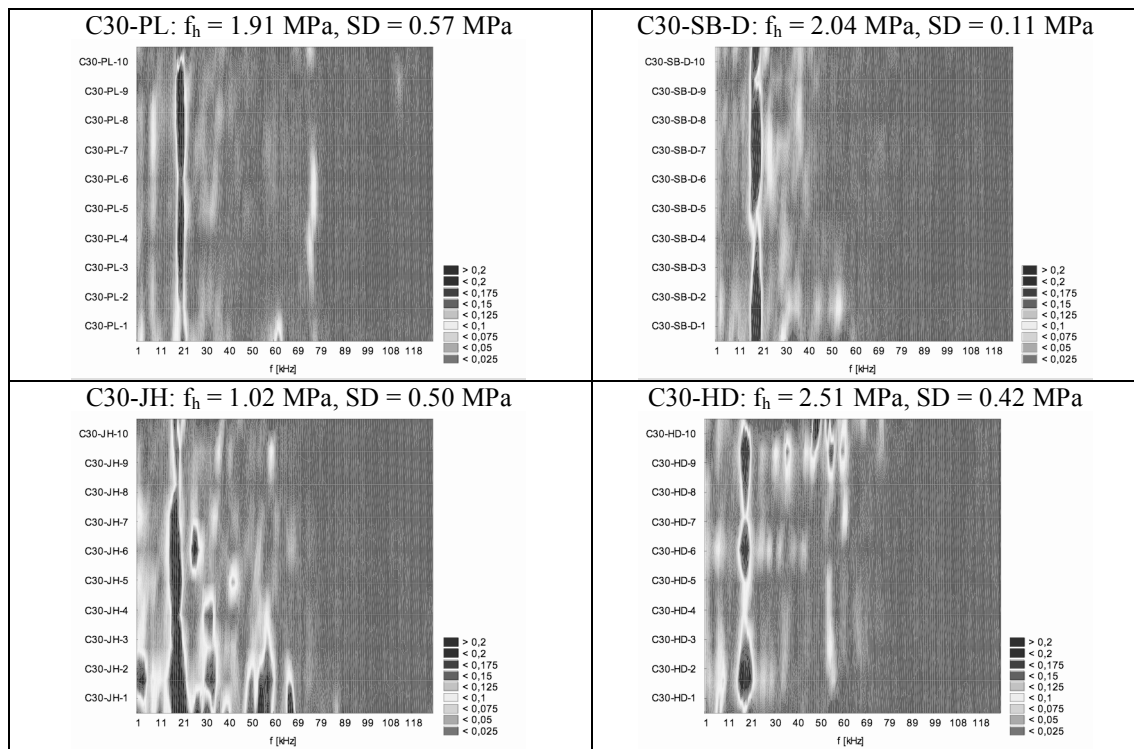


Figure 9: 3D amplitude - frequency distribution for C30 Group A

3.3 Evaluation of bond strength using wavelet approach

Wavelet analysis presents the next logic step in analysis of signals. It allows for use of long time sections, when analysis of low frequencies is made or short time – for high frequencies. This effect is a result of using, instead of sine function, a wavelet - “short” wave, well concentrated in both time and frequency. Wavelet analysis decomposes signal on a set of shifted and scaled versions of mother wavelet. Continuous Wavelet Transform - CWT results the C coefficients that are functions of scale and time position. Signal is then composed of a sum of shifted and scaled wavelet multiplied by C. If we use scaling parameters of powered 2 the Discrete Wavelet Transform - DWT is obtained. The result of DWT is a set of coefficient/time diagrams (details,D) on given scale levels 2,4,8,16 etc. Fundamental for wavelet analysis is relation between scale and sine frequency of wave phenomena. This relationship describes pseudo-frequency f_a equation:

$$f_a = \frac{f_c}{a \cdot \Delta} \quad (2)$$

where: f_c = wavelet centre frequency (dominant oscillation frequency), a = scale, \square = sampling period in seconds.

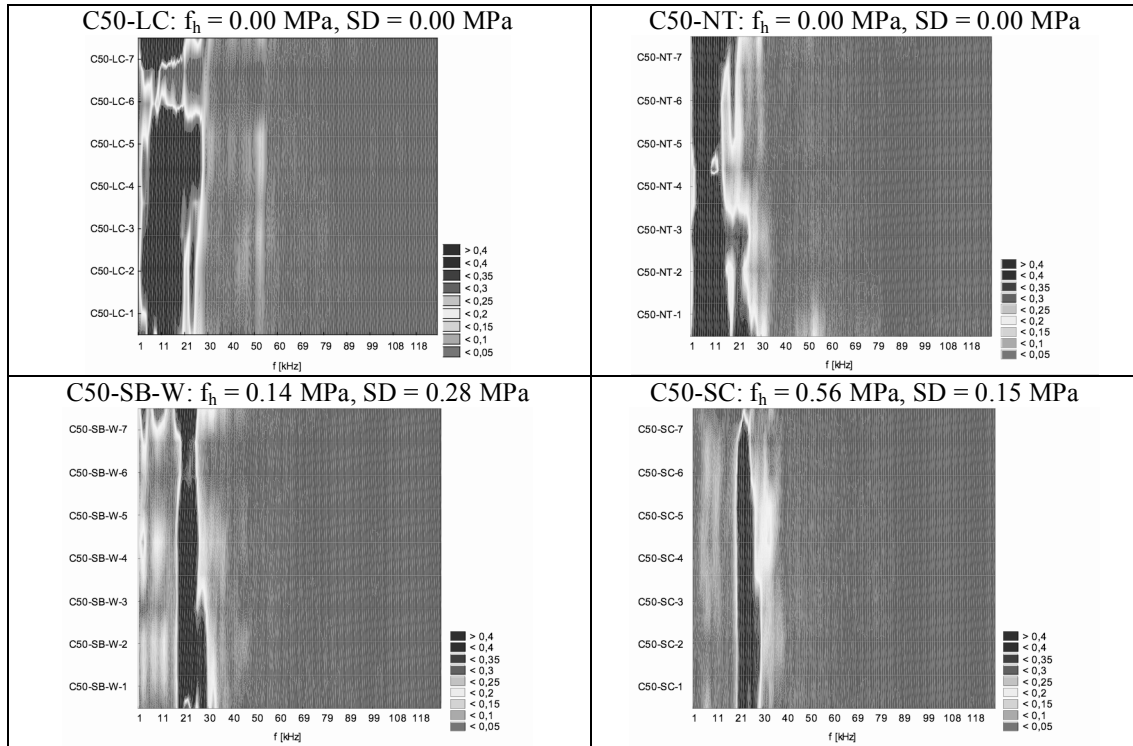


Figure 10: 3D amplitude - frequency distribution for C50 Group B

Analytical determination of scale and detail level for specific ranges of the frequency spectrums showed that the characteristic frequency ranges for interface echo are located at level D3-D2. Results of the DWT transform on IE signals – details D2 and D3 were statistically analysed using standard procedure of the MatLab by mean of absolute deviation (MAD), standard deviation (SD) and range of amplitude (RG). Then multiply regression approach for evaluation of bond quality using calculated parameters of detail distribution was performed. The regression coefficient, R was 0.68 for Group A and 0.85 for Group B (Fig. 11), what is a similar level as it was in case when as explanatory variables f_{hs} and SRI were used. If we add to the explanatory variables parameters from characterisation of concrete substrate (f_{hs} , SRI) and wavelet analysis of IE signal (MAD, SD, RG for D2 and D3) the regression coefficient, R increase to 0.88 for Group A and 0.87 for Group B. A result of multiply regression approach was the regression equations (Fig. 11b) which allows for calculation of estimated bond strength on the base of explanatory parameters.

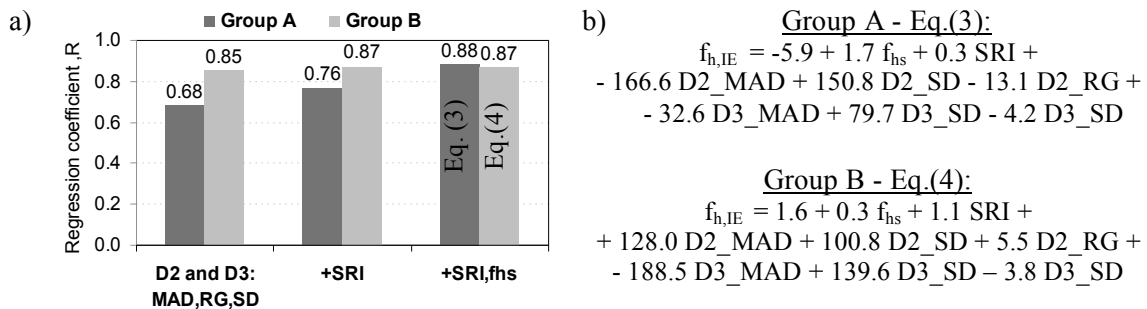


Figure 11: Multiply regression coefficients in evaluation of bond strength using different explanatory variables (a) and equations for calculation of estimated bond strength, $f_{h,IE}$ (b)

If we plot measured bond strength vs. estimated bond strength the points are localised quite close to basic regression line of $f_h = f_{h,IE}$, (Fig.12). To calculate minimal evaluated bond strength,

we need to corrected regression line (solid line) by shifting the basic regression line (dot line), as it is recommended in EN 13791, on value:

$$\Delta f_h = -1.48 \cdot s \quad (5)$$

where: s = standard deviation of distance between points and basic regression line.

Points located in the grey area on the left form corrected regression line have big probability for low bond strength or even delamination.

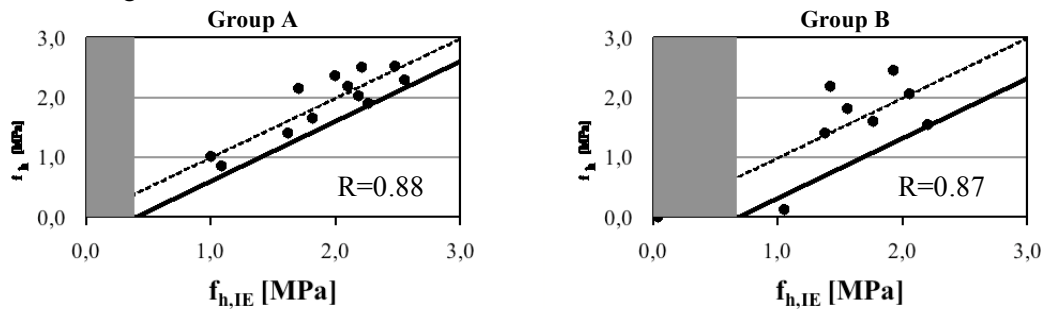


Figure 12: Bond strength measured, f_h vs. bond strength estimated, $f_{h,IE}$ with multiple regression using as explanatory variables D2 and D2 MAD, RG, SD together with SRI and f_{hs}

4 CONCLUSIONS

Results presented in this paper and obtained in earlier research lead to a statement that bond strength estimation in repair systems can be made by impact-echo signal analysis, especially using wavelet approach. Including into analysis the parameters characterizing concrete substrate quality, like Surface Roughness Index and surface tensile strength, significantly improves this estimation. Method of bond strength estimation in repair systems using impact-echo could be based on the procedure of assessment of in-situ compressive strength given in EN 13791.

