

Development of a Crack-Resistant Rubber-Modified Cementitious Repair Material

From compatibility concepts to the field

by Alexander M. Vaysburd, Benoit Bissonnette, and Christopher D. Brown

Rehabilitating concrete infrastructure is one of the most significant challenges in civil engineering today, as more than 50% of the repairs performed on concrete structures have been found to show signs of premature failure within 5 years after completion.¹ Concrete repair is not just a simple bandage for a structure experiencing damage; rather, it is a complex engineering task that presents unique challenges that differ from those associated with new concrete construction. For a repair project to be successful, it must adequately integrate new materials with old concrete, forming a composite system capable of enduring exposure to service loads, ambient and enclosed environments, and the passage of time.

The premature deterioration and failure of concrete repairs in service is a result of a variety of physicochemical and electrochemical processes. Among the most serious causes is cracking in the repair material. Cracking may result in a reduction in the effective cross-sectional area of the repaired structure and always substantially increases permeability, which leads to premature corrosion and deterioration.

Cracks generally interconnect flow paths and thus increase effective permeability of the repair material. The resulting chain reaction of cracking → more permeable repair → corrosion of reinforcement → more cracking may eventually result in irreversible deterioration and failure of the repair. Some 50 years ago, Valenta² observed that “continuous cracks linking into wider cracks originating from the concrete surface play the biggest role in increasing permeability.” Figure 1 schematizes a model of repair failure caused by cracking.

Problems associated with premature failure of repairs have

to a certain extent worsened in recent years, notably due to the increasing use of high-strength (or “high-performance”) repair materials. These materials can be prone to early age cracking sensitivity, especially in the restrained movement conditions typical of repairs. It is beyond the scope of this article to provide a critical review of the theoretical and mechanistic considerations of cracking in brittle composites such as cement-based materials. In what follows, only specific aspects of cracking in concrete repairs comprising hydraulic cements will be emphasized.

Concrete Repair Failure

The composite repair system results from the setting and hardening of a semiliquid substance—the freshly mixed repair material—placed against a rigid concrete substrate. A bond starts to develop in the contact area with the substrate as soon as the chemical reaction initiates in the repair material cement paste. As hydration proceeds, the repair material matures, and, after a limited period of moist curing, the repair material is exposed to the ambient air. Through these processes, the new material is subject to thermal deformations, autogenous shrinkage, and drying shrinkage. Because of the bond, free movement of the repair layer is restrained by the rigid substrate, leading to the development of significant stresses that may at some point overcome the material’s tensile strength and cause cracking and/or debonding of the repair (Fig. 2).

Shrinkage-induced stresses are often considered to be the main cause of premature failure of a repair. The issue is not easily addressed, as the consequences of differential shrinkage depend on factors that include the age and quality of the

concrete substrate, temperature and moisture gradients, boundary conditions (restraints), magnitude of induced stresses, and strain capacity of the repair material; and many of these are time-variant parameters. The primary significance of deformations caused by moisture content changes in cementitious materials is whether their occurrence would lead to cracking. Here, the magnitude of the restrained shrinkage strain is the most dominant one, but it is not the only one governing the sensitivity to cracking. The other relevant material properties are:

- Tensile strength—the risk of cracking decreases as this parameter increases;
- Modulus of elasticity (MOE)—the elastic tensile stress induced by a given shrinkage strain decreases as this parameter decreases; and
- Creep—stress relaxation increases and the shrinkage-induced tensile stress decreases as this parameter increases.

While it may appear that designing the repair material to have greater tensile strength is a straightforward solution to cracking, cement-based materials are inherently brittle and

exhibit sudden failure characteristics when the ultimate stress is reached. The MOE significantly influences the tolerance of a material to restrained shrinkage without cracking. The factors affecting the MOE of a cement-based material are related to compressive strength and density. Thus, factors that affect strength, such as water-cementitious materials ratio (w/cm); aggregate type, size, and grading; curing conditions; and age often similarly influence the MOE. An overview of the various parameters that influence the MOE of cement-based materials is presented in Fig. 3. Reducing the MOE of a repair material can lead to a lower stress buildup due to restrained drying shrinkage and/or thermal strains at the interface between the repair material and the existing concrete substrate provided that the overall volume changes are not amplified as much.

Creep reduces tensile stresses from restrained drying shrinkage and thus reduces cracking in the repair material. Therefore, material with high creep, particularly during the early age, is desirable. Material with early high creep will typically have relatively lower compressive strength and slower strength development. Conversely, materials with high or very high early strength development will exhibit low creep behavior and thus have a greater risk of cracking. The biggest complexity in practical design of mixtures with increased creep can be attributed to the significant correlation between creep and drying shrinkage. The same factors that assist in achieving higher creep also lead in a number of cases to higher drying shrinkage. Unfortunately, the higher stress induced by drying shrinkage may in some cases more than offset the advantages of stress relaxation achieved by increased creep.

Durability of Repair Material

Over the last three decades, substantial progress has been achieved in improving the quality and versatility of concrete repair materials. Durability has been enhanced through the use of plasticizing admixtures, supplementary

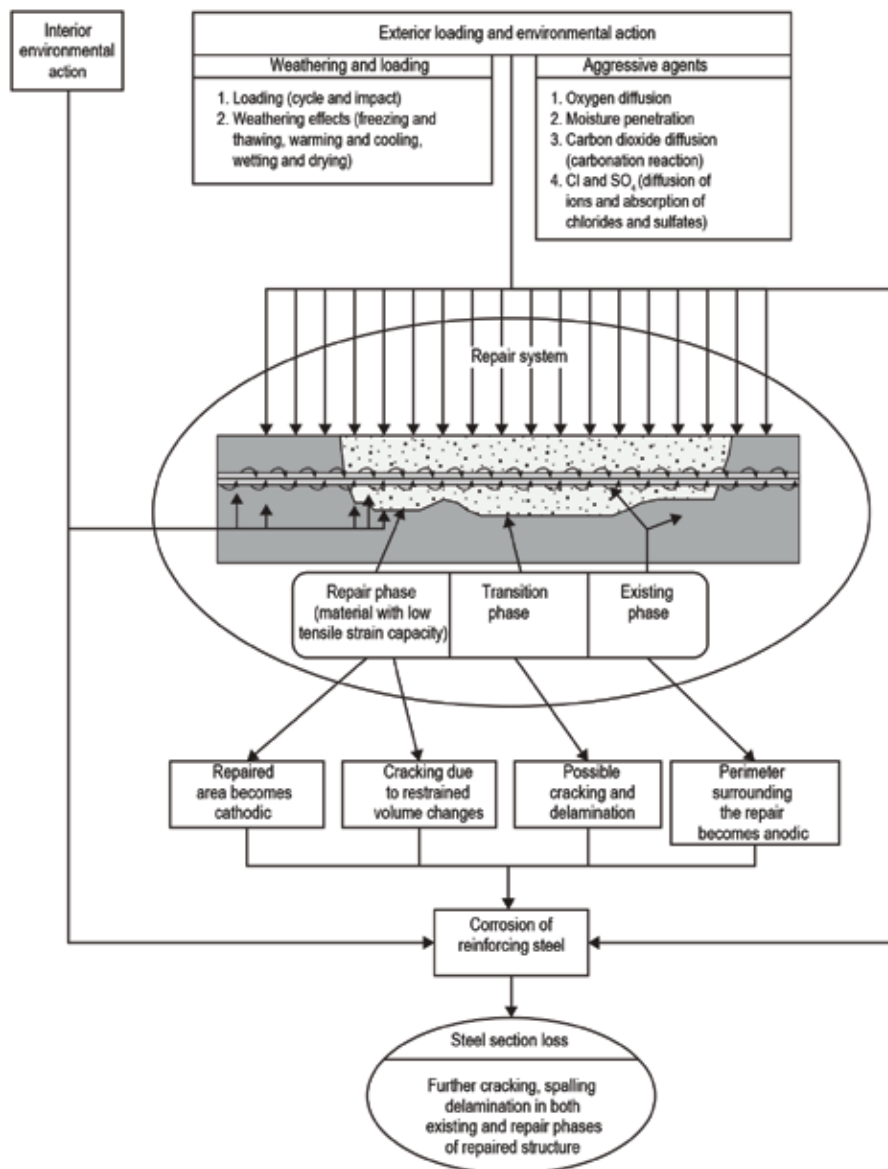


Fig. 1: Model of repair failure caused by cracking³

cementitious materials, air-entraining agents, and corrosion inhibitors.

It is often perceived that a densified microstructure is one of the most effective means for enhancing durability, as a dense microstructure generally leads to increased mechanical strength and lowered permeability, and reduced diffusivity of the material. This perception has led to the development of a handful of sophisticated and expensive high-strength repair materials with low bulk permeability. However, many of these materials are prone to early age cracking, due to significant volume changes, high elastic modulus, low creep deformation, and overall more brittle behavior.⁶ Very few solutions have been targeted at the brittle nature of cement-based materials, which make them inherently sensitive to restrained volume changes. The main objective of the project described in this article was to develop a cement-based repair material with reduced brittleness and improved resistance to cracking. A complementary goal was to make this material more environmentally friendly.

Recycled Waste Rubber

Over the last 30 years, several research projects have been focused on the properties and performance of rubber concrete and other rubberized cement matrix composites. Rubber obtained from waste tires and other waste rubber sources attracted interest for its natural ductility, energy absorption capacity, and low density. Recycled waste rubber is generally divided into two particle size categories: chipped rubber (3/4 to 1-1/4 in. [20 to 30 mm] particles) and crumb rubber (1/8 to 3/8 in. [3 to 10 mm] particles). Chipped rubber can be used to replace part of the coarse aggregate, whereas rubber crumbs can be used as fine aggregate.

When used to replace aggregates in cement-based materials, rubber particles induce significant variations in material properties. Numerous studies demonstrate that the partial replacement of aggregates with rubber negatively affects the strength properties of cement-based composites proportionally to the replacement rate.⁷ Partial replacement of aggregates also lowers the MOE (Fig. 4).

