مجلة الدراسات الأثرية ISSN: 1111-7699
المجلد: 19.العدد:1/2021/.ص ص:230-242 EISSN2600-6499

تأثير الشبكة المسامية على فعالية تقوية الحجارة

Influence du réseau poreux sur l'efficacité de la consolidation des pierres

بدرالدين بلعيبود[1*]

[1] جامعة الجزائر 2– معهد الآثار: belaiboud.badreddine@univ-alger2.dz

تاريخ الإستلام 2021/06/07 تاريخ القبول 2021/11/16 تاريخ النشر 2021/.12/19

الملخص

تلعب المسامية دورا أساسيا في تقوية الحجارة، فقبل اقتراح أي علاج يجب أولا تحديد الشبكة المسامية للحجارة، والمسامية عبارة عن فراغات تتخلل العناصر الصلبة للمادة ويتخذ الوسط المسامي شكل شبكة مستمرة ومعقدة، يرتبط نجاح عملية تقوية ارتباطا وثيقا بمدى التغلغل المتجانس والمطلوب للمواد المقوية في الشبكة المسامية للحجارة، وعليه فإن علاج فقدان تماسك الحجارة يعتمد على فهمنا لآليات حركة السوائل والغازات في الوسط المسامي وتحديد مختلف خصائص المقويات المطبقة وكيفيات تغلغلها بشكل صحيح بهدف إعادة تماسك العناصر الفلزية للحجارة المعالجة.

الكلمات المفتاحية: الحجارة، التقوية، المسامية، فقدان التماسك

Résumé

La porosité joue un rôle clé dans la consolidation de la pierre. Avant de proposer un traitement, il faut d'abord déterminer le réseau poreux des pierres. La porosité correspond aux entre les éléments solides du matériau et le milieu poreux prend la forme d'un réseau continu et complexe. La réussite du processus de consolidation est étroitement liée à la pénétration homogène des consolidants dans le réseau poreux. Par conséquent, le traitement de la perte de cohésion des pierres dépend de notre compréhension des mécanismes de mouvement des fluides et des gaz dans le milieu poreux et la bonne identification des différentes propriétés des consolidants appliqués et de leurs modes de pénétration afin de restaurer la cohésion des éléments minéraux des pierres traitées.

Mots clés : pierre, consolidation, porosité, perte de cohésion

* المؤلف المرسل

مقدمة

إن الحفاظ على الحجارة الأصلية الفاقدة لتماسكها يستدعي تدخلا لإعادة ربط عناصرها وهذا ما يعرف بالتقوية، وتعتمد هذه العملية على إدخال مادة مقوية في نسيج الأجزاء المتلفة للحجارة لتؤدي دور الملاط الذي يقوم بربط العناصر الفلزية فيما بينها، ويستعمل لهذا الغرض عدة أنواع من مواد التقوية، إلا أن أغلبها لديها سلبيات تجعل منها غير فعالة، ويعتبر التغلغل الضعيف وغير المتجانس من بين أهم السلبيات، يرتبط التغلغل بعدة عوامل منها نوع وطبيعة الحجارة المعالجة وبطبيعة المادة المقوية وطريقة تطبيقها وفي بعض الأحيان ترتبط العملية بعوامل مرتبط بالنوع التلف ودرجته وانتشاره.

تؤدي بعض أنواع التلف إلى فقدان تماسك العناصر الفلزية المكونة للحجارة، وعادة ما تظهر على السطح شقوق دقيقة وفي بعض الحالات يصبح قابلا للتفتت إلى عمق معين، ما يستوجب القيام بعملية تقوية التي تهدف إلى:[1]

- إعادة تماسك الحجارة المتضررة.
- ضمان الالتحام بين الأجزاء الهشة والأجزاء السليمة.
- زيادة المقاومة الميكانيكية للأجزاء المعالجة للحجارة.