AKNOWLEDGMENTS

The authors are thankful to Professor L.Czarnecki, Head of the Department of Building Materials Engineering at the Warsaw University of Technology for valuable discussion and remarks. This work was been prepared in the framework of WUT grant nr 504 G 1080 7007.

5 REFERENCES

- Czarnecki L., Emmons P.H., 2002, *Repair and protection of concrete structures* (in Polish), (ed. Polski Cement), Crakow.
- Czarnecki L., Głodkowska W., Piatek Z., 2004, *Estimation of compatibility of polymer and polymer-cement composites with ordinary concrete under short-time load conditions*, Archives of Civil Engineering, L (1), p.133-150.
- Courard L., 2000, Parametric study for the creation of the interface between concrete and repairs products, Materials and Structures, 33, p.65-72.
- Garbacz A., Piotrowski T., Courard L., 2006, *Analysis of stress wave propagation in repair systems using wavelet approach*, RILEM PRO 51: 2nd Int. Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, Quebec, Canada, (CD).
- Garbacz A., Piotrowski T., Niewęgłowska-Mazurkiewicz A., 2008, *Wavelet approach in repair efficiency evaluation with stress waves*, CCC 2008, Porto, Portugal, 16 18.04.2008, p.68-69.
- Piotrowski T., Garbacz A., 2007, *Application of signal analysis in assessment of repair system quality by impact-echo and ultrasonic methods*, 12th ICPIC, Chuncheon, Korea, 26-28.09.2007, p.779-790.
- Sansalone M. J., Street W. B., 1997, *Impact-echo. Nondestructive evaluation of concrete and masonry*, Ithaca NY, Bulbrier Press, p.339.
- Silfwerbrand J., Beushausen H., 2005, *Bonded concrete overlays – bond strength issues*, Proc.of the ICCRRR, Cape Town, South Africa, 21-23 Nov 2005, p.19-21.

Septième édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

Toulouse, France
19-20 juin 2006

DURABILITE DES REPARATIONS DE BETON : ENTRE THEORIE ET PRATIQUE

L. Courard

GEMME – Matériaux de Construction, Département de Géoressources, Géotechnologies et Matériaux de Construction, Université de Liège, Belgique.

A. Garbacz

Département d'Ingénierie des Matériaux de Construction, Université Technique de Varsovie

RÉSUMÉ : Le béton est réputé durable. L'expérience de cette durabilité est toutefois fort limitée en termes d'échelle temporelle : nombreux sont les facteurs – internes et externes - qui peuvent amener une dégradation parfois très rapide du matériau. Fort heureusement, ces dégradations n'ont que très peu souvent d'effet irrémédiable sur le comportement structural de l'ouvrage en béton.

Les réparations permettent en général de prolonger la durée de vie des structures, en réhabilitant le comportement du matériau : l'adhérence du système de protection ou de réparation constitue dans ce cas une condition nécessaire mais pas toujours suffisante. Définir les conditions d' « appétence » est la première étape du processus : quelles sont les conditions minimales à rencontrer pour que les matériaux « adhèrent », dans un environnement donné ? Ces conditions sont-elles suffisantes pour garantir la durabilité des réparations ? De plus, l'évaluation de l'adhérence pose problème en soi : traction, cisaillement, torsion sont autant de sollicitations censées représenter le comportement réel d'une interface : quel type d'essai employer ? Comment allier facilité et efficacité ? Laboratoire et chantier ?

1. ADHESION, ADHERENCE ET APPETENCE

La rénovation des bâtiments ou ouvrages du génie civil est une science : de la même manière que le médecin pose son diagnostic pour prescrire les remèdes, l'ingénieur investigate le béton à réparer afin de sélectionner le produit de réparation le mieux adapté. Mieux encore, à côté de ces médications, il convient de tenir compte de l'environnement dans lequel la remédiation se passera. Plus que de l'imposer comme pourrait le faire un médecin, l'ingénieur devra l'intégrer dans ses critères de sélection : il subit l'environnement plus qu'il ne le maîtrise (Courard, 2000). L'opération passe par un premier stage fondamental : la connaissance du support sur lequel sera appliqué le produit de réparation. Deux étapes sont généralement désignées afin de mener à bien l'étape de l'auscultation: la première nécessite un rapide survol de l'ensemble de la structure, incluant un échantillonnage limité et permettant la définition de

zones pour lesquelles des investigations plus détaillées sont nécessaires. La seconde requiert l'emploi de méthodes destructives et non destructives, appliquées sur des parties limitées de la structure. Les méthodes non destructives (NDT en anglais) sont de plus en plus largement répandues, non seulement pour l'analyse des matériaux mais aussi pour le suivi en continu des structures (Garbacz et al., 1999). En complément des analyses physiques et chimiques plus classiques, elles permettent d'évaluer la résistance du béton et de déceler la présence de défauts à profondeurs plus ou moins importantes. Que ce soit l'état de carbonatation du béton ou sa cohésion superficielle, la présence de chlorures ou la détection de vides de compactage, la propreté ou la rugosité de la surface, il est important de maîtriser les techniques et d'être capable d'interpréter les résultats des analyses. Il va sans dire que la compétence reste, dans ce domaine comme dans bien d'autres, un gage de réussite et d'efficacité.

Ensuite, il convient de procéder à la sélection du système de réparation. C'est le sens commun que d'affirmer que, sans adhérence, la réparation des ouvrages en béton n'est pas possible (Cleland et al., 1986 et Silwerbrandt et al., 1998) . Que ce soit au niveau de l'injection de fissures, de la réparation de l'épaufrage et de la désagrégation ou encore du renforcement des structures par collage de plats métalliques, c'est l'adhésion qui va influencer la qualité du travail et la résistance des joints créés.

La théorie de l'adhésion (Figure 1) en tant que telle repose sur des piliers plus vastes, classés généralement en deux catégories principales (Kinloch, 1987), respectivement l'adhésion mécanique, liée principalement à la rugosité macroscopique et ce qu'il est convenu d'appeler l'adhésion spécifique, interprétée en termes de liaisons chimiques (quand elles existent), d'approche thermodynamique et de forces intermoléculaires (c'est dans cette catégorie que l'on retrouve les forces "électriques").

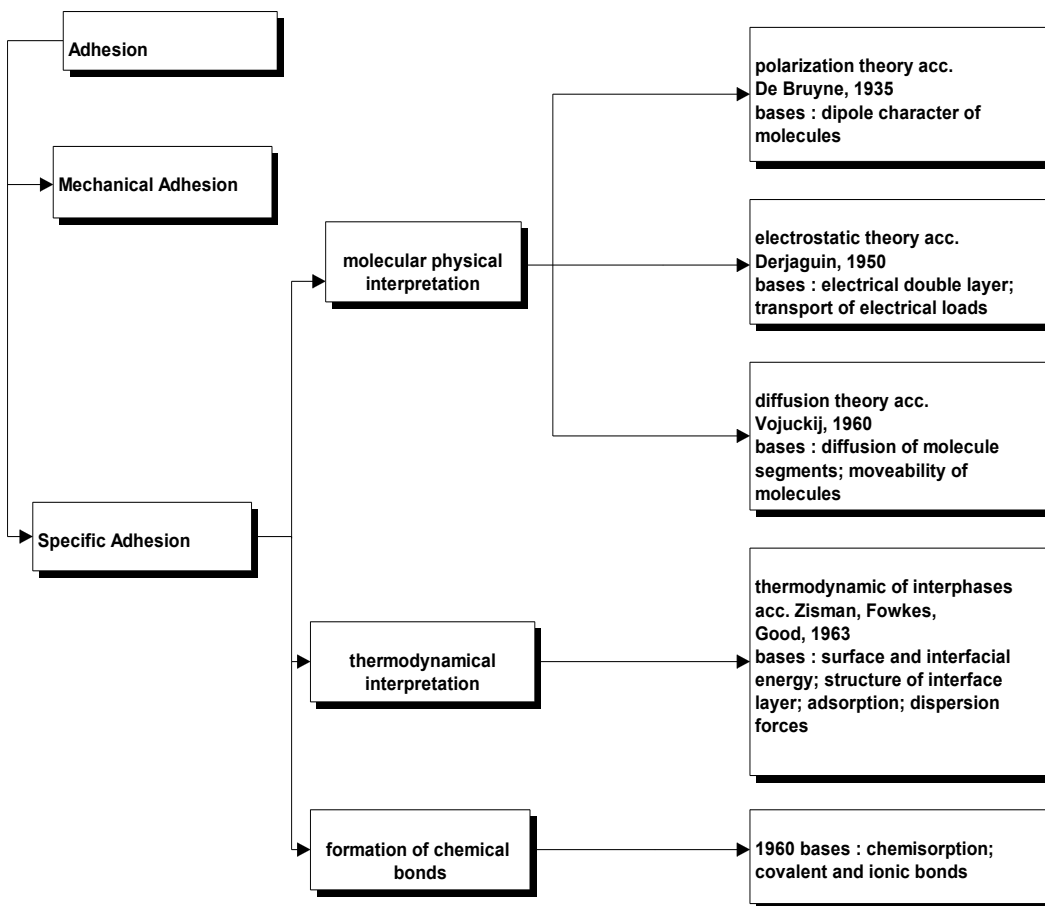


Figure 1 : théories et bases de l'adhésion

Dès à présent, il convient de mettre en évidence la dualité de l'approche du phénomène, que l'on retrouve par ailleurs dans la définition du terme adhésion (Derjaguin et al., 1978): *d'un côté, on comprend le mot comme étant un processus au travers duquel deux corps sont mis en présence et attachés (liés) l'un à l'autre, de telle sorte qu'une force extérieure ou un mouvement d'origine thermique est nécessaire pour rompre le lien. C'est cette acception qui est utilisée en théorie colloïdale lorsque l'on parle de phénomènes de coagulation. D'autre part, on peut examiner le processus de rupture d'un lien entre des corps qui sont déjà en contact : la force ou l'énergie nécessaire pour séparer les corps peut être interprétée comme une mesure quantitative de l'intensité de l'adhésion.*

L'adhésion présente donc deux aspects, suivant que l'on s'intéresse aux conditions et à la cinétique de formation du lien entre les corps en présence ou au processus de séparation. La première approche est évidemment la plus passionnante et intéressante même si, bien entendu, il est nécessaire de caractériser quantitativement le niveau d'adhésion par une mesure d'adhérence. Il est clair également que, chronologiquement, c'est le premier aspect qui préside à la création de l'interface.

Si deux corps, en l'occurrence un support en béton et une couche d'apport, sont capables de s'associer et de s'assembler, c'est parce que des liens se créent : au sens thermodynamique du terme, on peut dire que le travail d'adhésion est plus important que le travail de cohésion dans le matériau de réparation, c'est-à-dire que l'attraction est plus forte que la répulsion.

Si ces liens se créent, c'est qu'il y a une attirance potentielle et réciproque entre les deux corps. La transposition physiologique ou psychologique de ce phénomène pourrait nous faire dire que nous sommes ici devant un cas d'*appétence* (Courard et al., 1998).

L'*appétence*¹ est le désir instinctif ou la tendance qui porte² vers tout ce qui est propre à satisfaire un besoin ou un penchant naturels (LAROUSSE du XXe siècle, 1928 et ROBERT, 1977). Pour continuer dans le même ordre d'idées, l'appétence est donc la manifestation d'un ensemble de stimuli et de réponses qui influencent l'établissement des relations qui vont se créer.