Using an instrumented steel ring to conduct restrained shrinkage tests, Kiang and Jiang⁸ found that the addition of

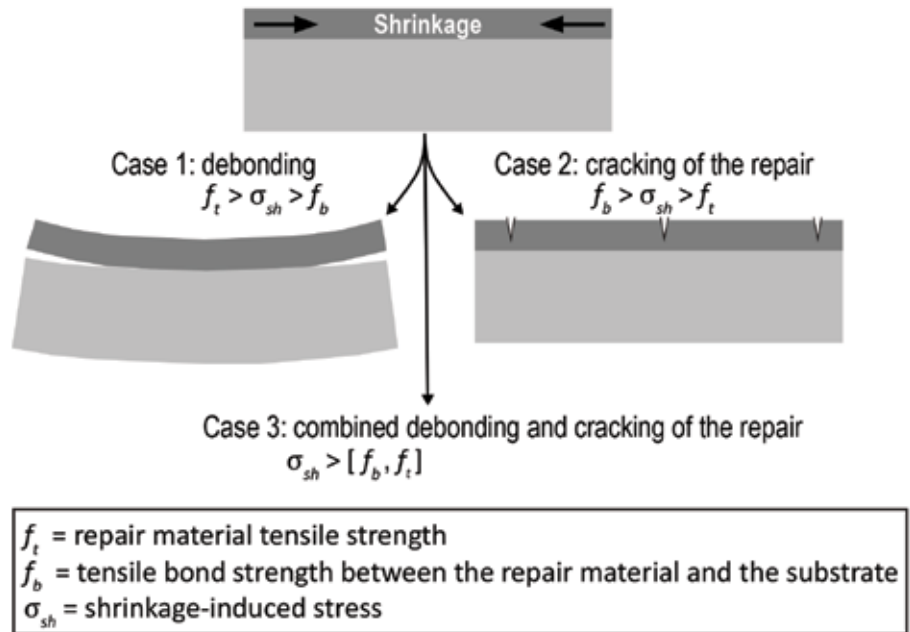


Fig. 2: Damage mechanisms in concrete repair systems (adapted from Luković et al.⁴)

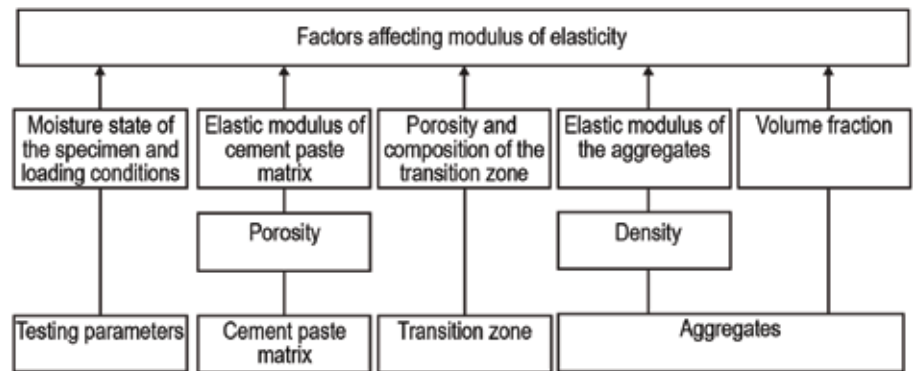


Fig. 3: Overview of parameters that influence the MOE of cement-based materials⁵

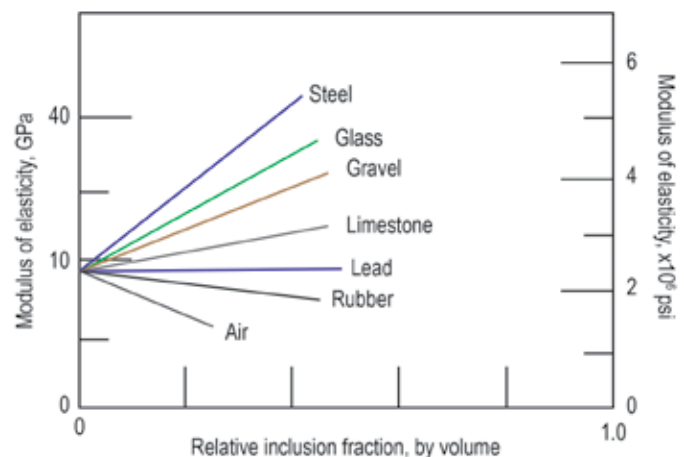


Fig. 4: Effect of various materials on MOE of concrete⁵

rubber particles leads to reductions in both tensile strength and shrinkage stress of paste and mortar specimens. They observed that when the rubber fraction is less than 20% by volume of mortar, the reduction of shrinkage stress is more than that of tensile strength, so cracking time is retarded.

Although much research has been conducted thus far on the use of recycled rubber in cementitious composites, no study has been reported yet on such materials specifically intended for concrete repairs. Due to the ability of the rubber to withstand large tensile deformations, the particles act in cement-based systems as miniature springs distributed throughout the material's matrix, halting very effectively the development of microcracking. At the macroscale, this results in enhanced ductility and significantly reduced sensitivity to restrained-shrinkage cracking.

One major drawback of rubberized cement-based composites is reduced compressive strength. There are many reasons for the lower strength of these materials:

- Low stiffness of rubber particles. Under a given strain, the particles draw very low stresses, and the other components in the matrix must carry most of the load—an effect that has been termed “reduction of the effective surface of concrete” by Eldin and Senouci⁹;
- Weak adhesion of rubber particles and cement paste. The hydrophobic character of rubber results in the formation of a weak paste-rubber aggregate interfacial transition zone (ITZ)¹⁰;
- Entrapment of air. The hydrophobic character of the rubber particles causes air entrapment during mixing, which is known to affect directly the compressive strength¹¹;
- Reduced sand content in the matrix. Fine aggregates play an important role in the material's strength,¹² and the replacement of a fraction of the sand with crumb rubber results in a weakened matrix; and
- Excessive amounts of rubber particles. A high concentration of rubber in the mixture leads to increasing rubber-to-rubber contacts within the matrix. These can carry very little stress, aggravating further the “reduction of the effective surface of concrete.”

MOE

MOE is a key property of cementitious repair materials because it impacts the ability to resist both restrained shrinkage-induced cracking and debonding from the substrate. The MOE is closely related to the stiffness of the aggregate makeup of the mixture. The elastic modulus of mineral aggregates used in concrete is typically of the order of 7.25×10^6 psi (50 GPa), while that of rubber is less than 1450 psi (0.01 GPa), so the MOE of rubberized cement-based materials is inevitably lower than that of ordinary cementitious materials.

From the viewpoint of developing crack-resistant mixtures, favorable modifications with regard to the MOE offer quite a complex task. On the one hand, using low-modulus aggregates, increasing the paste content, and using lower-

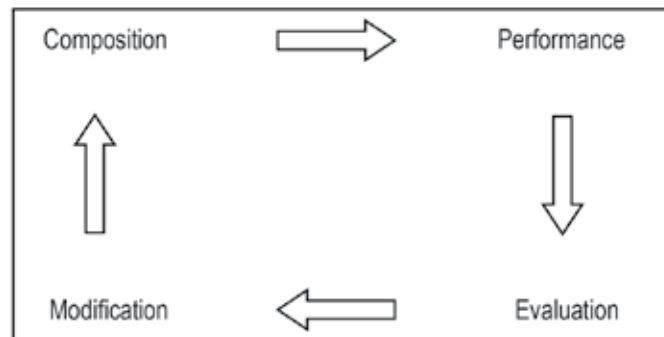


Fig. 5: A material development approach⁵

strength material reduce the MOE, and as such reduce restrained shrinkage stresses. On the other hand, these same factors generally increase shrinkage.

Crack-Resistant Repair Material

Research and development efforts reported herein were aimed at developing a crack-resistant cement-based material for structural and protective repairs. The goals were to meet the performance requirements of ACI 546.3R-14¹³ and to satisfy environmental and economic requirements. The repair material was developed using the general approach shown in Fig. 5. Guiding parameters in the design process included:

- Mechanical characteristics for crack resistance:
 - Moderate 28-day compressive strength of 4000 psi (27.6 MPa),
 - Moderate to low early strength,
 - Low early MOE; and
- Composition for environmental friendliness:
 - Type II cement,
 - Pozzolan (fly ash),
 - Low amount of silica fume, and
 - Low-modulus recycled rubber aggregate.

Developing a repair material in accordance with these parameters was intended to balance repair performance needs and environmental considerations. The first category of requirements relates to the repair material's engineering properties. These mainly concern the final, hardened state characteristics, such as strength, permeability, and the properties governing the sensitivity to cracking—drying shrinkage, tensile strength, and MOE. In addition, fresh state properties such as workability, pot life, rheology, and the ability to “wet” the substrate are primary considerations in the formulation of repair materials. Also, it is important to evaluate how the material properties are affected by variations in ambient temperature and humidity during placement, curing, and service.

Laboratory experiments

Previous research has shown that it is challenging to produce a homogeneous mixture with an even distribution of rubber. Previous work has also shown that a potentially

significant reduction in strength limits the rubber content achievable in practice. Hence, screening tests were conducted to estimate the maximum rubber content practically achievable. The basic requirements set out at the beginning of the design process were a w/cm value of 0.40 and a 28-day compressive strength of 4000 psi. Mixtures developed for the screening tests were prepared with ASTM Type I/II cement, Class C fly ash, silica fume, fine and coarse mineral aggregates, fine rubber crumb aggregates, a high-range water-reducing admixture (ASTM C494/C494M Type F), a defoaming agent, and water. The mineral aggregates met the requirements of ASTM C33/C33M, “Standard Specification for Concrete Aggregates.” The coarse aggregate was a 3/8 in. granite pea gravel, with specific gravity of 2.48 and absorption of 1.93%. The coarse aggregates used in the tests were dry. The specific gravity of fine aggregate was 2.65 and absorption was 1.01%. Crumb rubber was used as a fine aggregate replacement, with the amount varying from 0 to 30% by volume of sand. The crumb rubber was clean, without cord (steel belting). It had a specific gravity of 1.2 and adsorption was insignificantly low. The particle size ranged from 1/32 to 1/8 in. (0.75 to 3.5 mm).

Mixture proportioning was performed in accordance with the absolute volume method per ACI 546.3R-14. A series of preliminary “trial-and-error” tests were conducted. Batches were produced with various proportions of constituents, all with $w/cm = 0.40$. The mixtures were optimized to satisfy the guiding parameters discussed earlier and to exhibit adequate workability, minimum bleeding, and the absence of rubber segregation. Screening test results revealed that to meet ordinary strength requirements, rubber replacement rates could hardly exceed 20%. From the extensibility and crack resistance point of view, a higher fraction of rubber crumb substitution might have been desirable, but the amount of rubber was limited by

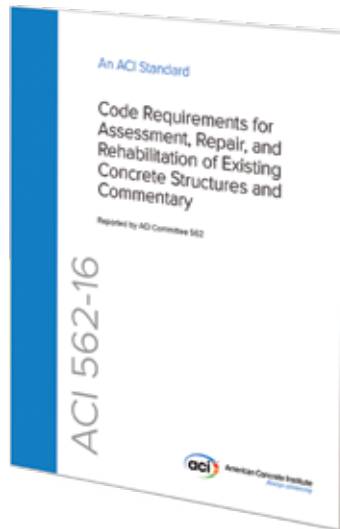
practical strength requirements and other compatibility requirements.

Five candidate mixtures were then designed for sensitivity to cracking and chloride permeability. Based on the preliminary test results and considering the information from previous investigations, a nominal rubber

substitution rate of 20% by volume of the sand was selected for further optimization and fine-tuning to meet the objectives of the project. To compensate for compressive strength reduction resulting from the presence of rubber particles and at the same time to provide improvements in the material

Concrete Repair Code Requirements and Project Examples

ACI 562-16 is the first code specifically for repairing reinforced concrete. The companion publication, “Guide to the Code for Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures,” includes chapter guides and project examples.



aci UNIVERSITY

Looking for more on ACI 562-16? ACI has produced a series of on-demand courses that review the process behind the ACI 562 repair code and showcase several project examples.



American Concrete Institute
Always advancing

www.concrete.org



microstructure, silica fume was added to the candidate mixtures. The silica fume was also used to provide a relatively cohesive paste, with the additional benefits of:

- Improving the bond between rubber aggregate and cementitious matrix. It is known that the bond between cement paste and aggregate particles increases with the consistency of the paste; and
- Preventing segregation. The low specific gravity of the rubber particles relative to the replaced sand (1.2 versus 2.48) makes rubber aggregates highly sensitive to gravitational segregation.