1 -مظاهر فقدان تماسك الحجارة الأثرية

تؤدي بعض الأنواع التلف إلى فقدان تماسك العناصر الفلزية المكونة للحجارة، ما ينتج عنه العديد من المظاهر على السطح، ومن بين مظاهر هذا النوع من التلف الذي يمكن مشاهدته على سطح الحجارة:

1-1 الشقوق الدقيقة

يمكن تعريف الشقوق على أنها انقطاع في سطح المادة بسبب فقدان في بعض الخصائص الميكانيكية، هذا ما يخلق عدم توان في استمرارية السطح ما يجعله عرضة لعدة تفاعلات قد تؤدي به إلى التلف، تنشأ الشقوق على سطح المادة الحجرية لعدة أسباب، من أهمها عوامل متعلقة بخصائص الحجارة في حد ذاتها، حيث تنشأ الشقوق على طول المستويات الهشة والضعيفة ومثال على ذلك الشقوق الأفقية التي تظهر على الصخور الغضارية وأنواع أخرى من الصخور الرسوبية، كما تتسبب عوامل خارجية كالأملاح والجليد والحرارة في ظهور شقوق على السطح، إن الشقوق التي تستدعي تدخلا في إطار عملية التقوية هي التي لا يتعدى عرضها 1 ملم،[2] بينما الشقوق التي تتعدى هذه الأبعاد فتتطلب نوع آخر من التدخل وهي عملية التمليط (stucage).

[1] Tobasso (L), « *Traitements de conservation de la pierre*», La dégradation et la conservation de la pierre, texte des cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre, publié sous la direction de Lazzarini (L) & Pieper (R), UNESCO 1982, p.211-224

[2] Vergès-Belmin (V) & Al, *Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre*, ICOMOS, Ateliers 30 Impression, Champigny/Marne, France 2008, p.10

1-2 الانفصال

تتمثل هذه الظاهرة في انفصال قشور رقيقة (Desquamation) من سطح الحجارة (الصورة رقم:1)، فبالرغم من السمك الرفيع لهذه القشور الذي عادة لا يتعدى مليمتر واحد[3] فإن خطورة هذا النوع من التلف تكمن في المساحة الواسعة التي يصيبها التلف، كما تكمن الخطورة أيضا في حالة ما إذا كان السطح يحمل معطيات أثرية أو فنية كرسومات أو كتابات، كما أنه في بعض الحالات يفوق سمك القشرة السنتيمتر الواحد ما يؤدي إلى فقدان معتبر في المادة الأصلية.

هذه الظاهرة عادة ما تكون منتشرة على سطح الحجارة الكلسية المستعملة في البناء، ويمكن ملاحظة هذا المظهر في أغلب المواقع الأثرية، كما تتعرض الرسومات الصخرية في الصحراء لانفصال في الطبقة الخارجية ما يؤدي في كثير من الحالات إلى ضياع أجزاء هامة من هذه الرسومات.

الصورة رقم 1: انفصال لطبقة رقيقة من حجارة كلسية
موقع خميسة بسوق اهراس

1-3 ظاهرة التفتت

إن التفتت الذي يظهر على السطح هو عبارة عن انفصال وتفكك لعناصر فلزية مشكلة للحجارة، يكون تأثير هذه الظاهرة على الطبقات الخارجية وفي كثير من الحالات يتعداه ليصل إلى عمق الحجارة، يعرف هذا النوع من التلف بالتفتت الحبيبي (Désagrégation Granulaire) عندما يتعلق الأمر بالحجارة ذات البنية الحبيبية الكبيرة كالحجارة الرملية والرخام، عادة ما ينتج عنه ترسب لحبيبات المادة أسفل الحجارة المتلفة (الصورة رقم: 2)، يمكن تقسيم ظاهرة التفتت إلى ثلاثة أنواع[4]:

[3] Ezzdine (R), *Endommagement des monuments historiques en maçonnerie*, thèse pour obtenir le grade de docteur spécialité : Mecanique, Université Bordeaux 1, Soutenue en 2007, p.16
[4] Ezzine (R), Op.Cit., p.17

- التفتت الرملي (Désagrégation Sableuse) وهو انفصال لحبيبات الرمل المشكلة لسطح الحجارة الرملية وذلك بسبب فقدان الرابط – السيليسي أو الكلسي– لخصائصه ما يؤدي إلى انفصال حبات الرمل من سطح الحجارة.