Dans notre cas, ce terme englobe l'ensemble des propriétés physiques, chimiques et mécaniques du support, de la couche d'apport et de l'environnement, qui vont influencer une manifestation macroscopique de cette attirance, à savoir l'adhérence.

De l'appétence à l'adhérence, il existerait donc une relation de cause à effet : c'est parce qu'il y a une réactivité potentielle des corps mis en présence que l'on va pouvoir mesurer une adhérence significative par un essai de traction ou de traction-cisaillement. Toutefois, si nous pouvons mettre en évidence la cause et l'effet, il y a encore une étape intermédiaire et fondamentale à investiguer : quels sont réellement les liens qui se créent au niveau atomique, moléculaire ? Quelles sont les forces d'attraction-répulsion qui entrent en jeu et quelle est leur intensité ? Quelle est la cinétique du phénomène de mise en contact et quelle est son influence sur l'adhésion ? La notion d'*adhésion* englobe ces phénomènes que nous pourrions qualifier de "microscopiques" : sans appétence, il n'y a pas d'adhésion; sans adhésion, il n'y a forcément pas d'adhérence.

L'adhésion est donc un reflet du travail qu'il faut fournir pour séparer le substrat de la couche d'apport et dépend des propriétés thermodynamiques des matériaux durcis; l'appétence étudie plutôt l'ensemble des propriétés pour que le joint se crée dans les meilleures conditions, et notamment, les propriétés thermodynamiques du liquide (adhésif) appliqué sur le support.

2. ASPECTS THERMODYNAMIQUES

La thermodynamique a pour buts l'étude et la discussion de systèmes physiques et chimiques contenant un très grand nombre de particules, atomes ou molécules. L'étude de tout phénomène doit commencer par la séparation dans notre esprit d'une certaine région de l'espace ou d'une portion de matière, constituant le système étudié, d'une part, et de tout ce qui l'entoure et forme son environnement, d'autre part (Michel et al., 2003). Ces considérations nous amènent à définir le système qui nous occupe, à savoir l'interface. L'interface est la frontière, la zone de transition entre deux phases □ et □ homogènes

¹ du latin *appetentia*; de *appetere*, désirer

² l'appétence est donc bien un phénomène de transport

(Figure 2). Cette zone de transition est-elle un plan ou s'étend-elle sur une profondeur importante ? Plus qu'un plan, elle constitue en fait une zone où s'exercent des forces à très court rayon d'attraction.

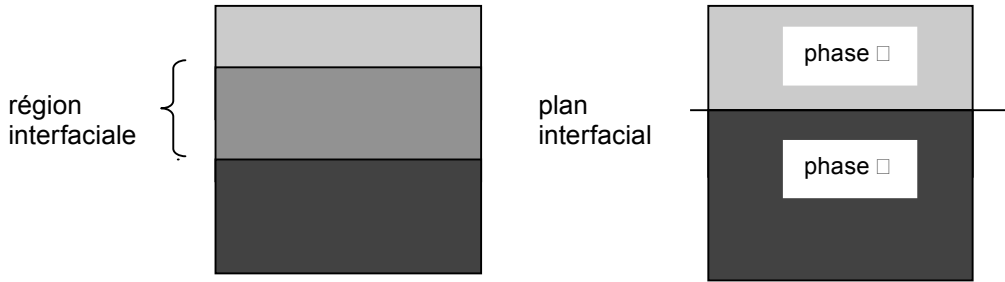


Figure 2 : interface entre un liquide (□) et sa vapeur (□) ou un solide et un liquide.

Il « suffit » donc de sélectionner les couples de produits qui « s'attirent » : sachant qu'un des produits est le béton à réparer, il convient de sélectionner le deuxième de façon à maximiser le travail d'adhésion ou de minimiser l'énergie interfaciale. Ce calcul peut être réalisé sur base de la détermination des énergies libres de surface des solides et liquides qui interviennent dans la création de l'interface. Plusieurs facteurs conditionnent la qualité des informations qui peuvent en être retirées : la rugosité, l'hétérogénéité chimique et la porosité du support, la stabilité chimique et physique de la phase liquide, la température et le temps.

De plus, il arrive régulièrement que le nombre de phases en présence ne soit pas deux mais trois (Figure 3) : l'eau peut venir perturber le difficile équilibre créé et empêcher le contact entre support et système de réparation (Courard et al., 1995).

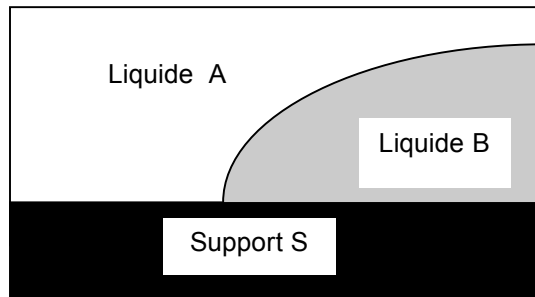


Figure 3 : mouillage d'un solide par deux liquides non miscibles (ici mouillage favorable au liquide B)

D'un point de vue strictement théorique, il s'agit d'une simple généralisation des lois de YOUNG et DUPRE, dans le cas d'une interface liquide-liquide et non plus liquide-air. L'angle de contact traduit, dans ce cas, la compétition entre les deux liquides pour la conquête de la surface solide. Que devient alors la condition d'étalement du liquide à la surface solide ? On peut montrer que le liquide qui a la plus forte tension d'adhésion a tendance à chasser l'autre de la surface (Courard, 2000).

Tableau 1 : détermination du travail d'adhésion W_A et du travail d'adhésion en présence d'eau W_{AL}

Interface	W_A	W_{AL}
Mortier / béton	87,8	sans objet
Résine acrylique / béton	74,1	22,7
Résine acrylique / résine acrylique	80,4	53,66
Résine époxy / béton	79,6	21,80
Résine époxy / époxy	92,4	53,00

Nous avons à comparer ici la tension d'adhésion de l'eau et celle de mortiers hydrauliques ou de produits synthétiques qui modifient les pâtes de ciment : c'est dans ce dernier cas en particulier que se posent des

problèmes, dans la mesure où les résines synthétiques couramment utilisées (époxy, métacrylates, acryliques, ...etc) présentent de faibles tensions de surface. Le tableau 1 illustre le calcul du travail d'adhésion à partir des valeurs sur matériaux divers (résine époxy, résine polyméthylméthacrylate) sur un support en béton. On observe que le travail d'adhésion chute fortement dans le cas de la présence d'eau pour les résines acrylique et époxy, alors qu'il ne change pas dans le cas des mortiers hydrauliques, ce qui est bien entendu logique mais fort important à mentionner.

3. EFFETS D'INTERPENETRATION MECANIQUE

La préparation de surface a pour buts essentiels d'éliminer les parties de béton contaminées ou peu cohésives, et de promouvoir l'accrochage du nouveau béton, par effet d'interpénétration mécanique (Cleland et al., 1992 et Fiebrich et al., 1994)). Le choix de la méthode de préparation a des conséquences directes sur la forme du profil obtenu (Courard et al., 2003) et, conséquemment, sur la facilité d'accrochage de la couche rapportée (Figure 4).

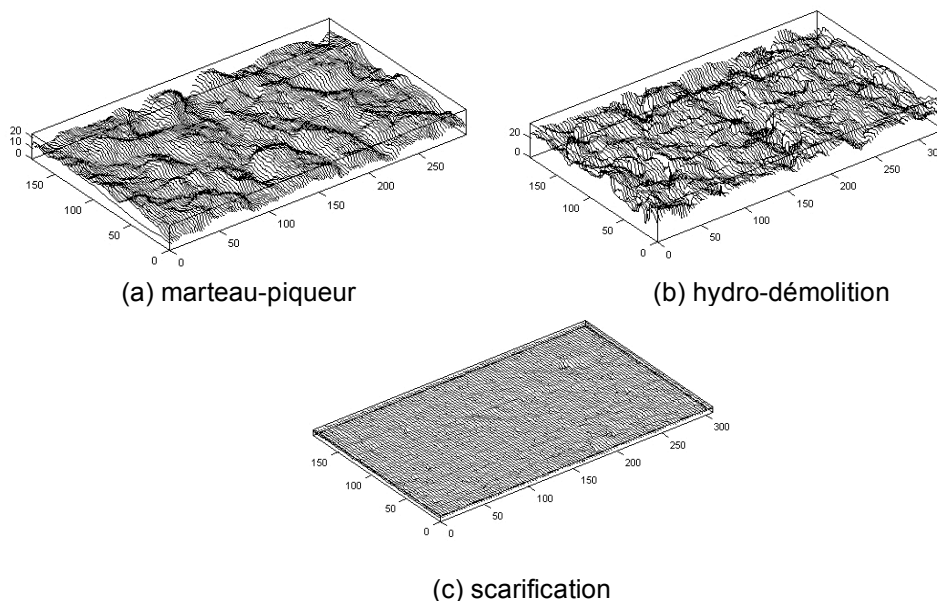


Figure 4 : vue 3D du support en béton après (a) marteau-piqueur, (b) hydro-démolition et (c) scarification

Des recherches sont actuellement en cours afin de définir exactement l'impact de la forme du profil sur la qualité de l'adhérence, mais aussi d'autres conséquences induites comme la cohésion de la couche superficielle. En effet, certaines techniques, outre le fait qu'elles augmentent la rugosité de surface, peuvent dégrader la couche superficielle en engendrant un réseau de fissures parallèles à la surface. Les figures 5 et 6 illustrent, par rapport à un support non traité (V), l'effet d'un traitement par polissage (P), sablage (SA), scarification (SC), hydro-démolition (H) et marteau piquage suivi d'un sablage (MPS) ; ce dernier traitement a été réalisé avec des marteaux de différentes masses, respectivement 7, 14 et 21 kg (Courard et al., 2005).

Les principaux enseignements tirés de ces observations indiquent clairement que le nombre (Figure 6) de fissures est de 2 à 4 fois plus grand pour la préparation au marteau-piqueur que pour les autres, tandis que la longueur totale (Figure 5) des fissures est beaucoup plus importante (4 à 25 fois). La masse de percussion utilisée est également significative : les dégâts sont plus conséquents pour la masse de 21 kg que pour les deux autres.

La scarification et le sablage ne semblent pas induire de dégradation majeure, tandis que l'hydro-démolition provoque une fissuration superficielle, moindre toutefois qu'avec le marteau-piqueur.