A defoaming agent was added to minimize the amount of entrapped air caused by the addition of rubber aggregate to the mixture. For each mixture, several adjustments were made by varying the dosage in fly ash, silica fume, water-reducing admixture, and ultimately rubber to meet the

requirements for compressive strength while achieving the desired workability (6 in. [150 mm] slump), preventing rubber segregation and excessive bleeding, and minimizing the entrapped air content.

The optimized mixtures ended up with 17% in rubber substitution for sand by volume. They all had a satisfactory rubber particle distribution.

Testing

Specimens were tested in compression in accordance with ASTM C39/C39M, “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,” at 28 days of age. Resistance to cracking was tested in accordance with ASTM C1581/C1581M, “Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage,” with ring specimens being monitored daily for evidence of

cracking. The test results are summarized in Table 1.

Based upon these results, two mixtures, C5-5 and C5-7, were selected for a more comprehensive characterization. Several standard test methods and one nonstandard test method were used. In addition to the two tests performed in the previous round of tests, the selected mixtures were tested for splitting tensile strength (ASTM C496/C496M, “Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens”), MOE (ASTM C469/C469M, “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression”), length change or free shrinkage (modified ASTM C157/C157M, “Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete”), and chloride permeability (ASTM C1202, “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”). The “Baenziger Block” test, a nonstandard procedure, was also conducted to evaluate the performance of the two materials with respect to shrinkage-induced cracking in a representative repair layout situation. The results of the second series of tests are summarized in Table 2.

The results of tests performed on mixtures C5-5 and C5-7 demonstrated that both mixtures satisfied the established criteria. However, based on the results of the ring test (ASTM C1581/C1581M) and slightly “friendlier” constructability properties, mixture C5-5 was selected as a prototype mixture for further experimental repair application under controlled field conditions.

Field experiments

Experimental field repairs were carried out on U.S. Navy concrete structures selected by officials with the Naval Facilities Engineering Systems Command, Port Hueneme, CA, USA. The experiments consisted of a formed vertical repair and a trowel-applied horizontal repair. The field-testing

Table 1:
Compressive strength and cracking resistance test results

Mixture identification	Compressive strength per ASTM C39/C39M, psi (MPa)		Resistance to cracking per ASTM C1581/C1581M
	7 days	28 days	
C5-1	3660 (25)	4540 (31)	Crack at 21 days
C5-3	2540 (18)	3740 (26)	Crack at 32 days
C5-4	2680 (18)	3880 (27)	> 90 days
C5-5	3580 (25)	4680 (32)	> 104 days
C5-7	4010 (28)	4760 (33)	> 55 days

Table 2:
Additional characterization of mixtures C5-5 and C5-7

Property/Test	Age, days	C5-5	C5-7
Splitting tensile strength, psi (MPa)	7	447 (3.1)	397 (2.7)
	28	399 (2.8)	365 (2.5)
MOE, psi (GPa)	7	2.63×10^6 (18.1)	2.46×10^6 (17.0)
	28	3.03×10^6 (20.9)	3.05×10^6 (21.0)
Length change, $\times 10^{-6}$	7	40	40
	28	410	370
Rapid chloride permeability, coulomb	28	1976 (low permeability)	1583 (low permeability)
Baenziger Block	90	No crack	No crack

program included mixing, placing, curing, and monitoring of the repair. In addition, tensile bond strength tests were carried out on-site and petrographic examinations were performed on core specimens extracted from the aged repairs. The repair material was manufactured and packaged in accordance with ASTM C387/C387M, “Standard Specification for Packaged, Dry, Combined Materials for Concrete and High Strength Mortar,” by a manufacturer of conventional repair products.

The horizontal repair was located on a pier deck slab (Fig. 6(a)), and the vertical repair was located on a slab that was rotated to the vertical (Fig. 6(b)). The repair dimensions were chosen to be representative of the geometrical proportions and the surface-area-to-volume ratio of typical surface repairs made on Naval facilities. Formwork for the vertical repair was constructed using plywood in accordance with the applicable provisions of ACI 347R-14,¹⁴ and it included two chutes (“bird mouths”) on the top for concrete placement.

The prepared concrete surfaces of the cavities were water saturated for 16 hours prior to repair applications to produce saturated surface dry (SSD) conditions at the time of repair material placement. After mixing, the repair material was placed in horizontal repairs using a shovel and in vertical repairs directly from buckets. For both repair types, the repair material was consolidated using an internal vibrator. The formwork for the vertical repair was also vibrated using an external vibrator. Weather conditions at the time of placement were favorable to plastic shrinkage with full sun, wind gusts up to 21 mph (35 km/h), and a relative humidity in the low 50%. Immediately after finishing, the horizontal repairs were covered with wet burlap and plastic sheet, and they were moist cured for 72 hours. For the vertical repairs, curing was performed in the formwork for one week, with water sprinkled from the top twice during the first 48 hours. Repairs were monitored for cracking for



Fig. 6: Repair areas selected for field experiments at the U.S. Navy facility in Port Hueneme, CA, USA: (a) horizontal, on the pier, 73.5 x 19.5 in. (1840 x 490 mm) and 3 in. (75 mm) deep; and (b) vertical, on an existing slab installed upright next to the selected pier, 48 x 36 in. (1200 x 900 mm) and 3.5 in. (88 mm) deep⁵

ACI Multi-User/ Multi-Site Solutions

From a single title, to a custom selection, to ACI’s full collection, the American Concrete Institute partners with leading distributors to provide access to the Institute’s published content for multiple locations and/or multiple users.



CUSTOMIZABLE COLLECTION
MULTIPLE USERS | MULTIPLE LOCATIONS
BUNDLE WITH OTHER PUBLISHERS



Techstreet



American Concrete Institute
Always advancing

www.concrete.org

10 months and sounded with a hammer for voids and delaminations. Over the monitoring period, no cracking was observed on any of the repairs, and the sounding did not reveal any voids, nor delamination.

Using the results from the testing program, a comprehensive material data sheet was developed based on the protocol set out in ACI 364.3R-09¹⁵ (shown in Table 3).

Field Applications

The performance of the repair material is being evaluated in several concrete rehabilitation projects. Two of these projects are described herein to provide examples of typical applications where the characteristics of the repair material can be advantageously exploited. One project is the repair of a deteriorated parking garage deck in Utica, NY, USA, completed in 2016. The rubber-based repair material was

selected for its lower shrinkage-cracking sensitivity. The job involved patch repairs and then resealing of the exposed areas. As shown in Fig. 7, the patches had somewhat unusual geometries. The repairs were also shallow in some areas, and the exposed reinforcement was generally not undercut. Even so, no debonding, cracking, or bond line shrinkage have been observed after 4 years in service.

The second case study is the restoration of a 500 ft (152 m) tall, 40-story office building in Philadelphia, PA, USA, in 2016. The building was erected in 1974, and it is the tallest reinforced concrete building in the city. The rubber-based material was chosen for horizontal application, including long form-and-place repairs at the parapets, as well as vertical application. In addition to low cracking sensitivity, the other main parameters influencing the material selection by the specifier were the compressive strength, which had to match

Table 3:
Prototype material data sheet per ACI 364.3R-09¹⁵

Property	Standard	Data		
Physical characteristics:				
Bulk density (after immersion)	ASTM C642	2.25		
Absorption (after immersion), %	ASTM C642	7.2		
Voids (permeable pore space), %	ASTM C642	15.6		
Mechanical strength and behavior:				
Compressive strength, psi (MPa)	ASTM C39/C39M	1 day	7 days	28 days
Flexural strength, psi (MPa)	ASTM C78/C78M	1525 (10.5)	3427 (23.6)	5574 (38.4)
Splitting tensile strength, psi (MPa)	ASTM C496/C496M	382 (2.63)	516 (3.56)	662 (4.56)
Direct tensile strength, psi (MPa)	CRD-C164	182 (1.25)	299 (2.06)	463 (3.19)
Short-term bond strength, psi (MPa)	ICRI No. 210.3 (formerly 03739)	—	293 (2.02)	420 (2.90)
Volume change properties and behavior:				
Modulus of elasticity, $\times 10^6$ psi (GPa)	ASTM C469/C469M	110 (0.76)	232 (1.60)	399 (2.75)
Compressive creep (28 days), $\times 10^{-6}$ /psi (MPa)	ASTM C512/C512M	1.96 (13.5)		
Coefficient of thermal expansion, $\times 10^{-6}$ /°F (°C)	CRD-C39	2.64 (18.2)		
Length change (28 days), $\times 10^{-6}$	ASTM C157/C157M	0.329 (47.7)		
Cracking resistance (time to cracking), days	ASTM C1581/C1581M	5.70 (10.3)		
Durability:				
Freezing-and-thawing resistance	ASTM C666/C666M, Procedure A	Cycles	DF, %	Exp., %
Scaling resistance, lb/ft ² (kg/m ²)	ASTM C672/C672M	125	< 60	0.21
Rapid chloride permeability, coulomb	ASTM C1202	0.0091 (0.044), visual rating: 0 to 1		
Chloride ponding (3 months), % weight	ASTM C1543	1218		
		Depth, in. (mm)		Cl⁻, %
		0.4 to 0.8 (10 to 20)		0.056
		1.0 to 1.4 (25 to 35)		0.020
		1.6 to 2.0 (40 to 50)		0.012
		2.2 to 2.6 (55 to 65)		0.012
Sulfate resistance (6-month expansion), %	ASTM C1012/C1012M	0.048		

that of the parent concrete, and the flexibility to use a single product in both manually applied, small patches (Fig. 8) and larger form-and-place applications. Once repairs were completed and cured, the structure was painted with an elastomeric coating. In both the vertical patches and formed elements, the material was applied successfully and performed quite satisfactorily, without reported cracking to this day.

Hence, the field performance of the material is quite promising, especially considering the severe exposure conditions experienced in both case studies. Many other projects are in the planning stage.

Summary

Failures observed on repaired concrete structures often correspond to either one of the following two modes: cracking in the repair material layer and/or delaminating at the interface due to stresses induced by differential shrinkage between repair and concrete substrate, followed in many instances by corrosion of reinforcing steel, more extensive cracking and delamination, and spalling.

Numerous measures have been taken over the years to improve durability and service life of concrete repairs, but very few have targeted one of the root causes of the problem—the inherent brittleness and low deformability of cementitious materials. The approach taken in the development and practical application of the repair material described in this article deviates from the current emphasis on high-strength, high-density, low-bulk permeability materials, being instead directed toward balancing strength, ductility, and compatibility with the existing concrete substrate. Such an approach is desirable in the development of cementitious materials for repair applications with minimum maintenance and extended serviceability between repair cycles.

Acknowledgments

Maxim Morency, formerly Research Engineer, CRIB Research Center at Laval University, Québec City, QC, Canada, and Wayne Salisbury, Senior Chemist, Conproco Corp., Somersworth, NH, USA, made significant technical contributions during the development of the subject repair material. Douglas F. Burke, formerly Concrete Engineering Specialist at the Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, CA, USA, and the highly skilled repair crew of Structural Technologies, Columbia, MD, USA, made invaluable contributions during the field experiments.