- التفتت على شكل مسحوق (Pulvérulence) ينتج عن هذا النوع من التلف فقدان للمادة الحجرية على شكل مسحوق، هذا التلف خاص بالحجارة التي تتشكل من عناصر ذات حبيبية دقيقة.

- التفتت السكري (Désagrégation Saccharoïde) هذا النوع من التلف يمس الرخام ذو بلورات كبيرة، ففي بعض الحالات يصل عمق التفتت إلى عدة سنتيمترات وتعتبر التغيرات في درجة الحرارة عاملا رئيسا في هذا النوع من التلف.

الصورة رقم 2: تفتت حبيبي لحجارة رملية
(Vergès–Belmin (V) et Al 2008)

1 –أنواع المقويات

تهدف عملية التقوية لوصل عناصر الحجارة التي فقدت تماسكها، بحيث تحل المواد المقوية محل الاسمنت الذي يضمن تماسك الحجارة، وتتصل المواد المقوية بسطح العناصر الفلزية بواسطة عدة أنواع من الروابط الكيميائية وهذا باختلاف طبيعة سطح المادة الحجرية الذي إما أن يكون عازل للرطوبة أو جاذب للرطوبة، لأن انسجام وقوة ربط أي مادة مقوية تتلخص في الرابطة الكيميائية التي تكون بين المقوي وسطح العناصر الحجرية، تقسّم المواد المقوية التي تستعمل لعلاج الحجارة الأثرية حسب طبيعتها الكيميائية إلى مقويات غير عضوية وأخرى عضوية.

1-2 المقويات غير العضوية

تساعد المقويات غير العضوية على إعادة تماسك الحجارة من خلال ترسب جزيئاتها التي تربط بين العناصر المفككة، إن التركيبة الكيميائية والفلزية للمقويات والحجارة المعالجة غالبا ما تكون متقاربة، هذا ما يزيد من فعالية هذه المواد التي يمكنها إعادة ربط العناصر الفاقدة للتماسك، فيتشكل كربونات الصوديوم أو كربونات الباريوم إذا استعمل الجير أو الباريت، ويتشكل السيليس المميه إذا كانت المقويات عبارة عن سيليكات (Silicates) أو فليوسيليكات

(Fluosilicates)، أما في حالة إستعمال مادة مقوية مشكلة من ألومينات البوتاسيوم (Aluminates de potassium) فيتشكل الألومين (Alumine) كمادة رابطة.[5]

تتميز المقويات غير العضوية باستقرارها حيث أنها تحافظ على خصائصها لمدة طويلة، ولها مقاومة جيدة للتأكسد والضوء، لكن بالمقابل لها العديد من المساوئ، من أهمها:[6]

- تغلغل سيئ في الشبكة المسامية للحجارة.
- تغير في لون الحجارة بعد ترسب المواد الفلزية.
- تشكل أملاح قابلة للذوبان كنواتج ثانوية للتفاعل، مثل سيليكات الصوديوم والبوتاسيوم.
- عدم تحسين الخصائص الميكانيكية للحجارة المعالجة.

تعتبر المقويات الفلزية من أولى المواد التي استعملت في مجال تقوية الحجارة الأثرية وهذا راجع لتوفّرها وقلة تكلفتها ومن بين المقويات غير العضوية التي أعطت نتائج إيجابية نجد هيدروكسيد الكالسيوم $Ca(OH)_2$ وهيدروكسيد الباريوم $Ba(OH)_2$.