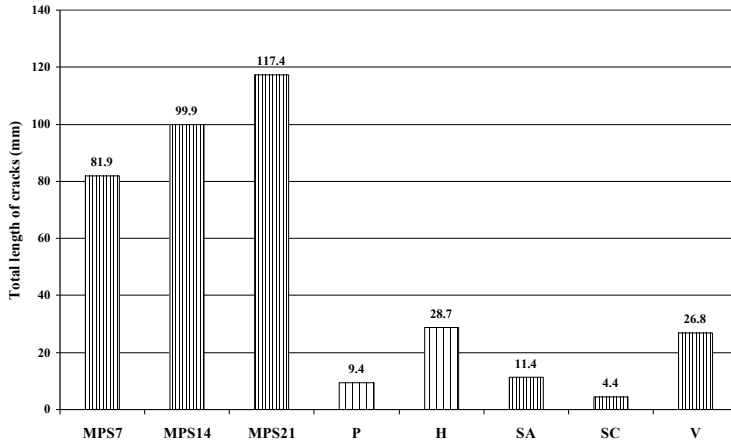


Figure 5 : longueur totale des fissures en fonction du type de préparation de surface

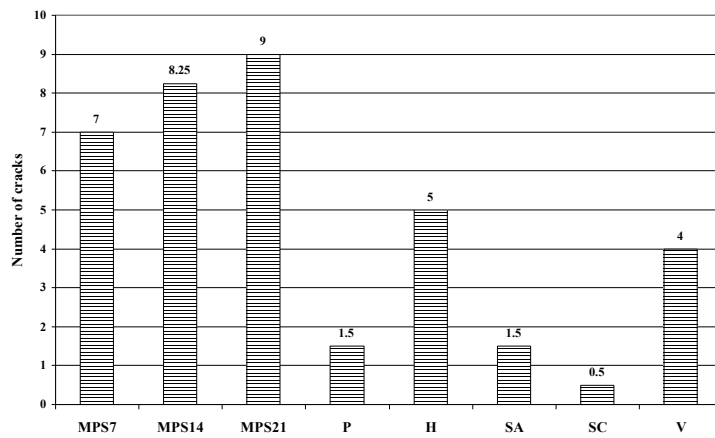


Figure 6 : nombre de fissures en fonction du type de préparation de surface

4. ADHERENCE ET REALITE

Il est parfois difficile de déterminer avec exactitude la cause des dégradations et, a fortiori, les causes des dégradations des réparations. Une étude a été réalisée dans le cadre de REHABCON (Tilly, 2004) et a montré que plus de 75% des dégâts étaient causés par une conception incorrecte (32%), un mauvais diagnostic (12%), une mauvaise mise en oeuvre (16%) et le choix inadéquat du matériau de réparation (32%) (Figure 7).

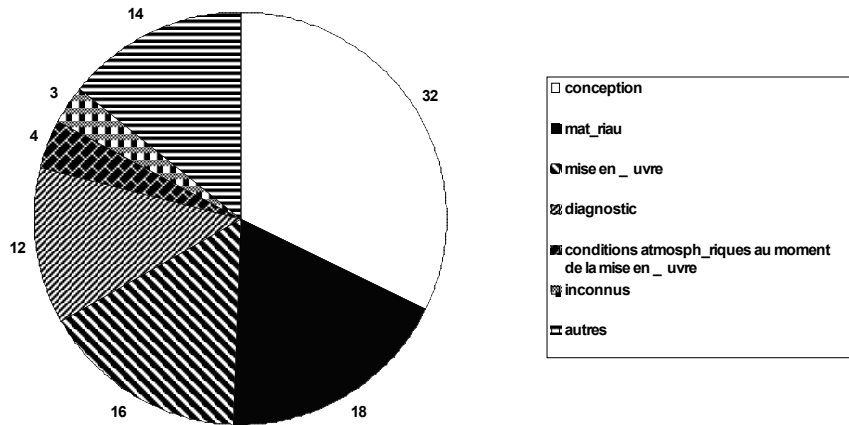


Figure 7 : causes des dégradations des réparations

La réalité de l'adhérence se mesure généralement sur base d'un essai d'adhérence en traction, parfois en torsion. C'est un essai par nature destructif, qui permet de mettre en évidence dans quelle mesure l'adhérence entre produits s'est « transformée » ou non en adhérence. D'autre part, il est intéressant d'investiguer au microscope ce qui se passe réellement à l'interface : des observations systématiques ont été réalisées sur des interfaces béton/barbotines de ciment.

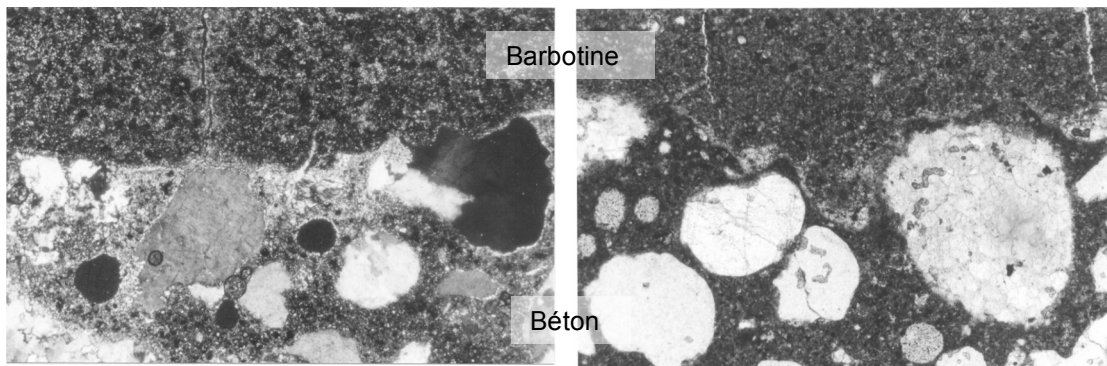


Photo 1 : support béton sablé saturé/barbotine

Photo 2 : support béton poli sec/barbotine

Des analyses sur lames minces au microscope, où la lumière blanche est remplacée par une source U.V., permettent de juger de la capillarité de la pâte de ciment du support, ainsi que de la barbotine. Une observation intéressante est relative à la présence sur un certain nombre de lames, d'un liseré de calcite CaCO_3 à l'interface entre barbotine et pâte de ciment (Photos 1 et 2). L'observation de ce phénomène n'est pas systématique mais semble plutôt affecter les dalles de béton saturées que les dalles sèches. Un autre élément intéressant ressortant des observations sur lames minces est la présence à l'interface d'une zone de plus grande porosité, dans la barbotine et dont l'épaisseur peut varier de 10 et 100 μm (Photo 3).

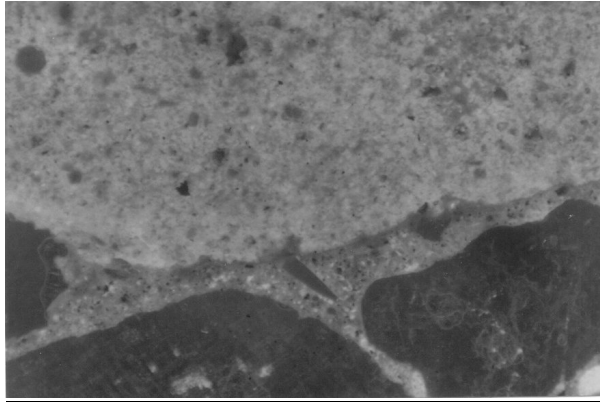


Photo 3 : zone interfaciale béton support poli sec/barbotine de ciment

La présence de cette zone résulte de mouvements d'eau à l'interface, qui peuvent être multiples:

- en cas de sursaturation du support en eau, il peut rester à la surface du béton un mince film d'eau qui, lorsque la barbotine est appliquée sur le support, provoque une augmentation du rapport E/C dans la zone de contact entre la barbotine et le film d'eau et, par voie de conséquence, amène une augmentation de la porosité interfaciale. Il est possible d'éviter ce phénomène en travaillant sur des supports saturés secs (SSS) mais l'eau peut rester bloquée dans les anfractuosités, ce qui est particulièrement vrai sur les dalles sablées;
- en cas de support sec, l'eau de la barbotine peut être absorbée rapidement (d'autant plus rapidement que l'on a affaire à un support poli) et provoquer une chute du rapport E/C. Ceci peut amener un manque d'eau à l'interface et une mauvaise hydratation du ciment.

Toutefois, l'observation des barbotines de ciment dans le cas des supports secs et saturés ne montre pas un degré d'hydratation différent et permet de conclure à une répartition homogène des grains de clinker non hydratés.

Si on compare les résultats mesurés en adhérence-traction avec ceux obtenus par support et par préparation de surface, on constate qu'il n'existe pas de règle générale quant à l'effet de cette zone interfaciale: tantôt les résultats sont supérieurs à la moyenne, tantôt ils sont inférieurs. Le type de rupture est variable, avec une prédominance de ruptures dans le béton (5 cas sur 6) dans le cas des supports polis secs. Cette zone interfaciale ne semble donc pas constituer une faiblesse dans le développement des capacités de résistance du composite. De plus, si on y regarde de plus près, on peut constater que cette zone se développe plutôt au droit de la pâte de ciment du support que de la partie granulat du support en béton, dans le cas où le support est sec tandis que la porosité de la zone interfaciale semble accentuée au droit des granulats lorsque le support est saturé. Ces observations sont bien entendu liées directement au pouvoir absorbant des deux éléments du composite.

Une analyse réalisée au microscope électronique à balayage a permis de mettre en évidence quelques différences entre supports saturé et sec. En effet, nous avons observé des échantillons de barbotine, côté face en contact avec le support : lorsque ce dernier est réputé sec, nous observons beaucoup plus de bulles d'air, essentiellement au niveau du contact barbotine/pâte de ciment (Photo 4). On distingue de ce fait assez nettement la limite des zones où la barbotine était en contact avec les granulats et avec la pâte de ciment.

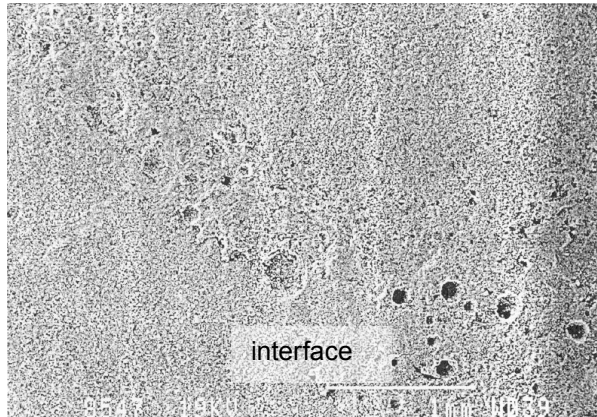


Photo 4 : vue de la barbotine de ciment – face inférieure en contact avec la dalle polie sèche

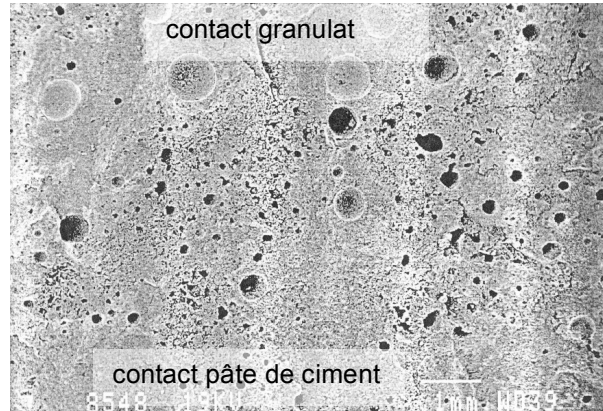


Photo 5 : vue de la barbotine de ciment – face inférieure en contact avec dalle sablée sèche

Cette observation est également valable pour les dalles polies et pour les dalles sablées. Néanmoins, on observe des bulles d'air aussi au niveau du contact granulat/barbotine dans le cas des dalles sablées, ce qui semble indiquer que les bulles sont piégées dans la rugosité (ondulation) du support. Ces bulles semblent être de dimensions importantes ($\sim 500 \mu\text{m}$) et de profondeur plus faible que dans le cas des dalles polies.

Une vue plus rapprochée de la surface de la barbotine en contact avec les granulats nous a révélé que ces derniers étaient, dans 80 % des cas, recouverts de pellicule plus ou moins fine (Photo 7). Cette observation est particulièrement nette sur le granulat présent sur la Photo 5 : on distingue en effet des zones plus sombres où le granulat est presque à nu et des zones plus claires où il est recouvert d'un voile provenant de la barbotine. Une vue rapprochée (Photo 6) permet de distinguer clairement les deux zones, et en particulier le voile présent sur le granulat, invisible à l'œil nu.