References

1. Matthews, S.L., “CONREPNET: Performance-Based Approach to the Remediation of Reinforced Concrete Structures: Achieving Durable



Fig. 7: A parking garage deck in Utica, NY, USA, repaired with the rubber-modified repair material, after 4 years in service



Fig. 8: Restoration of a 40-story reinforced concrete building in Philadelphia, PA, USA, in 2016. Spalled areas were repaired with a rubber-modified repair material. Repairs were to be subsequently covered with a polymer coating

Repaired Concrete Structures,” *Journal of Building Appraisal*, V. 3, No. 1, May 2007, pp. 6-20.

2. Valenta, O., “Durability of Concrete,” *Proceedings of the Fifth International Symposium on the Chemistry of Cements*, V. 3, Tokyo, Japan, 1968, pp. 193-225.

3. Vaysburd, A.M., and Emmons, P.H., “Visible and Invisible Problems of Concrete Repair,” *Indian Concrete Journal*, V. 75, No. 1, Jan. 2001, pp. 13-24.

4. Luković, M.; Ye, G.; and van Breugel, K., “Reliable Concrete Repair: A Critical Review,” 14th International Conference: Structural Faults and Repair, Edinburgh, Scotland, UK, July 3-5, 2012, 12 pp.

5. Vaysburd, A.M.; Bissonnette, B.; and Brown, C.D., “Development of a Crack-Resistant Durable Concrete Repair Material for Navy Concrete Structures,” SBIR No. N47408-03-P-6791, 2010, 235 pp.

6. Li, M., and Li, V.C., “Influence of Material Ductility on Performance of Concrete Repair,” *ACI Materials Journal*, V. 106, No. 5, Sept.-Oct. 2009, pp. 419-428.

7. Tian, S.; Zhang, T.; and Li, Y., “Research on Modifier and

Modified Process for Rubber-Particle Used in Rubberized Concrete for Road,” *Advanced Materials Research*, V. 243-249, May 2011, pp. 4125-4130.

8. Kiang, J., and Jiang, Y., “Improvement of Cracking-Resistance and Flexural Behavior of Cement-Based Materials by Addition of Rubber Particles,” *Journal of Wuhan University of Technology—Materials Science Edition*, V. 23, No. 4, Aug. 2008, pp. 579-583.

9. Eldin, N.N., and Senouci, A.B., “Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregate,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 5, No. 4, Nov. 1993, pp. 478-496.

10. Li, Y.R.; Zhu, H.; and Liu C.S., “Experimental and Economic Analysis of Airport Crumb Rubber Concrete (CRC) Pavement,” *Advanced Material Research*, V. 250-253, May 2011, pp. 605-608.

11. Mehta, P.K., and Monteiro, P.J.M., *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, third edition, McGraw-Hill Education, New York, NY, 2006, 659 pp.

12. Neville, A.M., and Brooks, J.J., *Concrete Technology*, second edition, Prentice Hall, London, UK, 2010, 442 pp.

13. ACI Committee 546, “Guide to Materials Selection for Concrete Repair (ACI 546.3R-14),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 72 pp.

14. ACI Committee 347, “Guide to Formwork for Concrete (ACI 347R-14),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 36 pp.

15. ACI Committee 364, “Guide for Cementitious Repair Material Data Sheet (ACI 364.3R-09),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2009, 12 pp.

Note: Additional information on the ASTM standards discussed in this article can be found at www.astm.org. CRD-C39, “Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Concrete,” and CRD-C164, “Standard Test Method for Direct Tensile Strength of Cylindrical Concrete of Mortar Specimens,” are available at www.wbdg.org/ffc/army-coe/standards. ICRI Technical Guideline No. 210.3 (formerly 03739), “Guideline for Using In-Situ Tensile Pull-Off Tests to Evaluate Bond of Concrete Surface Materials,” is available at www.icri.org.

Selected for reader interest by the editors.



Alexander M. Vaysburd is Principal of Vaycon Consulting, West Palm Beach, FL, USA. He is a member of ACI Committees 213, Lightweight Aggregate and Concrete; 364, Rehabilitation; and 365, Service Life Prediction. He was awarded the 2000 ACI Cedric Willson Lightweight Aggregate Concrete Award and the 1996 ACI Wason Medal for Most

Meritorious Paper for his significant contributions to the concrete industry. He received his PhD from ZNEEP Selstroi, Russia.



Benoit Bissonnette, FACI, is a Professor in the Department of Civil Engineering at Laval University, Québec City, QC, Canada, and a member of the Research Center on Concrete Infrastructure (CRIB). He is Chair of ACI Committee 364, Rehabilitation, and a member of ACI Committee 223, Shrinkage-Compensating Concrete, and the TAC

Repair and Rehabilitation Committee. He is co-author of the book *Concrete Surface Engineering* (2015). He received his PhD from Laval University and is a licensed professional engineer in Québec.



ACI member **Christopher D. Brown** is CEO of Conproco Corp., Somersworth, NH, USA. He is a past Board member of the Sealant, Waterproofing, and Restoration (SWR) Institute and has co-authored numerous articles about the performance expectations and methods of evaluating concrete repair materials. He has led Conproco's effort to develop durable materials for the repair and

restoration of concrete and masonry structures since 1975. He is a member of ACI Committee 364, Rehabilitation.

Sign up for
Concrete
SmartBrief

*The smart way to stay
on top of concrete
industry news.*

Created by SmartBrief in partnership with ACI, Concrete SmartBrief provides a daily e-mail snapshot of the concrete industry with news from leading global sources. Summaries of what matters to you, written by expert editors, to save you time and keep you informed and prepared.

Welcome to Concrete SmartBrief; sign up at:

www.smartbrief.com/ACI

Desarrollo de un material de reparación de **cemento modificado con caucho resistente a las grietas.**

De los conceptos de compatibilidad al campo.

por Alexander M. Vaysburd, Benoit Bissonnette, y Christopher D. Brown

La rehabilitación de la infraestructura de concreto es uno de los desafíos más importantes de la ingeniería civil en la actualidad, ya que se ha descubierto que más del 50% de las reparaciones realizadas en estructuras de concreto muestran signos de fallas prematuras dentro de los 5 años posteriores a la finalización.¹ La reparación del concreto no es solo un simple vendaje para una estructura que esté sufriendo daños; más bien, es una tarea de ingeniería compleja que presenta desafíos únicos que difieren de los asociados con la nueva construcción de concreto. Para que un proyecto de reparación sea exitoso, debe integrar adecuadamente nuevos materiales con concreto viejo, formando un sistema compuesto capaz de soportar la exposición a cargas de servicio, ambientes cerrados y ambientales, y el paso del tiempo.

El deterioro prematuro y la falla de las reparaciones de concreto en servicio es el resultado de una variedad de procesos fisicoquímicos y electroquímicos. Entre las causas más graves se encuentra el agrietamiento del material de reparación. El agrietamiento puede resultar en una reducción en el área de la sección transversal efectiva de la estructura reparada y siempre aumenta sustancialmente la permeabilidad, lo que conduce a una corrosión y a un deterioro prematuro.

Las grietas generalmente interconectan las rutas de flujo y por lo tanto aumentan la permeabilidad efectiva del material de reparación. La reacción en cadena resultante de agrietamiento → reparación más permeable → corrosión del refuerzo → más

agrietamiento puede eventualmente resultar en un deterioro irreversible y falla de la reparación. Hace unos 50 años, Valenta² observó que "las grietas continuas que se unen a grietas más anchas que se originan en la superficie del concreto juegan el papel más importante en el aumento de la permeabilidad". La Figura 1 esquematiza un modelo de falla de reparación causada por agrietamiento.

Los problemas asociados con fallas prematuras de las reparaciones han empeorado en cierta medida en los últimos años, en particular debido al uso cada vez mayor de materiales de reparación de alta resistencia (o "alto rendimiento"). Estos materiales pueden ser propensos a la sensibilidad al agrietamiento a edad temprana, especialmente en las condiciones de movimiento restringido típicas de las reparaciones. Está más allá del alcance de este artículo proporcionar una revisión crítica de las consideraciones teóricas y mecánicas del agrietamiento en compuestos frágiles como los materiales a base de cemento. A continuación, solo se enfatizarán los aspectos específicos de la fisuración en las reparaciones de concreto que comprenden cementos hidráulicos.

Fallas en la reparación del concreto.

El sistema de reparación compuesto resulta del fraguado y endurecimiento de una sustancia semilíquida, el material de reparación recién mezclado, colocado contra un sustrato de concreto rígido. Una unión comienza a desarrollarse en el área de contacto con el

sustrato tan pronto como se inicia la reacción química en la pasta de cemento del material de reparación. A medida que avanza la hidratación, el material de reparación madura y, después de un período limitado de curado húmedo, el material de reparación se expone al aire del ambiente. A través de estos procesos, el nuevo material está sujeto a deformaciones térmicas, contracción autógena y contracción por secado. Debido a la unión, el sustrato rígido restringe el movimiento libre de la capa de reparación, lo que lleva al desarrollo de tensiones significativas que en algún momento pueden superar la resistencia a la tracción del material y causar agrietamiento y/o desprendimiento de la reparación (Fig.2).

A menudo, se considera que las fuerzas de tensión inducidas son la principal causa de falla prematura de una reparación. El problema no se aborda fácilmente, ya que las consecuencias de la contracción diferencial dependen de factores que incluyen la edad y la calidad del sustrato de concreto, los gradientes de temperatura y humedad, las condiciones del entorno (restricciones), la magnitud de las tensiones inducidas y la capacidad de deformación del material de reparación; y muchos de estos son parámetros variables en el tiempo. El significado principal de las deformaciones causadas por cambios en el contenido de humedad en los materiales cementicios es si su aparición conduciría al agrietamiento. Aquí, la magnitud de la deformación por contracción restringida es la más dominante, pero no es la única que gobierna la sensibilidad al agrietamiento. Las otras propiedades relevantes del material son:

- Resistencia a la tensión: el riesgo de agrietamiento disminuye a medida que aumenta este parámetro;
- Módulo de elasticidad (ME): la fuerza de tensión elástica inducida por una deformación de contracción determinada disminuye a medida que este parámetro disminuye; y
- Fluencia: la relajación de la tensión aumenta y la fuerza de tensión inducida por la contracción disminuye a medida que aumenta este parámetro.

Si bien puede parecer que diseñar el material de reparación para que tenga una mayor resistencia a la tensión es una solución sencilla al agrietamiento, los

materiales a base de cemento son inherentemente frágiles y exhiben características de falla repentina cuando se alcanza la tensión máxima.

El ME influye significativamente en la tolerancia de un material a la contracción restringida sin agrietarse. Los factores que afectan el ME de un material a base de cemento están relacionados con la resistencia a la compresión y la densidad. Así, los factores que afectan la resistencia, como la relación agua-materiales cementantes (a/mc); tipo, tamaño y clasificación de agregados; condiciones de curado; y la edad, a menudo influyen de manera similar en el ME. En la Figura 3 se presenta una descripción general de los diversos parámetros que influyen en el ME de los materiales a base de cemento. La reducción del ME de un material de reparación puede conducir a una menor acumulación de tensión debido a la contracción restringida por secado y/ o deformaciones térmicas en la interfaz entre el material de reparación y el sustrato de concreto existente siempre que los cambios de volumen general no se amplifiquen tanto.