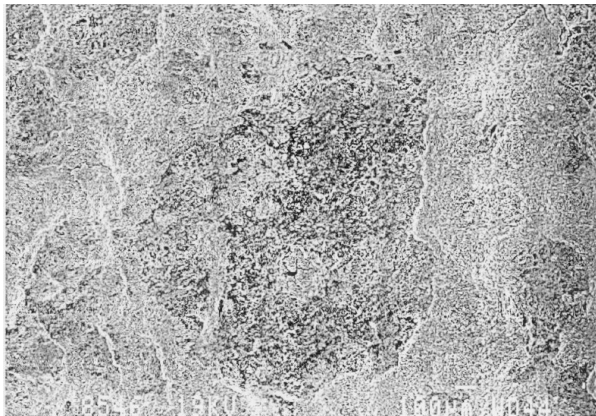


Photo 6 : vue d'une plage de la surface d'une dalle polie saturée recouverte de barbotine de ciment

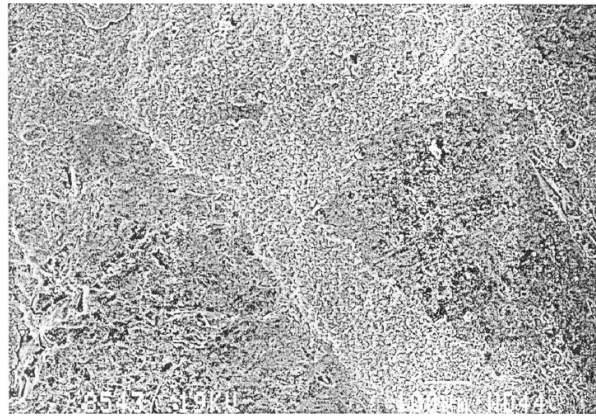


Photo 7 : vue d'un granulat à la surface d'une dalle polie saturée recouverte de barbotine de ciment

5. CONCLUSIONS

Les phénomènes se déroulant à l'interface entre le béton support et le nouveau béton sont complexes et dépendent d'un grand nombre de paramètres caractéristiques du support, de la couche d'apport mais aussi de l'environnement climatique, chimique ou humain. Se baser sur la notion d'appétence est un concept attrayant car il permet de formaliser un phénomène complexe d'interactions mécaniques et physico-chimiques entre solides et liquides : énergie libre de surface, rugosité, porosité, résistances, interpénétration mécanique et chimique, ..., tous ces facteurs agissent à un moment ou l'autre pour créer et assurer la stabilité de l'interface. Mais ces interactions solides/liquides se transforment peu à peu en

interactions solides/solides, à cause des réactions de prise et de durcissement des liants hydrauliques ou polymériques. Il est alors en quelque sorte trop tard pour améliorer les performances du nouveau composites ; c'est « avant » qu'il faut agir et, en ce sens, la compatibilité entre produits assemblés est une condition fondamentale de réussite, tout autant que les conditions dans lesquelles le « lien » sera créé.

Si la réparation des bétons peut être considérée comme une science, elle est loin d'être une science exacte : le nombre de facteurs qui interagissent est tel qu'il est encore difficile aujourd'hui de garantir la durabilité de la réparation. D'autant qu'un autre facteur tout à fait subjectif vient aussi interférer dans le process : le facteur humain.

REFERENCES

- Cleland, D. J., Yeoh, K.M. and Long, A.E. (1992) The influence of surface Preparation Method on the Adhesion Strength of Patch Repairs for Concrete, *Proceedings of the 3rd Colloquium on Materials Science and Restoration*, Esslingen, Germany, pp 858-871.
- Cleland, D.J. and all. (1986) Bond strength of patch repair mortars for concrete, in *Proceedings ISAP 86 Adhesion between polymers and concrete*, (ed. H.R. Sasse), Chapman and Hall, London, pp. 235-244.
- Courard, L., Degeimbre, R., Darimont, A. and Wiertz, J. (1995) Influence of the operating conditions and humidity on adherence of repair mortars.. In: ICPIC, VIIIth International Congress on Polymers in Concrete (Ed. D. van Gemert, KULeuven en KVIV), Oostende, 585-590.
- Courard, L. and Darimont, A. (1998) Appetency and adhesion: analysis of the kinetics of contact between concrete and repairing mortars.. in: RILEM International Conference, Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites (Eds A. Katz, A. Bentur, M. Alexander and G. Arliguie, E&FN Spon), Haïfa, Israël, 185-194.
- Courard, L. (2000) Parametric study for the creation of the interface between concrete and repair products", *Materials and Structures*, **33**, N° 225, pp. 65-72.
- Courard, L. and Nélis, M. (2003) Surface analysis of mineral substrates for repair works: roughness evaluation by profilometry and surfometry analysis, *Magazine of Concrete Research*, **55**(4) 355-366.
- Courard, L., Bissonnette, B. and Belair, N. (2005) Effect of surface preparation techniques on the cohesion of superficial concrete: comparison between jack-hammering and water-jetting. In: ICCRRR 2005 International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (Eds. H. Beushausen, F. Dehn and M.G. Alexander, 2006 Taylor & Francis Group, London), Cape Town, South Africa (21-23 Novembre 2005), 1027-1031.
- Derjagin, B.V., Krotova, N.A. and Smilga, V.P. (1978) "Adhesion of solids. Studies in soviet cience: physical sciences", Plenum Publishing Corporation, New York, 455 p.
- Fiebrich, M.H. (1994) "Influence of the surface roughness on the adhesion between concrete and gunite mortars overlays", Proceedings of the 2nd Bolomey Workshop, Adherence of young and old Concrete, Unterengstringen, Switzerland (Aedification Verlag ,Ed. F.Wittmann) 107-114.
- Garbacz, A., Czarnecki, L. and Clifton, J.R. (1999) "Non-destructive methods to assess adhesion between polymer composites and Portland cement concrete", Proceedings of the Second International Rilem Symposium on Adhesion between Polymers and Concrete, Dresden, Germany (ISAP'99,Ed. M. Puterman and Y. Ohama, Rilem Publications) 467-474.
- Kinloch, A.J. (1987). "Adhesion and adhesives: science and technology", (Chapman and Hall, London) 441 p.
- Michel, F. et Courard, L. (2003) Energies libres de surface des solides et liquides : une approche pour la compréhension des phénomènes interfaciaux. Journées scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation dans le domaine du béton, Sherbrooke (Québec), Canada (25-26 août 2003), 10p.
- Silfwerbrand, J. and Paulsson, J. (1998) "Better bonding of bridge deck overlays". *Concrete International* **20** (10) 56-61.

OCENA SKUTECZNOŚCI NAPRAW – WPŁYW JAKOŚCI PODKŁADU BETONOWEGO

Lech Czarnecki ¹⁾, Luc Courard ²⁾ Andrzej Garbacz ¹⁾

1) Politechnika Warszawska, Katedra Inżynierii Materiałów Budowlanych

2) University of Liege, Honorowy Profesor Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki
Warszawskiej

1. Wprowadzenie

Udział napraw i wzmocnień łącznie z pracami modernizacyjnymi wynosi ponad 60% całkowitej wartości rynku robót budowlanych w Europie [1]. Koszt stosowanych materiałów naprawczych, należących zwykle do zaawansowanej technicznie grupy kompozytów budowlanych, jest wysoki - ponad 50% kosztów ogólnych. Zapewnienie skuteczności napraw jest traktowane jako wyzwanie cywilizacyjne. Zagadnienie to stanowi genezę obecnie wprowadzanej normy europejskiej o statusie normy polskiej PN-EN 1504 „Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności”. Obejmuje ona kompleksowo problematykę stosowania wyrobów i systemów do napraw, a jej istotną częścią jest arkusz 10 zawierający zalecenia stosowania wyrobów lub systemów naprawczych na placu budowy oraz kontroli jakości przeprowadzonych prac [2] zależnie od przyjętej metody naprawy. W normie PN-EN 1504 wyróżnia się cztery zasadnicze etapy kontroli jakości:

- ocena stanu podłoża przed i/lub po przygotowaniu,
- tożsamość wszystkich stosowanych wyrobów,
- zapewnienie wymaganych warunków przed i/lub podczas stosowania wyrobów,
- ocena właściwości końcowe w stanie utwardzonym.

Zawarte w normie zalecenia mają charakter ogólny. W ocenie wpływu jakości podkładu betonowego wykorzystuje się obecnie metody Inżynierii Powierzchni Betonu (IPB). Głównym zadaniem Inżynierii Powierzchni Betonu w tym zakresie jest jakościowe i ilościowe określenie wpływu jakości powierzchni betonu na ich skuteczność [3]. Wykorzystanie tej koncepcji w kształtowaniu adhezji w układach naprawionych oraz ocenie skuteczności napraw było przedmiotem długoletniej współpracy między Katedrą Inżynierii Materiałów Budowlanych Politechniki Warszawskiej (KIMB PW) a University of Liege (UL) w ramach międzyrządowych projektów badawczych.

2. Ocena jakości podkładu betonowego

2.1. Wymagania ogólne

Właściwe przygotowanie powierzchni betonu, a w konsekwencji uzyskanie wysokiej przyczepności materiału naprawczego do podkładu betonowego, jest od lat intuicyjnie określane jako jeden z głównych czynników wpływających na skuteczność napraw [4]. Norma PN-EN podaje tylko ogólne sformułowania co do wyboru metody obróbki (tabl.1)

Wybór metody obróbki jest zawsze powiązany z efektem jaki chcemy uzyskać. Należy przy tym uwzględnić mechanizm usuwania warstwy betonu i stopień agresywności z tym związany.

Tablica 1. Metody oczyszczania, uszorstniania i usuwania betonu wg PN-EN 1504-10

	Metoda	Cel
Oczyszczanie	<ul style="list-style-type: none"> – mechaniczne, przez młotkowanie i ścieranie – oczyszczanie strumieniowo-ścierne – oczyszczanie strumieniem wody o niskim ciśnieniu, do ok. 18 MPa lub do ok. 60 MPa w przypadku ograniczeń w ilości wody 	podłoże powinno być wolne od pyłu, luźnych fragmentów materiału, zanieczyszczenia powierzchni oraz materiałów zmniejszających przyczepność lub uniemożliwiających zwilżanie przez materiały naprawcze; oczyszczone podłoże powinno być chronione przed dalszym zanieczyszczeniem
Uszorstnianie	<ul style="list-style-type: none"> – mechaniczne, przez młotkowanie i ścieranie – oczyszczanie strumieniowo-ścierne – oczyszczanie strumieniem wody o wysokim ciśnieniu, do ok. 60 MPa 	Uzyskanie tekstury uszorstnionej powierzchni odpowiedniej dla stosowanych wyrobów i systemów należy określić teksturę uszorstnionej powierzchni, która powinna być zgodna z wymaganiami producenta wyrobów
Usuwanie	<ul style="list-style-type: none"> – Mechaniczne, przez młotkowanie – Oczyszczanie strumieniem wody o wysokim ciśnieniu, do ok. 60 MPa i o bardzo wysokim ciśnieniu, do 110 MPa 	Słaby, uszkodzony i zniszczony beton, a tam, gdzie to konieczne, także beton nieuszkodzony powinien być usunięty zgodnie z zasadą i metodą wybraną według normy PN-EN 1504-9.