La fluencia reduce las tensiones de tracción de la contracción restringida por secado y, por lo tanto, reduce el agrietamiento en el material de reparación. Por lo tanto, es deseable materiales con alta fluencia, particularmente durante la edad temprana. El material con alta fluencia temprana típicamente tendrá una resistencia a la compresión relativamente menor y un desarrollo de resistencia más lento. Por el contrario, los materiales con un desarrollo de resistencia inicial alto o muy alto exhibirán un comportamiento de fluencia bajo y, por lo tanto, tendrán un mayor riesgo de agrietamiento. La mayor complejidad en el diseño práctico de mezclas con mayor fluencia se puede atribuir a la correlación significativa entre fluencia y retracción por secado. Los mismos factores que ayudan a lograr una mayor fluencia también conducen en varios casos a una mayor contracción por secado. Desafortunadamente, la mayor tensión inducida por la contracción por secado puede, en algunos casos, contrarrestar con creces las ventajas de la relajación de la tensión conseguida mediante una mayor fluencia.

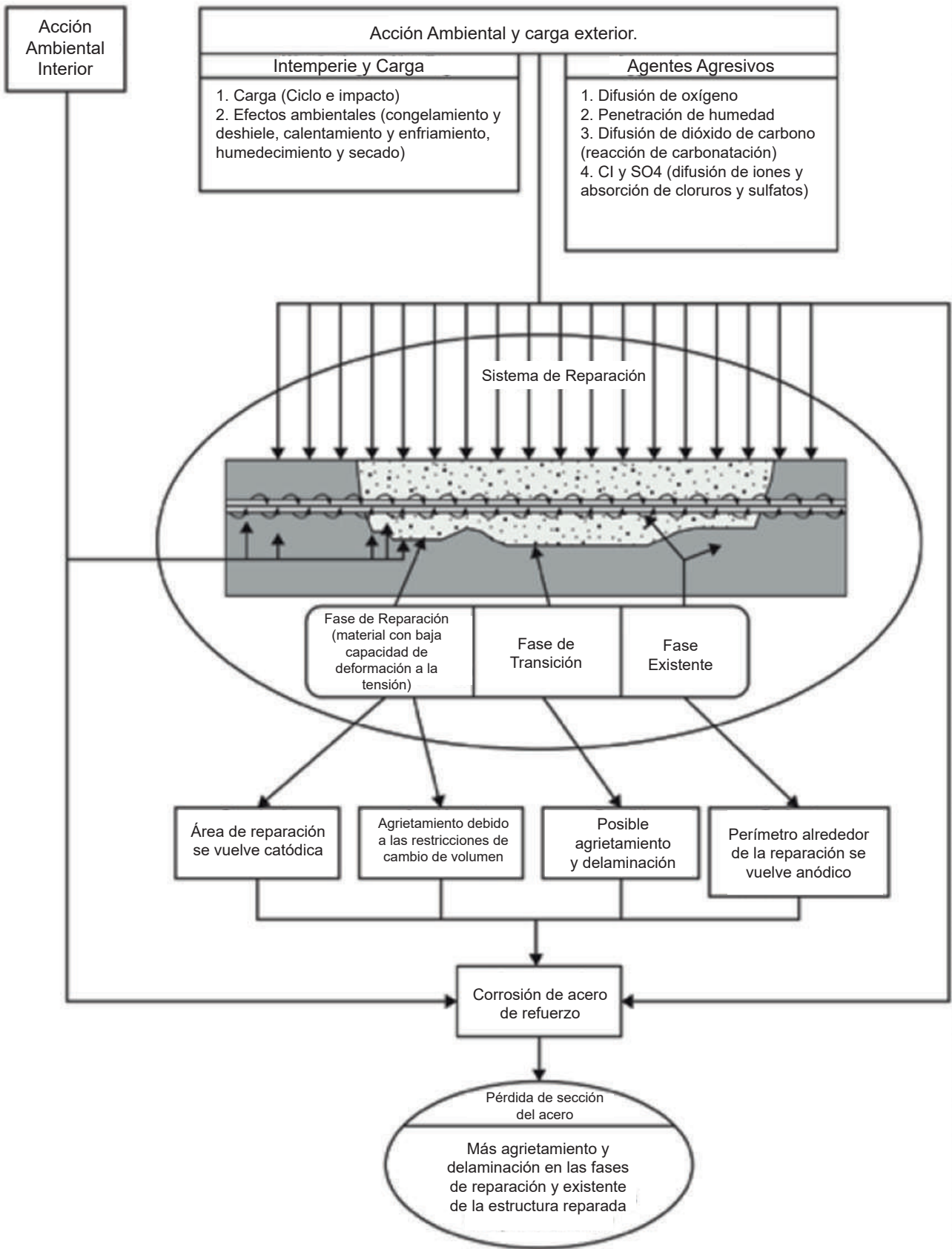


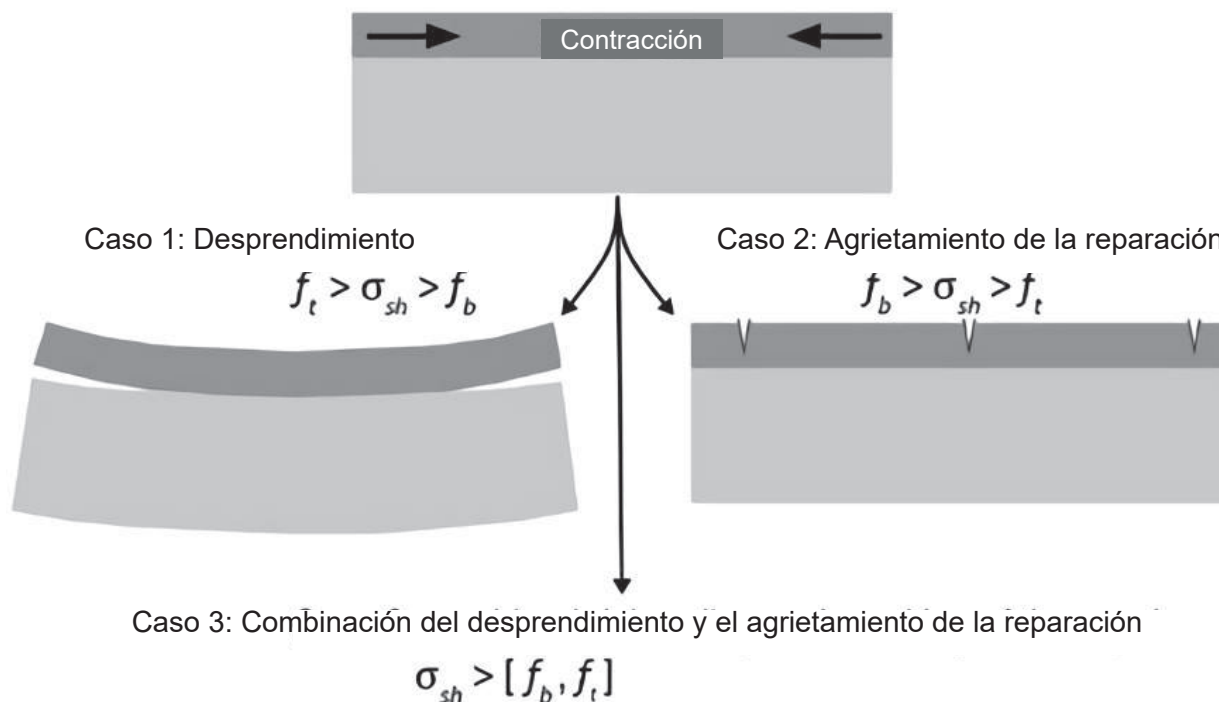
Fig.1: Modelo de falla de reparación causada por agrietamiento³

Durabilidad del material de reparación.

Durante las últimas tres décadas, se ha logrado un progreso sustancial en la mejora de la calidad y versatilidad de los materiales de reparación de concreto. La durabilidad se ha mejorado mediante el uso de aditivos plastificantes, materiales complementarios, agentes inclusores de aire e inhibidores de corrosión.

A menudo se percibe que una microestructura densificada es uno de los medios más efectivos para mejorar la durabilidad, ya que una microestructura densa generalmente conduce a una mayor resistencia mecánica y una menor permeabilidad, y una menor difusividad del material. Esta percepción ha llevado al desarrollo de un puñado de materiales de reparación

sofisticados y costosos de alta resistencia con baja permeabilidad a granel. Sin embargo, muchos de estos materiales son propensos a agrietarse a edad temprana, debido a cambios significativos de volumen, alto módulo elástico, baja deformación por fluencia y un comportamiento más frágil en general.⁶ Muy pocas soluciones se han enfocado a la naturaleza frágil de los materiales a base de cemento, lo que los hace intrínsecamente sensibles a los cambios de volumen restringidos. El objetivo principal del proyecto descrito en este artículo fue desarrollar un material de reparación a base de cemento con una fragilidad reducida y una resistencia mejorada al agrietamiento. Un objetivo complementario era hacer que este material fuera más respetuoso con el medio ambiente.



f_t = resistencia a tensión del material de reparación
 f_b = resistencia de adherencia a la tensión entre el material de reparación y el sustrato
 σ_{sh} = fuerza inducida de contracción

Fig.2: Mecanismos de daño en sistemas de reparación de concreto (adaptado de Luković et al.⁴)

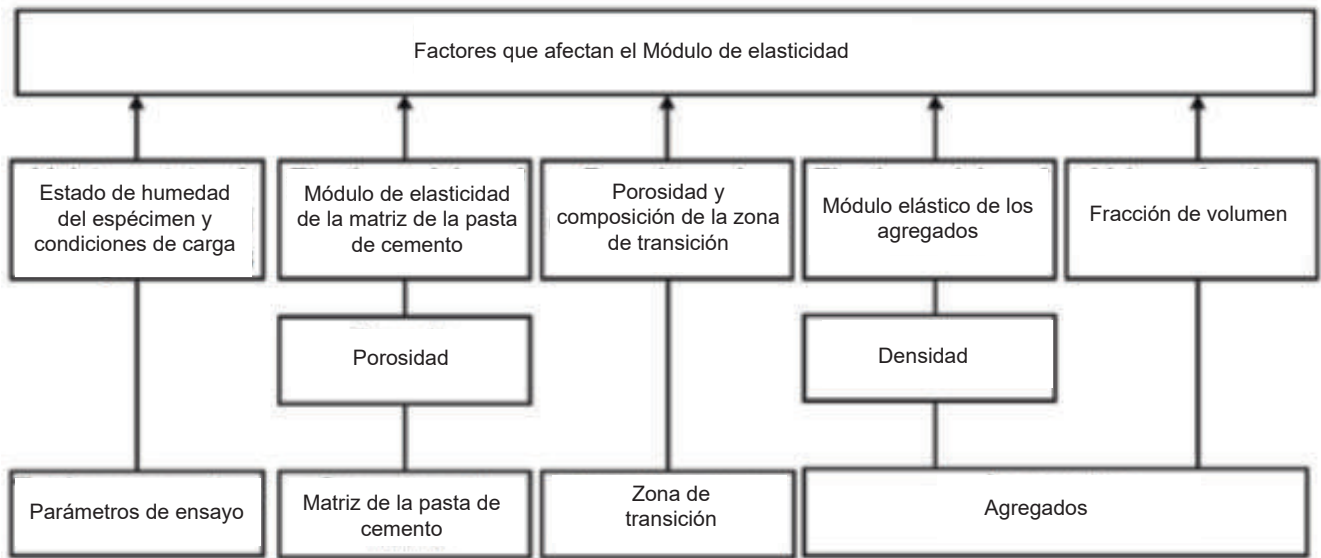


Fig.3: Resumen de los parámetros que influyen en el ME de los materiales a base de cemento⁵

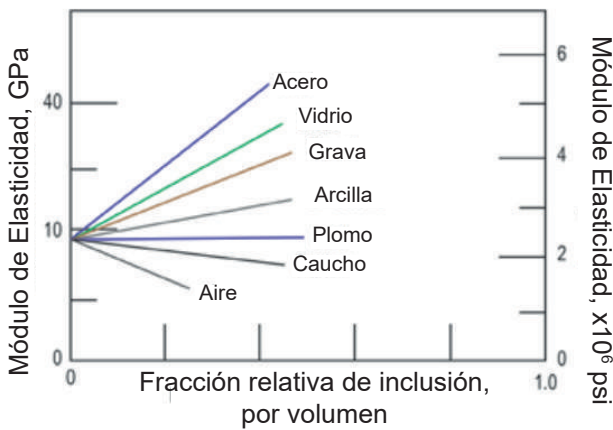


Fig.4: Efecto de varios materiales sobre el ME del concreto⁵

Caucho (hule) de desecho reciclado.

Durante los últimos 30 años, varios proyectos de investigación se han centrado en las propiedades y el rendimiento del concreto con caucho y otros compuestos de caucho en la matriz del cemento. El caucho obtenido de llantas de desecho y otras fuentes de caucho de desecho atrajo interés por su ductilidad natural, capacidad de absorción de energía y baja densidad. El caucho de desecho reciclado se divide generalmente en dos categorías de tamaño de partícula: caucho desconchado o en “chip” (partículas de 20 a 30 mm [3/4 a 1 ¼ pulg.]) Y caucho granulado (partículas de 3 a 10 mm [1/8 a 3/8 pulg.]). El caucho en “chip” se puede usar para reemplazar parte del agregado grueso, mientras que el granulado se puede usar como agregado fino.

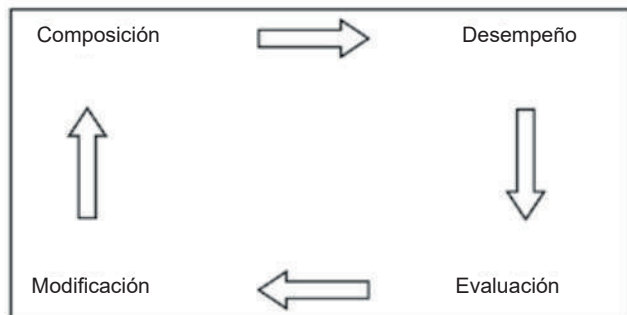


Fig.5: Enfoque de desarrollo de materiales⁵

Cuando se usa para reemplazar agregados en materiales a base de cemento, las partículas de caucho inducen variaciones significativas en las propiedades del material. Numerosos estudios demuestran que el reemplazo parcial de agregados con caucho afecta negativamente las propiedades de resistencia de los compuestos a base de cemento de manera proporcional a la tasa de reemplazo.⁷ El reemplazo parcial de agregados también reduce el ME (Fig. 4).

Utilizando un anillo de acero instrumentado para realizar pruebas de contracción restringida, Kiang y Jiang⁸ encontraron que la adición de partículas de caucho conduce a reducciones tanto en la resistencia a la tensión como en la contracción de las muestras de pasta y mortero. Observaron que cuando la fracción de caucho es menor al 20% en volumen de mortero, la reducción de la contracción es mayor que la de la resistencia a la tensión, por lo que se retarda el tiempo de agrietamiento.

Aunque hasta ahora se han realizado muchas investigaciones sobre el uso de caucho reciclado en compuestos cementicios, todavía no se ha informado de ningún estudio sobre dichos materiales destinados específicamente a reparaciones de concreto. Debido a la capacidad del caucho para soportar grandes deformaciones por tensión, las partículas actúan en los sistemas a base de cemento como resortes en miniatura distribuidos por toda la matriz del material, deteniendo de manera muy efectiva el desarrollo de microfisuras. A macroescala, esto da como resultado una mayor ductilidad y una sensibilidad significativamente reducida al agrietamiento por contracción restringida.

Un inconveniente importante de los compuestos a base de cemento con caucho es la resistencia a la compresión reducida. Hay muchas razones para una menor resistencia de estos materiales:

- Baja rigidez de las partículas de caucho. Bajo una determinada tensión, las partículas generan tensiones muy bajas y los otros componentes de la matriz deben soportar la mayor parte de la carga, un efecto que Eldin y Senouci⁹ han denominado "reducción de la superficie efectiva del hormigón".
- Débil adherencia de partículas de caucho y pasta de cemento. El carácter hidrófobo del caucho da como resultado la formación de una zona de transición interfacial (ITZ)¹⁰ de pasta débil de agregado de caucho;
- Atrapamiento de aire. El carácter hidrófobo de las partículas de caucho provoca que el aire quede atrapado durante el mezclado, lo que se sabe afecta directamente a la resistencia a la compresión¹¹.
- Reducción del contenido de arena en la matriz.

Los agregados finos juegan un papel importante en la resistencia del material,¹² y el reemplazo de una fracción de la arena por caucho desmenuzado da como resultado una matriz debilitada.

- Cantidades excesivas de partículas de caucho. Una alta concentración de caucho en la mezcla conduce a un aumento de los contactos de caucho a caucho dentro de la matriz. Estos pueden soportar muy poca tensión, agravando aún más la "reducción de la superficie efectiva del concreto".

ME – Módulo de Elasticidad.

El ME es una propiedad clave de los materiales de reparación cementicios porque afecta la capacidad de resistir tanto el agrietamiento inducido por contracción restringida como por el desprendimiento del sustrato. El ME está estrechamente relacionado con la rigidez del agregado en la mezcla. El módulo de elasticidad de los agregados minerales utilizados en el concreto es típicamente del orden de 7.25×10^6 psi (50 GPa) mientras que el del caucho es inferior a 1450 psi (0.01 GPa) por lo que el ME de los materiales con caucho a base de cemento es inevitablemente menor que el de los materiales cementicios ordinarios.

Desde el punto de vista del desarrollo de mezclas resistentes al agrietamiento, las modificaciones favorables con respecto al ME ofrecen una tarea bastante compleja. Por un lado, el uso de agregados de módulo bajo, el aumento del contenido de pasta y el uso de material de menor resistencia reducen el ME y, como tal, reducen los esfuerzos de contracción restringida. Por otro lado, estos mismos factores generalmente aumentan la contracción.

Material de reparación resistente a las grietas.

Los esfuerzos de investigación y desarrollo informados en este documento tenían como objetivo desarrollar un material a base de cemento resistente a las grietas para reparaciones estructurales y de protección. Los objetivos eran cumplir con los requisitos de desempeño de ACI 546.3R-14¹³ y satisfacer los requisitos medioambientales y económicos.

El material de reparación se desarrolló utilizando el enfoque general que se muestra en la Fig. 5. Los parámetros de guía en el proceso de diseño incluyeron:

- Características mecánicas para la resistencia al agrietamiento:
 - o Resistencia a la compresión moderada a 28 días de 4000 psi (27.6 MPa),
 - o Resistencia temprana baja a moderada,
 - o ME temprano bajo; y
- Composición respetuosa con el medio ambiente:
 - o Cemento tipo II,
 - o Puzolana (cenizas volantes),
 - o Baja cantidad de humo de sílice y
 - o Agregado de caucho reciclado de bajo módulo.

El desarrollo de un material de reparación de acuerdo con estos parámetros tenía la intención de equilibrar las necesidades de desempeño de reparación y las consideraciones ambientales. La primera categoría de requisitos se relaciona con las propiedades de ingeniería del material de reparación. Estos se refieren principalmente a las características finales del estado endurecido, como la resistencia, la permeabilidad y las propiedades que gobiernan la sensibilidad al agrietamiento: contracción por secado, resistencia a la tensión y ME. Además, las propiedades en estado fresco como la trabajabilidad, la vida útil, la reología y la capacidad de "mojar" el sustrato son consideraciones primarias en la formulación de los materiales de reparación. Además, es importante evaluar cómo las propiedades del material se ven afectadas por las variaciones en la temperatura ambiente y la humedad durante la colocación, el curado y el servicio.

Experimentos de laboratorio.

Investigaciones anteriores han demostrado que es un desafío producir una mezcla homogénea con una distribución uniforme del caucho. Trabajos anteriores también han demostrado que una reducción potencialmente significativa de la resistencia limita el contenido de caucho que se puede lograr en la práctica. Por lo tanto, se realizaron pruebas de detección para

estimar el contenido máximo de caucho prácticamente alcanzable. Los requisitos básicos establecidos al comienzo del proceso de diseño fueron un valor a/mc de 0.40 y una resistencia a la compresión de 28 días de 4000 psi (28 MPa). Las mezclas desarrolladas para las pruebas se prepararon con cemento ASTM Tipo II, cenizas volantes clase C, humo de sílice, agregados minerales finos y gruesos, agregados finos de caucho granulado, un aditivo reductor de agua de alto rango (ASTM C494/C494M Tipo F), un agente antiespumante y agua. Los agregados minerales cumplieron con los requisitos de ASTM C33/C33M, "Especificación estándar para agregados de concreto". El agregado grueso era una grava de granito de 3/8 de pulgada y/o con un peso específico de 2.48 y una absorción de 1.93%. Los agregados gruesos usados en las pruebas estaban secos. El peso específico del agregado fino fue de 2.65 y la absorción fue de 1.01%. El caucho granulado se utilizó como reemplazo de agregado fino, con una cantidad que variaba de 0 a 30% por volumen de arena. El caucho granulado estaba limpio, sin cordones (cuerdas de acero). Tenía un peso específico de 1.2 y la adsorción era insignificamente baja. El tamaño de partícula varió de 1/32 a 1/8 de pulgada (0,75 a 3,5 mm).

La dosificación de la mezcla se realizó de acuerdo con el método de volumen absoluto según ACI 546.3R-14. Se realizaron una serie de pruebas preliminares "prueba y error". Se produjeron lotes con diversas proporciones de componentes, todos con relaciones $a/mc = 0.40$. Las mezclas se optimizaron para satisfacer los parámetros de guía discutidos anteriormente y para obtener una trabajabilidad adecuada, un sangrado mínimo y la ausencia de segregación del caucho. Los resultados de las pruebas de referencia revelaron que, para cumplir con los requisitos de resistencia ordinarios, las tasas de reemplazo de caucho difícilmente podrían exceder el 20%. Desde el punto de vista de la extensibilidad y la resistencia al agrietamiento, podría haber sido deseable una mayor fracción de sustitución de las partículas de caucho, pero la cantidad de caucho estaba limitada por los requisitos prácticos de resistencia y otros requisitos de compatibilidad.