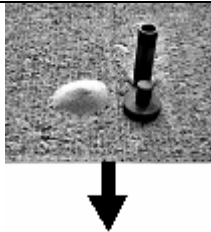
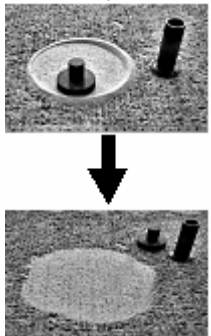
2.2. Charakterystyka szorstkości powierzchni

Najprostsza metodą oceny szorstkości powierzchni jest metoda wizualna. Na przykład International Concrete Repair Institute [5] w USA opracował 9 wzorców porównawczych do oceny profilu szorstkości betonu po obróbce. Profile CSP (Concrete Surface Profile) ponumerowano od 1 (prawie gładki) do 9 (bardzo chropowaty) wraz z przyporządkowanym im modelowym obróbkom. Należy tu jednak zauważyć, że tekstura i wygląd otrzymanego profilu zależy od wielu czynników takich jak: wytrzymałość, wielkość i rodzaj kruszywa, a także wykończenie powierzchni. W związku z tą niejednoznacznością jednym z celów inżynierii powierzchni betonu jest znalezienie miarodajnych wskaźników opisujących strukturę geometryczną powierzchni.

Norma PN-EN 1504-10 w części dotyczącej uszorstnienia zamieszcza wymagania dotyczące określenia zalecanej tekstury powierzchni. Przywołuje ona dwie metody oznaczania szorstkości – profilometrię i metodę piaskową. Metody piaskowe (tabl.2) oparte są na pomiarze głębokości makrotekstury powierzchni metodą objętościową. Polegają one na ostrożnym rozprowadzeniu znanej objętości materiału ziarnistego na nawierzchni i obliczeniu całkowitej powierzchni nim pokrytej. Bardziej szczegółową charakterystykę rozwinięcia powierzchni można uzyskać stosując profilometrię mechaniczną i laserową [6,7]. W profilometrze mechanicznym rysik (rys.1a) przesuwają się po powierzchni, a jego zmiana położenia w pionie i w poziomie jest rejestrowana przez komputer tworząc profil powierzchni. Zasada działania profilometru laserowego (rys.1b) opiera się na pomiarze

odległości między emitery wiązki laserowej a powierzchnią na podstawie różnicy czasu wyjścia i przyjścia. Na tej podstawie konstruowany jest obraz powierzchni. Wadą tej metody jest rozpraszanie wiązki laserowej wewnątrz ziaren niektórych rodzajów kruszywa, np. kwarcu. Odmianą techniki laserowej jest opto-morfologia, w której wykorzystuje się tzw. projekcję prążków Moire'a [8]. Zaletą tej metody jest możliwość stosowania jej bezpośrednio na obiekcie (rys.1c). Badania przeprowadzone w KIMB PW i UL [9] wskazują, że test piaskowy daje dobre oszacowanie uśrednionego profilu szorstkości (rys.2a). Nie dostarcza natomiast informacji o innych parametrach profilu (rys.2b), które mogą być istotne przy opracowaniu projektu naprawy, np. objętości materiału naprawczego.

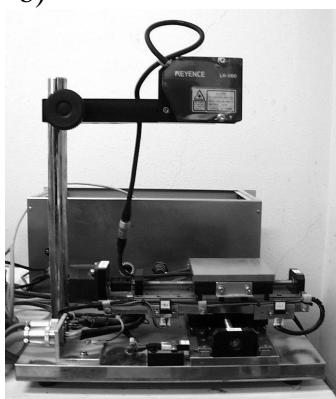
Tablica 2. Metody piaskowe charakteryzowania szorstkości powierzchni betonowych

Norma/obiekt	Schemat	Rodzaj materiału ziarnistego	Parametr
PN-EN 13036-1 Nawierzchnie drogowe i lotniskowe		kulki szklane d = 0,18÷0,25mm Zalecana objętość: 25 ml	średnia głębokość tekstury MTD [mm]: $MTD = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2}$ gdzie: V – objętość próbki materiału ziarnistego [mm ³], D – średnica koła pokrytego materiałem ziarnistym [mm]
PN-EN 1766 Wyroby i systemy do napraw i ochrony przed korozją konstrukcji betonowych		piasek kwarcowy d=0,05÷0,1mm, wysuszony do stałej wagi Zalecana objętość: 25 ml	Wskaźnik szorstkości (oznaczany czasami jako SRI od Surface Roughness Index): $SRI = \frac{V}{D^2 \cdot 1272}$ gdzie: V – objętość próbki materiału ziarnistego [mm ³], D – średnica koła pokrytego materiałem ziarnistym [mm]

a)



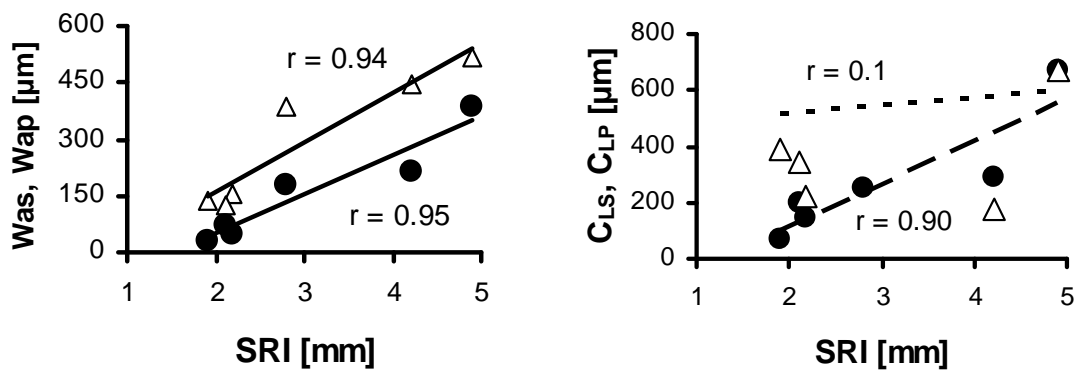
b)



c)

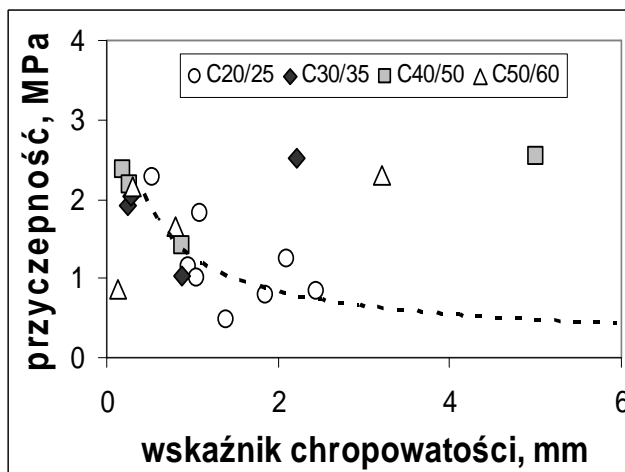


Rys. 1. Przykłady profilometrów: a) mechaniczny, b) laserowy, c) laserowy wykorzystujący metodę opto-morfologii



Rys.2. Zależność między indeksem chropowatości SRI i: a) średnią falistością profilu wyznaczoną za pomocą profilometru laserowego - Was (Δ) i mechanicznego Wap (\bullet) oraz b) odpowiednio parametrem C_L charakteryzującym głębokość dolin profili otrzymanych za pomocą profilometru laserowego i mechanicznego

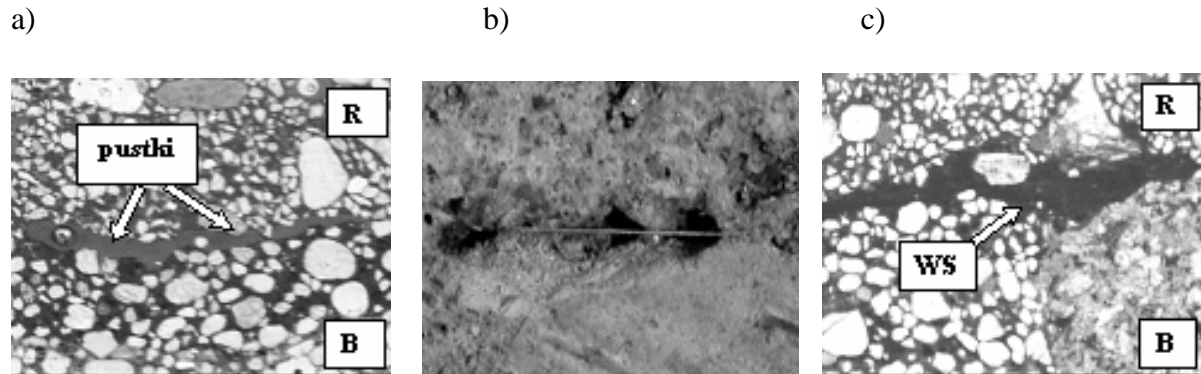
Wpływ stopnia rozwinięcia powierzchni, wynikający z zastosowanej obróbki powierzchni betonu, na przyczepność jest niejednoznaczny [10]. Badania prowadzone w Politechnice Warszawskiej we współpracy z Uniwersytetem w Liege (rys.3) wskazują, że wzrost uszorstnienia powierzchni jest korzystny w przypadku podkładów wykonanych z betonów wyższych klas wytrzymałości [11]. Przeciwną tendencję obserwuje się dla betonów niższych klas wytrzymałości, gdyż obróbki dające większe uszorstnienie powodują jednocześnie większe uszkodzenie przypowierzchniowej warstwy betonu (mikropęknięcia) [12].



Rys.3. Zmiana przyczepności ze wzrostem wskaźnika podkładów betonowych różnych klas wytrzymałości poddanych obróbkom powierzchniowym o zróżnicowanej agresywności

Z punktu widzenia szorstkości powierzchni po obróbce istotna jest również właściwa konsystencja mieszanki zaprawy naprawczej. Mała urabialność mieszanki zaprawy może skutkować niecałkowitym wypełnieniem przez nią nierówności powierzchni powodując spadek przyczepności (rys.4a). W wielu przypadkach mała urabialność zapraw jest wynikiem obecności zbrojenia rozproszonego (np. mikrowłókien szklanych) jako dodatku obniżającego ich skurcz utwardzania. Jeśli odległość między pikami profilu jest mniejsza niż długość włókien można obserwować blokowanie ich na nierównościach powierzchni i w

konsekwencji utrudnione wypełnienie tych miejsc zaprawą (rys.4b). W tej sytuacji często konieczne jest stosowanie warstwy szczepnej wypełniającej nierówności powierzchni i zwiększającej adhezję mechaniczną (mechaniczne klinowanie). Dodatkowo zmniejsza ona skutki stosowania agresywnych obróbek wypełniając większe zarysowania i wiążąc fragmenty betonu luźno związane z podkładem (rys. 4c).