Posteriormente, se diseñaron cinco mezclas para que

tuvieran sensibilidad al agrietamiento y permeabilidad al ion cloruro. Con base en los resultados de las pruebas preliminares y considerando la información de investigaciones anteriores, se seleccionó una tasa de sustitución de caucho nominal del 20% por volumen de arena para una mayor optimización y ajuste para cumplir con los objetivos del proyecto. Para compensar la reducción de la resistencia a la compresión resultante de la presencia de partículas de caucho y al mismo tiempo para proporcionar mejoras en la microestructura del material, se añadió humo de sílice a las mezclas candidatas. El humo de sílice también se utilizó para proporcionar una pasta relativamente cohesiva, con los beneficios adicionales de:

- Mejora de la adherencia entre el agregado de caucho y la matriz cementicia. Se sabe que la adherencia entre la pasta de cemento y las partículas de agregados aumenta con la consistencia de la pasta; y
- Prevenir la segregación. La baja gravedad específica de las partículas de caucho en relación con la arena reemplazada (1.2 en comparación de 2.48) hace que los agregados de caucho sean muy sensibles a la segregación gravitacional.

Se añadió un agente antiespumante para minimizar la cantidad de aire atrapado provocado por la adición de agregado de caucho a la mezcla. Para cada mezcla, se hicieron varios ajustes variando la dosis en cenizas volantes, humo de sílice, aditivo reductor de agua y, en última instancia, caucho para cumplir con los requisitos de resistencia a la compresión mientras se logra la trabajabilidad deseada (revenimiento de 6 pulgadas [150 mm]), previniendo la segregación del caucho y el sangrado excesivo, y minimizando el contenido de aire atrapado.

Las mezclas optimizadas terminaron con un 17% de sustitución de caucho por arena por volumen. Todas tenían una distribución satisfactoria de partículas de caucho.

Ensayos.

Las muestras se ensayaron a compresión de acuerdo con ASTM C39/C39M, "Método de prueba estándar para resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de concreto", a los 28 días de edad. La resistencia al agrietamiento se probó de acuerdo con ASTM C1581/C1581M, "Método de prueba estándar para determinar la edad al agrietamiento y las características de resistencia a la tensión inducida del mortero y el concreto bajo contracción restringida", y las muestras de anillo se monitorean diariamente para detectar evidencia de agrietamiento. Los resultados de la prueba se resumen en la Tabla 1.

Sobre la base de estos resultados, se seleccionaron dos mezclas, C5-5 y C5-7, para una caracterización más completa. Se utilizaron varios métodos de prueba estándar y un método de prueba no estándar. Además de las dos pruebas realizadas en la ronda anterior de ensayos, las mezclas seleccionadas se probaron para determinar la resistencia a la tensión por compresión diametral (ASTM C496/C496M, "Método de prueba estándar para la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto"), ME (ASTM C469/C469M, "Método de prueba estándar para el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión"), cambio de longitud o contracción libre (ASTM C157/C157M modificada, "Método de prueba estándar para el cambio de longitud de mortero y concreto de cemento hidráulico endurecido"), y permeabilidad al cloruro (ASTM C1202, "Método de prueba estándar para la indicación eléctrica de la capacidad del concreto para resistir la penetración de iones de cloruro"). La prueba del "Bloque Baenziger", un procedimiento no estándar, también se llevó a cabo para evaluar el desempeño de los dos materiales con respecto al agrietamiento inducido por contracción en una situación de disposición de reparación representativa. Los resultados de la segunda serie de pruebas se resumen en la Tabla 2.

Los resultados de las pruebas realizadas en las mezclas C5-5 y C5-7 demostraron que ambas mezclas cumplían los criterios establecidos. Sin embargo, según

los resultados de la prueba de anillo (ASTM C1581/ C1581M) y las consideraciones de construcción "más amigables", la mezcla C5-5 se seleccionó como una

mezcla prototipo para una aplicación de reparación experimental adicional en condiciones de campo controladas.

Tabla 1:
Resultados de las pruebas de resistencia a la compresión y al agrietamiento

Identificación de la mezcla	Resistencia a la compresión por ASTM C39/C39M, psi (MPa)		Resistencia al agrietamiento por ASTM C1581/C1581M
	7 días	28 días	
C5-1	3660 (25)	4540 (31)	Grieta a 21 días
C5-3	2540 (18)	3740 (26)	Grieta a 32 días
C5-4	2689 (18)	3880 (27)	> 90 días
C5-5	3589 (25)	4680 (32)	>104 días
C5-7	4010 (28)	4760 (33)	> 55 días

Tabla 2:
Caracterización adicional de las mezclas C5-5 y C5-7

Propiedad/Ensayo	Edad, días	C5-5	C5-7
Tensión por compresión diametral, psi (MPa)	7	447 (3.1)	397 (2.7)
	28	399 (2.8)	365 (2.5)
ME. psi (GPa)	7	2.63 x 10 ⁶ (18.1)	2.46 x 10 ⁶ (17.0)
	28	3.03 x 10 ⁶ (20.9)	3.05 x 10 ⁶ (21.0)
Cambio de longitud, x10 ⁻⁶	7	40	40
	28	410	370
Permeabilidad rápida al ion cloruro, coulomb	28	1976 (baja permeabilidad)	1583 (baja permeabilidad)
Block Baenziger	90	No agrietamiento	No agrietamiento

Experimentos en campo

Se llevaron a cabo reparaciones experimentales en campo en estructuras de concreto de la Marina de los Estados Unidos de América seleccionadas por funcionarios del Comando de Sistemas de Ingeniería de Instalaciones Navales, Port Hueneme, CA, E.U.A. Los experimentos consistieron en una reparación

vertical y una reparación horizontal aplicada con llana. El programa de pruebas de campo incluyó mezclar, colocar, curar y monitorear la reparación. Además, se llevaron a cabo pruebas de resistencia a la tensión en el lugar y se realizaron exámenes petrográficos en muestras de núcleos extraídas de las reparaciones antiguas. El material de reparación fue fabricado y empaquetado de acuerdo con ASTM C387/

C387M, "Especificación estándar para materiales empaquetados, secos y combinados para concreto y mortero de alta resistencia", por un fabricante de productos de reparación convencionales.

La reparación horizontal se ubicó en una losa de un muelle (Fig. 6 (a)), y la reparación vertical se ubicó en una losa que se giró a la vertical (Fig. 6 (b)). Las dimensiones de la reparación se eligieron para que fueran representativas de las proporciones geométricas y la relación superficie-volumen de las reparaciones superficiales típicas realizadas en las instalaciones navales. La cimbra para la reparación vertical se construyó con madera contrachapada de acuerdo con las disposiciones aplicables de ACI 347R-14,¹⁴ e incluía dos rampas ("bocas de pájaro") en la parte superior para la colocación del concreto.

Las superficies de concreto preparadas de las cavidades se saturaron con agua durante 16 horas antes de las aplicaciones de reparación para producir condiciones de saturada superficialmente seca (SSS) en el momento de la colocación del material de reparación. Después de mezclar, el material de reparación se colocó en reparaciones horizontales usando una pala y en reparaciones verticales directamente desde baldes. Para ambos tipos de reparación, el material de reparación se consolidó utilizando un vibrador interno. La cimbra para la reparación vertical también se vibró con un vibrador externo. Las condiciones climáticas en el momento de la colocación fueron favorables a la contracción plástica con pleno sol, ráfagas de viento de hasta 21 mph (35 km/h) y una humedad relativa del 50%. Inmediatamente después del acabado, las reparaciones horizontales se cubrieron con tela de yute húmeda y plástico, y se curaron en húmedo durante 72 horas. Para las reparaciones verticales se realizó el curado con la cimbra durante una semana, rociando agua desde arriba dos veces durante las primeras 48 horas. Las reparaciones se controlaron para detectar grietas durante 10 meses y se hicieron sonar con un martillo para detectar huecos y delaminaciones. Durante el período de monitoreo, no se observaron grietas en ninguna de las reparaciones y el sondeo no reveló ningún vacío ni delaminación.

Utilizando los resultados del programa de pruebas, se desarrolló una hoja de datos de materiales completa basada en el protocolo establecido en ACI 364.3R-0915 (que se muestra en la Tabla 3).

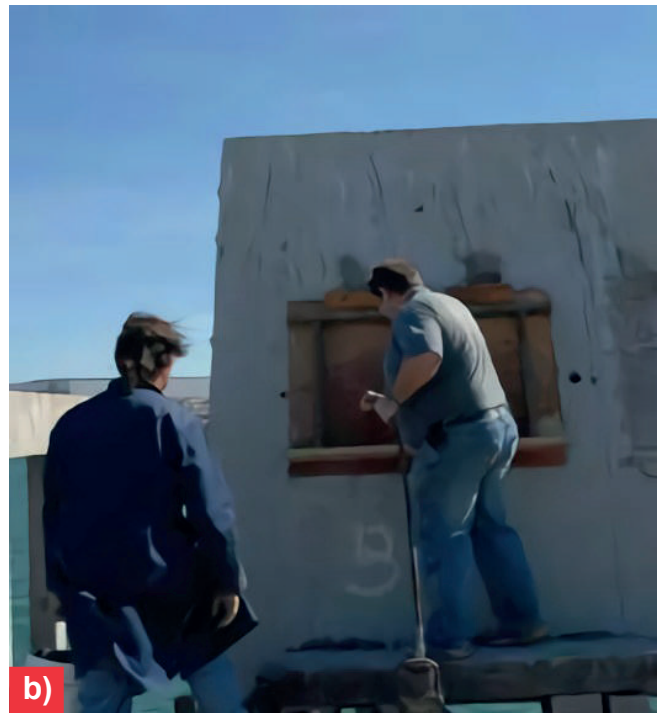


Fig.6: Áreas de reparación seleccionadas para experimentos en campo en las instalaciones de la Marina de los Estados Unidos de América en Port Hueneme, CA, E.U.A.: (a) horizontal, en el muelle, 1840 x 490 mm (73,5 x 19,5 pulg.) y 75 mm (3 pulg.) de profundidad; y (b) vertical, en una losa existente instalada en posición vertical junto al muelle seleccionado, 48 x 36 pulg.(1200 x 900 mm) y 3,5 pulg. (88 mm) de profundidad⁵

Tabla 3:
Hoja de datos del material prototipo según ACI 364.3R-09¹⁵

Propiedad	Estándar	Dato		
Características físicas:				
Densidad (después de la inmersión)	ASTM C642	2.25		
Absorción (después de la inmersión), %	ASTM C642	7.2		
Aire (espacios de poros permeables), %.	ASTM C642	15.6		
Resistencia mecánica y comportamiento:				
		1 día	7 días	28 días
Resistencia a compresión, psi (MPa)	ASTM C39/C39M	1525(10.5)	3427(23.6)	5574(38.4)
Resistencia a tensión, psi (MPa)	ASTM C78/C78M	382 (2.63)	516(3.56)	662 (4.56)
Resistencia a la tensión diametral, psi (MPa)	ASTM C496/496M	182(1.25)	299 (2.06)	463 (3.19)
Resistencia a la tensión directa, psi (MPa)	CRD-C164	-	293(2.02)	420 (2.90)
Resistencia de adherencia corto plazo, psi (MPa)	ICRI No. 210.3 (antes 03739)	110 (0.76)	232 (1.60)	399 (2.75)
Propiedades de cambio de volumen y comportamiento:				
Módulo de elasticidad, x10 ⁶ psi (GPa)	ASTM C469/C469M	1.96 (13.5)	2.64 (18.2)	3.07 (21.2)
Fatiga a compresión (28 días), x10 ⁹ /psi (MPa)	ASTM C512/C512M	0.329 (47.7)		
Coefficiente de expansión térmica, x10 ⁶ /°F(°C)	CRD-C39	5.70 (10.3)		
Cambio de longitud (28 días), 10 ⁻⁶	ASTM C157/C157M	470		
Resistencia al agrietamiento (tiempo para agrietarse), días	ASTM C1581/C1581M	>32		
Durabilidad:				
Resistencia al congelamiento y deshiele	ASTM C666/C666M, Procedimiento A	Ciclos	DF, %	Exp., %
		125	<60	0.21
Resistencia al descascaramiento, lb/ft ² (kg/m ²)	ASTM C672/C672M	0.0091 (0.044), escala visual: 0 a 1		
Permeabilidad rápida al ion cloruro, coulomb	ASTM C1202	1218		
Estancamiento de ion cloruro (3 meses), % peso	ASTM C1543	Profundidad, pulg. (mm)		CO ₂ , %
		0.4 a 0.8 (10 a 20)		0.056
		1.0 a 1.4 (25 a 35)		0.020
		1.6 a 2.0 (40 a 50)		0.012
		2.2 a 2.6 (55 a 65)		0.012
Resistencia a sulfatos (expansión a 6 meses), %	ASTM C1012/C1012M	0.048		

Aplicaciones en campo.