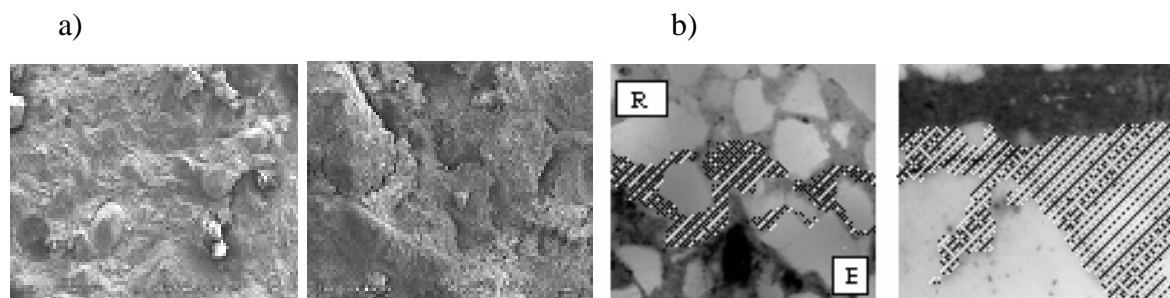


Rys. 4. Przykładowe widoki płaszczyzny zespolenia dla układu naprawczego: (a) układ bez warstwy szczepnej, w których podkład betonowy poddano frezowaniu mechanicznemu, (b) przykład pustek powstających w wyniku blokowania mikrowłókien szklanych na nierównościach powierzchni podkładu betonowego poddanego piaskowaniu, (c) poprawa jakości zespolenia w układach z warstwą szczepną; R- materiał naprawczy, B – podkład betonowy, WS – warstwa szczepna

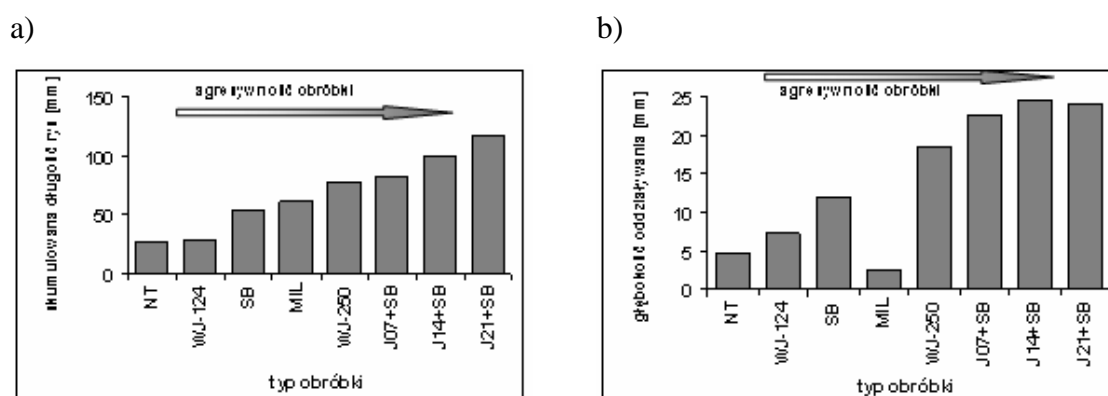
2.3. Ocena stopnia zarysowania

Rodzaj zastosowanej obróbki powierzchniowej wpływa nie tylko na stopień uszorstnienia podkładu, ale powoduje również powstanie mikrorys (Rys.5). Mogą one stanowić, źródło potencjalnych uszkodzeń podczas użytkowania naprawionego obiektu. Wielu autorów wskazuje obecność rys i mikrorys w warstwie przypowierzchniowej wynikająca z zastosowanej obróbki powierzchniowej jako główny czynnik obniżający przyczepność w układach naprawczych [np.10,12]. Do jakościowej analizy stopnia zarysowania betonu oprócz obserwacji wizualnych (badania makroskopowe) wykorzystuje się coraz częściej techniki mikroskopowe. Pojawienie się nowych technik eksperymentalnych rozszerzyło możliwości obserwacji i oceny rys. Przy obserwacjach makroskopowych dokonuje się identyfikacji dużych rys, raków, dużych pustek i obszarów silnie porowatych. Obserwacje mikroskopowe umożliwiają wykrycie drobnych rys w zaczynie, kruszywie i strefie przejściowej zaczyn-kruszywo lub zaczyn-zbrojenie i porów. Zależnie od przyjętego poziomu obserwacji stosuje się mikroskopy optyczne (powiększenia głównie z zakresu 10 do 100x) lub skaningowe mikroskopy elektronowe - SEM (powiększenia rzędu 100 - 500x). Do opisu cech geometrycznych układu mikrorys wykorzystuje się coraz częściej metody stereologiczne wspomagane automatyczną analizą obrazu [np. 13, 14]. Pewna trudność stanowi tu konieczność uzyskania odpowiedniej jakości obrazu.

Badania przeprowadzone w KIMB PW oraz w UL [11, 15] potwierdziły wpływ obróbki na obecność rys w podłożu (Rys.6a). Ze wzrostem agresywności rosła skumulowana długość rys. Agresywność danego typu obróbki może być regulowana jej parametrami, np. ciężar młota pneumatycznego, ciśnienie w obróbce hydrodynamicznej. Istotnym wnioskiem praktycznym wynikającym z badań jest spostrzeżenie, że dla większości obróbek głębokość oddziaływania obróbki nie przekraczała 2,5 cm (Rys.6b).



Rys.5. Przykłady a) ukształtowania powierzchni podkładów betonowych po frezowaniu uzyskana za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego przy pow.25 i 100x oraz b) uwidocznienia uszkodzeń płaszczyzny zespolenia za pomocą mikroskopu świetlnego dzięki zastosowaniu iniekcji żywicy epoksydowej; obszary niebieskie wskazują miejsca podkładu osłabione w wyniku zastosowania obróbki powierzchniowej betonu



Rys. 6. Wpływ rodzaju obróbki na stopień zarysowania: (a) skumulowana długość rys dla betonu C40/50; (b) głębokość oddziaływania obróbki wg kryterium zarysowania dla betonu C40/50; NT – bez obróbki; WJ - lanca wodna – ciśnienie 124 i 250MPa; SB – piaskowanie; MIL – frezowanie; WJ-250 – lanca wodna (250MPa); J+SB – obróbka młotem pneumatycznym o ciężarze 7, 14, 21 kg + piaskowanie

Badania stopnia zarysowania na obiekcie są trudniejsze do przeprowadzenia. Można je przeprowadzić na obróbkach pobranych na obiekcie. Siłą rzeczy będą one miały charakter selektywny. Z tego względu poszukiwane są metody pozwalające na określenia stopnia zarysowania podkładu betonowego bezpośrednio na obiekcie, ze szczególnym uwzględnieniem metod nieniszczących. Jedną z tego rodzaju technik jest pomiar powierzchniowej przepuszczalności wody [16]. Wstępne wyniki badań prowadzonych obecnie na Politechnice Warszawskiej wskazują na różnicowanie powierzchniowej przepuszczalności wody zależnie od zastosowanej obróbki podkładu betonowego.

3. Ocena skuteczności napraw

Ocena skuteczności naprawy ukierunkowana jest głównie na badania jakości warstwy materiału naprawczego i strefy łączącej (tabl.3). Najważniejszym parametrem tej oceny jest wartość przyczepności przy odrywaniu (metoda „pull-off”). Z punktu widzenia metodyki badawczej, jak i analizy uzyskiwanych wyników, nieniszcząca ocena stanu układu: materiał naprawczy - podkład betonowy jest zagadnieniem trudniejszym niż badania betonu. Dobór metody NDT do oceny skuteczności napraw betonu powinien uwzględniać [17]: typ i wymiary defektów, typ materiału naprawczego (mineralny lub polimerowy), grubość warstwy

(lub warstw) materiału naprawczego, stan powierzchni podkładu betonowego, możliwość prowadzenia badań przy dostępie z jednej strony.

Tablica 3. Zestawienie cech badanych podczas kontroli skuteczności wybranych metod naprawy wg EN 1504-10:2005

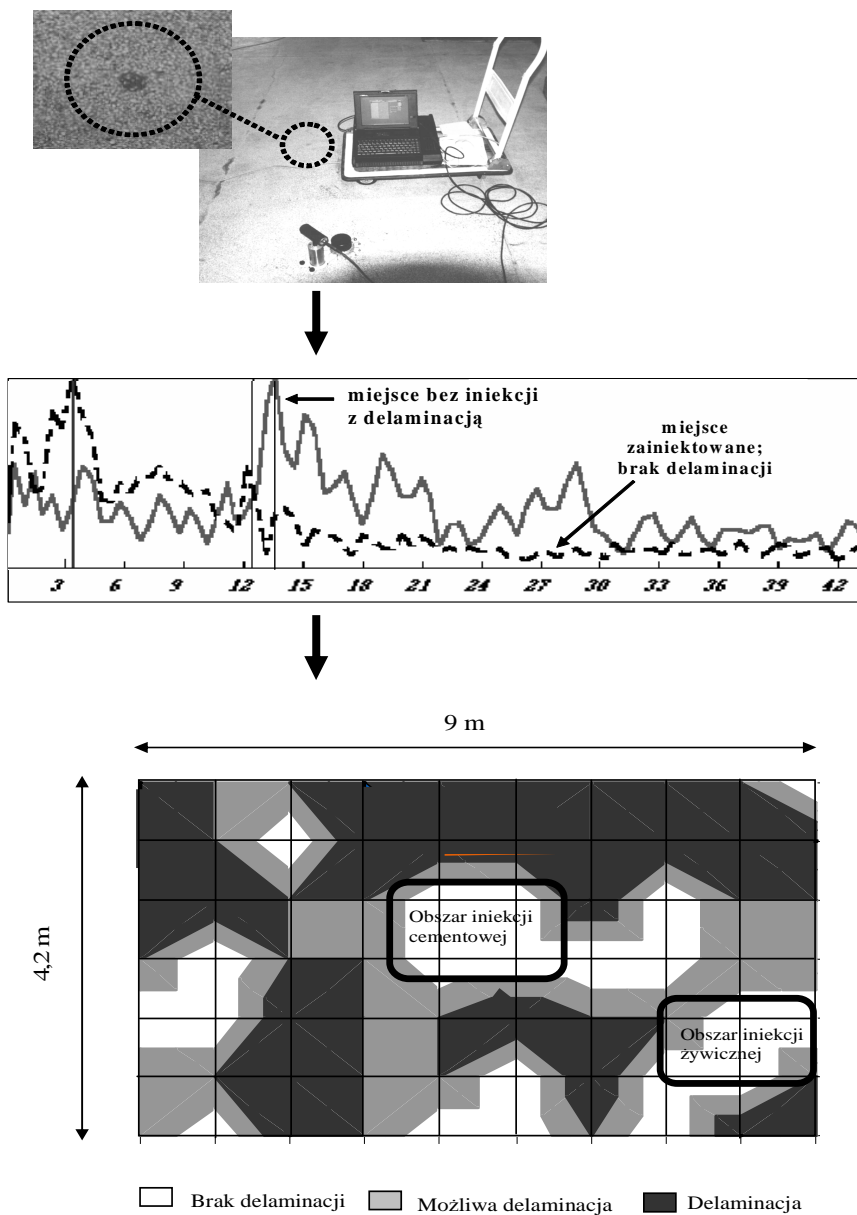
Numer badania lub obserwacji	Cecha *)	Metoda badania lub obserwacja	Metoda naprawy				Norma
			Powłoki ochronne	Wypełni a-nie rys, pustek i szczelin	Zaprawy lub betony do uzupełniani a ubytków	Wzmacnia -nie płytami lub taśmami	
1	Rozwarstwienie	Opukiwanie młotkiem (T)			■		
15	Oporność elektryczna	Wenner test (T)			□		
29	Grubość powłoki lub zaprawy po utwardzeniu	Siatka nacięć (T) lub metoda objętościowa (T) lub wizualnie na próbkach walcowych lub metoda covermeter	■		■	◆	ISO 2808 EN12504-1
30	Zdolność krycia	Wizualnie (O)	■				ISO4628-1-6:2003-04
32	Przepuszczalność	Karsten test (T); Badania przepuszczalności na próbkach walcowych (T)	◆	◆	◆		EN-12390-8 ISO-7031
33	Stopień wypełnienia rys	wizualnie na próbkach walcowych lub metoda ultradźwiękowa		◆			
35	Przyczepność powłoki lub zaprawy	Siatka nacięć (T) “Pull-off” test (T)	■	■	■		EN ISO 2409-6 & ISO 4624 EN 1542-1
36	Wytrzymałość na ściskanie	Oznaczenie wytrzymałości na próbkach walcowych wyciętych z podkładu (T) lub sklerometr (T)			■		EN 12504-1 EN 12504-2
37	Gęstość po stwardnieniu	Metoda suszenia			■		EN-12390-7
38	rysy skurczowe	Czujniki mechaniczne lub elektroniczne (O)			■		
39	pustki w i pod warstwą materiału naprawczego	Metoda ultradźwiękowa lub radiografia lub wizualnie na próbkach walcowych			◆		EN 12504-4 ISO 8047 EN 12504-1
42	Obecność porów w i pod warstwą płyt wzmacniaj.	Impact-echo lub opukiwanie młotkiem lub metody ultradźwiękowe				■	EN 12504-4 ISO 8047
43	Nośność konstrukcji	Obciążanie próbne				◆	
44	Przyczepność materiału wypełniającego rysę do podłoża	Wizualnie na próbkach walcowych oznaczenie wytrzymałości na ściskanie na próbkach walcowych		□			
45	Kolor i tekstura powierzchni	Wizualnie			◆		