El rendimiento del material de reparación se está evaluando en varios proyectos de rehabilitación de concreto. Dos de estos proyectos se describen en este documento para proporcionar ejemplos de aplicaciones típicas en las que las características del material de reparación pueden aprovecharse de forma ventajosa. Un proyecto es la reparación de una losa de estacionamiento deteriorada en Utica, NY, E.U.A., Completada en 2016. El material de reparación a base de caucho se seleccionó por su menor sensibilidad al agrietamiento por contracción. El trabajo involucró reparaciones de parches y luego volver a sellar las áreas expuestas. Como se muestra en la Fig. 7, los parches tenían geometrías algo inusuales. Las reparaciones también fueron poco profundas en algunas áreas, y el refuerzo expuesto generalmente no fue socavado. Aun así, no se ha observado desprendimiento, agrietamiento o contracción de la línea de adherencia después de 4 años de servicio.

El segundo estudio de caso es la restauración de un edificio de oficinas de 500 pies (152 m) de altura y 40 pisos en Filadelfia, Pensilvania, E.U.A. en 2016. El edificio fue construido en 1974 y es el edificio de concreto reforzado más alto de la ciudad. El material a base de caucho se eligió para la aplicación horizontal, incluidas las reparaciones largas de forma y lugar en los parapetos, así como la aplicación vertical. Además de la baja sensibilidad al agrietamiento, los otros parámetros principales que influyeron en la selección del material por parte del especificador fueron la resistencia a la compresión, que tenía que coincidir con la del concreto base, y la flexibilidad para usar un solo producto en parches pequeños aplicados manualmente (Fig. 8) y aplicaciones más grandes de forma y lugar. Una vez que se completaron y curaron las reparaciones, la estructura se pintó con un revestimiento elastomérico. Tanto en los parches verticales como en los elementos formados, el material se aplicó con éxito y se desempeñó de manera bastante satisfactoria, sin que se haya reportado agrietamiento hasta el día de hoy.

Por lo tanto, el desempeño en campo del material es bastante prometedor, especialmente considerando las severas condiciones de exposición experimentadas en ambos estudios de caso. Muchos otros proyectos se encuentran en etapa de planificación.



Fig.7: Una losa de estacionamiento en Utica, NY, E.U.A. reparada con el material de reparación modificado con caucho, después de 4 años en servicio



Fig. 8: Restauración de un edificio de concreto reforzado de 40 pisos en Filadelfia, PA, E.U.A. en 2016. Las áreas descascarado se repararon con un material de reparación modificado con caucho. Las reparaciones debían cubrirse posteriormente con una capa de polímero.

Resumen.

Las fallas observadas en estructuras de concreto reparadas a menudo corresponden a uno de los dos modos siguientes: agrietamiento en la capa de material de reparación y/o delaminación en la interfaz debido a tensiones inducidas por contracción diferencial entre la reparación y el sustrato de concreto, seguido en muchos casos por corrosión de acero de refuerzo, agrietamiento y delaminación más extensos y descascaramiento.

Se han tomado numerosas medidas a lo largo de los años para mejorar la durabilidad y la vida útil de las reparaciones de concreto, pero muy pocas se han centrado en una de las causas fundamentales del problema: la fragilidad inherente y la baja deformabilidad de los materiales cementicios. El enfoque adoptado en el desarrollo y la aplicación práctica del material de reparación descrito en este artículo se aparta del énfasis actual en los materiales de alta resistencia, alta densidad y baja permeabilidad a granel, y en cambio se enfoca a equilibrar la resistencia, la ductilidad y la compatibilidad con el sustrato de concreto existente. Este enfoque es deseable en el desarrollo de materiales cementicios para aplicaciones de reparación con un mantenimiento mínimo y una capacidad de servicio extendida entre los ciclos de reparación.

Agradecimientos.

Maxim Morency, anteriormente ingeniero de investigación, CRIB Research Center en Laval University, Québec City, QC, Canadá, y Wayne Salisbury, Químico Senior, Conproco Corp., Somersworth, NH, E.U.A., hicieron importantes contribuciones técnicas durante el desarrollo del material de reparación en cuestión. Douglas F. Burke, anteriormente Especialista en Ingeniería de Concreto en el Centro de Servicios de Ingeniería de Instalaciones Navales, Port Hueneme, CA, E.U.A., y el equipo de reparación altamente calificado de Structural Technologies, Columbia, MD, E.U.A., hicieron contribuciones invaluable durante los experimentos en campo.

Referencias.

1. Matthews, S.L., "CONREPNET: Performance-Based Approach to the Remediation of Reinforced Concrete Structures: Achieving Durable Repaired Concrete Structures," *Journal of Building Appraisal*, V. 3, No. 1, May 2007, pp. 6-20.
2. Valenta, O., "Durability of Concrete," *Proceedings of the Fifth International Symposium on the Chemistry of Cements*, V. 3, Tokyo, Japan, 1968, pp. 193-225.
3. Vaysburd, A.M., and Emmons, P.H., "Visible and Invisible Problems of Concrete Repair," *Indian Concrete Journal*, V. 75, No. 1, Jan. 2001, pp. 13-24.
4. Luković, M.; Ye, G.; and van Breugel, K., "Reliable Concrete Repair: A Critical Review," 14th International Conference: Structural Faults and Repair, Edinburgh, Scotland, UK, July 3-5, 2012, 12 pp.
5. Vaysburd, A.M.; Bissonnette, B.; and Brown, C.D., "Development of a Crack-Resistant Durable Concrete Repair Material for Navy Concrete Structures," SBIR No. N47408-03-P-6791, 2010, 235 pp.
6. Li, M., and Li, V.C., "Influence of Material Ductility on Performance of Concrete Repair," *ACI Materials Journal*, V. 106, No. 5, Sept.-Oct. 2009, pp. 419-428.
7. Tian, S.; Zhang, T.; and Li, Y., "Research on Modifier and Modified Process for Rubber-Particle Used in Rubberized Concrete for Road," *Advanced Materials Research*, V. 243-249, May 2011, pp. 4125-4130.
8. Kiang, J., and Jiang, Y., "Improvement of Cracking-Resistance and Flexural Behavior of Cement-Based Materials by Addition of Rubber Particles," *Journal of Wuhan University of Technology—Materials Science Edition*, V. 23, No. 4, Aug. 2008, pp. 579-583.
9. Eldin, N.N., and Senouci, A.B., "Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregate," *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 5, No. 4, Nov. 1993, pp. 478-496.
10. Li, Y.R.; Zhu, H.; and Liu C.S., "Experimental and Economic Analysis of Airport Crumb Rubber Concrete (CRC) Pavement," *Advanced Material Research*, V. 250-253, May 2011, pp. 605-608.
11. Mehta, P.K., and Monteiro, P.J.M., *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, third edition, McGraw-Hill Education, New York, NY, 2006, 659 pp.
12. Neville, A.M., and Brooks, J.J., *Concrete*

Technology, second edition, Prentice Hall, London, UK, 2010, 442 pp.

13. ACI Committee 546, "Guide to Materials Selection for Concrete Repair (ACI 546.3R-14)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 72 pp.
14. ACI Committee 347, "Guide to Formwork for Concrete (ACI 347R-14)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 36 pp.
15. ACI Committee 364, "Guide for Cementitious Repair Material Data Sheet (ACI 364.3R-09)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2009, 12 pp.

Nota: Puede encontrar información adicional sobre las normas ASTM discutidas en este artículo en www.astm.org. CRD-C39, "Método de prueba para el coeficiente de expansión térmica lineal del concreto" y CRD-C164, "Método de prueba estándar para resistencia a la tensión directa de cilindros de concreto de muestras de mortero", están disponibles en www.wbdg.org/ffc/army-coe/ estándares. La Guía técnica de ICRI No. 210.3 (anteriormente 03739), "Guía para el uso de pruebas de tensión in situ para evaluar la adherencia de materiales de superficies de concreto", está disponible en www.icri.org.

Seleccionado para el interés del lector por los editores.



Alexander M. Vaysburd es director de Vaycon Consulting, West Palm Beach, FL, E.U.A.. Es miembro de los Comités ACI 213, Agregado Ligero y Concreto; 364, Rehabilitación; y 365, Predicción de la vida útil. Fue galardonado EN EL AÑO 2000 con el premio ACI Cedric Willson Lightweight Aggregate Concrete y la medalla ACI Wason en 1996 al papel con más merito por sus importantes contribuciones a la industria del concreto. Recibió su doctorado en ZNEEP Selstroj, Rusia.

Benoit Bissonnette FACI, es profesor en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Laval, Quebec, QC, Canadá, y miembro del Centro de Investigación sobre Infraestructura de Concreto (CRIB). Es presidente del Comité ACI 364, Rehabilitación, y miembro del Comité ACI 223, Concreto de contracción compensada, y TAC del Comité de reparación y rehabilitación. Es coautor del libro *Concrete Surface Engineering* (2015). Recibió su doctorado de la Universidad Laval y es ingeniero profesional licenciado en Québec.





Christopher D. Brown es miembro del ACI y es director ejecutivo de Conproco Corp., Somersworth, NH, E.U.A. És ex miembro de la Junta del Instituto de Selladores, Impermeabilización y Restauración (SWR) y ha sido coautor de numerosos artículos sobre las expectativas de desempeño y los métodos para evaluar los materiales de reparación de concreto. Ha dirigido el esfuerzo de Conproco para desarrollar materiales duraderos para la reparación y restauración de estructuras de concreto y mampostería desde 1975. Es miembro del Comité 364 del ACI en Rehabilitación.

La traducción de este artículo correspondió a la Sección México Sureste

Desarrollo de un material de reparación de cemento modificado con caucho resistente a las grietas



Traductor: Mtro. Joseph Eli Mandujano Zavala



Revisor Técnico: M.I. Arturo Gaytán Covarrubias