■ – we wszystkich przypadkach; ◆ - w szczególnych warunkach użytkowania; □ - w zastosowaniach specjalnych.

T : badanie O: obserwacja

* - nie uwzględniono cech przewidzianych dla kontroli skuteczności takich metod naprawy jak: impregnacja i hydrofobizacja, wzmacniania dodatkowym zbrojeniem stalowym oraz zabezpieczania zbrojenia powłokami

W przypadku układów wielowarstwowych, wpływ na propagację fal sprężystych może mieć różnica impedancji akustycznych (iloczyn gęstości i prędkości fali) poszczególnych elementów układu naprawczego. Podatność powierzchni rozdziału dwóch ośrodków do odbicia fali sprężystej charakteryzowana jest współczynnikiem odbicia, R . Doświadczenia badawcze oraz analizy numeryczne przy stosowaniu metody I-E wskazują, że granica rozdziału jest „widoczna”, jeśli R jest większe od $+0,24$ [18,19]. Właściwości akustyczne kompozytów typu PCC [20], podstawowego typu materiałów naprawczych, wykazują niewielkie zmiany ($<10\%$) dla szerokiego zakresu zawartości polimeru (0-30%) i są zbliżone do wartości charakterystycznych dla zapraw i betonów cementowych. Istnieje możliwość wykorzystania metod badania elementów betonowych również do badania układów naprawczych (rys.7). Wpływ odbicia fali od powierzchni zespolenia powinien być uwzględniany w przypadku stosowania takich materiałów, jak np. powłokowe kompozyty polimerowe czy nawierzchnie asfaltowe.



Rys. 7. Przykład zastosowania metody impact-echo do oceny skuteczności naprawy (mapa delaminacji między posadzką mineralną a podkładem betonowym)

Można się spodziewać, że w ocenie skuteczności napraw coraz częściej wykorzystywane będą zaawansowane metody analizy sygnału. Oprócz powszechnie stosowanej analizy fourierowskiej i spektralnej (rozkład prędkości fazowych) wrasta zainteresowanie nowymi metodami. Jedną z nich jest analiza falkowa, która daje możliwość analizy częstotliwościowo-czasowej [21]. Badania przeprowadzone w KIMB PW wskazują, że uwzględnienie parametrów charakteryzujących szorstkość powierzchni zespolenia zwiększa dokładność wnioskowania o jakości powierzchni zespolenia.

4. Podsumowanie – tendencje rozwojowe

Znaczenie właściwego przygotowania podkładu betonowego przed nałożeniem nań warstwy naprawczej, powłoki lub polimerowego systemu ochronnego podkreślono zarówno w normie europejskiej PN-EN 1504-10, jak i amerykańskich wytycznych ACI Concrete Repair Manual [5]. Szczególne znaczenie ma dobór odpowiedniej obróbki powierzchni. Analiza relacji między właściwościami powierzchni betonu a skutecznością napraw stanowi ważne zadanie badawcze inżynierii powierzchni betonu. Tego rodzaju analiza wymaga dysponowania odpowiednimi narzędziami badawczymi. Badania przeprowadzone w Politechnice Warszawskiej i Uniwersytecie w Liege wskazują, że większe uszorstnienie odgrywa korzystną rolę w przypadku betonów wyższych klas wytrzymałości. W odniesieniu do betonów niższych klas większą rolę w kształtowaniu przyczepności odgrywają mikropęknięcia, których gęstość rośnie z agresywnością zastosowanej obróbki powierzchniowej. Można oczekiwać, że jednym z ważniejszych kierunków rozwoju inżynierii powierzchni będzie opracowanie metod szybkiej oceny szorstkości i mikrozarzysowania.

W zakresie metod oceny skuteczności należy spodziewać się wzrostu znaczenia metod nieniszczących, dzięki postępowi zarówno w odniesieniu do aparatury badawczej, jak i coraz częściej wykorzystywanych metod zaawansowanej analizy sygnału. Świadczy o tym stale rosnąca liczba publikacji traktujących o zastosowaniu metod NDT w ocenie betonu.

Podziękowania

Praca powstała w ramach wspólnego projektu badawczego Polska (MNiSW) – Walonia (DRI), Belgia. Artykuł finansowano ze środków pracy statutowej PW – grant 504 G 1080 7007.

5. Literatura

- [1]. Czarnecki L., Emmons P., Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych, Wyd. Polski Cement, Kraków, 2002, ss.430
- [2]. PN-EN 1504. Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności. Stosowanie wyrobów i systemów na placu budowy oraz kontrola jakości prac
- [3]. Garbacz A., Piotrowski T., Inżynieria powierzchni w naprawach konstrukcji betonowych, Trwałość i skuteczność napraw obiektów budowlanych (ed. M.Kamiński, J.Jasiczak, W.Buczowski, T.Błaszczyszki), Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2007, s.31-41
- [4]. Czarnecki L, Chmielewska B. Factors affecting adhesion in building joints. Cement-Lime-Concrete, 2005; 2:74-85
- [5]. Concrete Repair Manual, ACI International, Farmington Hills, MI, USA, 2003
- [6]. Courard L, Nélis M. Surface analysis of mineral substrates for repair works: roughness evaluation by profilometry and surfometry analysis. Mag Conc Res 2003; 55: 355-366

- [7]. Liubimov V, Oczóś K. Geometrical structure of surface (in Polish). Rzeszów, Politechnika Rzeszowska. 2003:pp;.352
- [8]. Courard L., Perez F., Bissonnette B., Górka M., Garbacz A., Two different techniques for the evaluation of concrete surface, In: ICCRRR 2005 International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Cape Town, South Africa, 2005, 1015-1020
- [9]. Garbacz A., Courard L., Kostana K., Characterization of concrete surface roughness and its relation to adhesion in repair systems, *Materials Characterization*, 56, 2006, s.281-28
- [10]. Silfwerbrand J., Paulsson J., Better bonding of bridge deck overlays, *Concrete International*, 1998, 10, s.56-61
- [11]. Courard L., Schwall D., Garbacz A., Piotrowski T., Effect of concrete substrate texture on the adhesion properties of PCC repair mortar, *Proc. of Inter. Symposium on Polymers in Concrete. ISPIC 2006*, Guimaraes, Portugal (2-4 April 2006), 99-110
- [12]. Garbacz A, Górka M, Courard L. On the effect of concrete surface treatment on adhesion in repair systems. *Mag Conc Res* 2005; 57: 49-60
- [13]. Coster M., Chermant J-L. Image analysis and mathematical morphology for civil engineering materials, *Cement and Concrete Composites*, 23, 2001, 133-151
- [14]. Glinicki M.A., Litorowicz A.: Digital analysis of microscopic images for crack system evaluation in concrete elements, W "Adhesion in Interfaces of Building Materials: a Multi-scale Approach" (ed. L. Czarnecki and A. Garbacz), *Advances in Materials Science and Restoration AMSR No. 2*, Aedificatio Publishers, 2007, s.127-139
- [15]. Courard, L., Bissonnette, B., Belair, N. Effect of surface preparation techniques on the cohesion of superficial concrete: comparison between jack-hammering and water-jetting. In: ICCRRR 2005 International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Cape Town, South Africa, 1027-1031 (2005)
- [16]. Courard L., Garbacz A., Niewęglowska-Mazurkiewicz A., Piotrowski T., *Inżynieria powierzchni betonu. Część 2. Wpływ obróbki na zarysowanie betonu*, *Materiały Budowlane*, 2006, 12, s.8-11
- [17]. Garbacz A. Nieniszczące badania betonopodobnych kompozytów polimerowych za pomocą fal sprężystych – ocena skuteczności napraw, *Prace Naukowe, Budownictwo*, z.147, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2007, stron 208
- [18]. Sansalone M., Street W. B., *Impact–echo. Nondestructive evaluation of concrete and masonry*, Bulbrier Press, Ithaca NY, 1997
- [19]. Garbacz A., Kwaśniewski L., Modeling of stress wave propagation in repair systems tested with impact-echo method, *Brittle Matrix Composites 8 – BMC8*, Warszawa, 2006, s.303-314
- [20]. Garbacz A., Łukowski P., Bęcek J., Wpływ zawartości polimeru na propagację fali ultradźwiękowej w kompozytach polimerowo-cementowych. 33 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Poznań – Licheń, 2004, *Zeszyty Problemowe Badania Nieniszczące*, nr 9, 2004, 83-88
- [21]. Garbacz A., Piotrowski T., Courard L., A 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* (Ed. J. Marchand, B.Bissonnette, R.Gagne, M.Jolin, F.Paradis), Quebec, Canada, 2006



29 novembre 2010
Anniversaire et session protocolaire

17.00

Discours de bienvenue de
M. le Prof. B. Rentier,
Recteur de l'Université de Liège

17.15

"Ingénierie des matériaux en Pologne
et en Wallonie - 10 ans d'expériences",
Prof. A. Garbacz, Politechnika
Warszawska et Prof. L. Courard,
Université de Liège

17.30

"Projets de coopération et formation
des jeunes chercheurs" T. Piotrowski,
Politechnika Warszawska et A. Van der Wielen, Université de Liège

17.45

Discours de Mme la Prof. B. Chmielewska, Vice-Doyenne
aux affaires académiques, Faculté d'Ingénierie
Civile, Politechnika Warszawska

18.00

Discours de M. Ch. Carette, Inspecteur Général à Wallonie-Bruxelles
International

18.15

Discours de S. E. M. S. Czarlewski,
Ambassadeur de la République de Pologne

18.30

Conclusions et remerciements,
Prof. L. Courard, Université de Liège