2-2 المقويات العضوية

من بين إيجابيات المقويات العضوية هي مقاومتها الجيدة وعازليتها للماء وإرجاعيتها النسبية، لكن بعض الراتنجات لديها إرجاعية ضعيفة كالإيبوكسيد، كما يطرح مشكل التغلغل السيئ لأغلب المقويات العضوية بسبب الحجم الكبير لجزيئاتها حيث تتجمع هذه الأخيرة في المناطق القريبة من السطح.[7]

تتصلب المقويات العضوية في الشبكة المسامية للحجارة على شكل بوليمير (Polymères)، وهناك طريقتين لتشكله: الطريقة البسيطة تكمن في إذابة البوليمير في مذيب عضوي وتطبيقه على سطح الحجارة، وبعد تبخر المذيب يعاد تشكيل البوليمير من جديد ليأخذ دور المادة الرابطة، لكن هناك عدة مذيبات تقوم بنقل الراتنج نحو السطح أثناء تبخرها ما يمنع تغلغل عميق ومتجانس، أما طريقة التفاعل الأخرى فتعتمد على تطبيق المادة المقوية على شكل مونومير (Monomère) وتتم عملية البلمرة في المسامات، تمتاز هذه الطريقة بتغلغل جيد كون المونومير أقل لزوجة من البوليمير وبسبب صغر أبعاد جزيئاته.[8]

تقسم الراتنجات العضوية إلى حرارية الصلابة (Thermodurcissables) وحرارية اللدونة (Thermoplastiques)، تستعمل العائلة الأولى كمواد للتقوية حيث تطبق على شكل محاليل ممزوجة بمصلب (Durcisseur)، يكون هذا الأخير مسئول عن عملية التصلب داخل المسامات وفي الشقوق الدقيقة، تطبق عادة راتنجات إيبوكسيدية أو بوليستيرية بعد أن يتم مزجها مع مذيبات عضوية وبتركيز يسمح بخفض في اللزوجة وتأخير عملية التصلب وتجنب الانسداد الكلي

[5] Torraca (G), « *Philosophie générale de la conservation de la pierre* », La dégradation et la conservation de la pierre, textes des cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre, publié sous la direction de Lazarreni (L) & Pieper (R), UNESCO 1982, pp.187-210

[6] Torraca (G), *Matériaux de construction poreux*, Traduit par Di Matteo (C), ICCROM, Rome 1986, p.87

[7] Domasloswski (W), *Conservation préventive de la pierre*, Traduit par Woszyck (I), UNESCO, Paris 1982, p.131

[8] Ozturk (I), *Alkoxysilanes consolidation of stone and earthen building materials*, a Thesis In The graduate Program in historic preservation Presented To The faculties of the university of Pennsylvania 1992, p.12

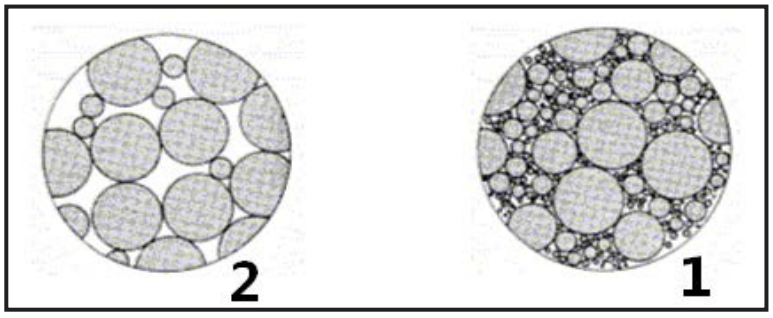
للمسامات.[9] من أهم عيوبها أنها غالبا ما تقوم بالسد الكلي للمسامات ما يمنع حركة الماء والبخار، لذا فإنه لا ينصح باستعمال هذا النوع من الراتنجات في عمليات التقوية،[10] لكن أجريت العديد من الدراسات بهدف تحسين ورفع من خصائص هذه الراتنجات ما يؤهلها لتؤدي وظيفة التقوية بفعالية أكبر.

أما العائلة الثانية وهي الراتنجات حرارية اللدونة فإنها تستعمل على نطاق أوسع في عملية التقوية خاصة الأكريليكية منها، كما يستعمل هذا النوع من المواد كمقويات مؤقتة أثناء التدخلات المستعجلة بسبب إرجاعيتها الجيدة، بحيث أن الراتنجات حرارية اللدونة مشكلة من سلاسل مرتبطة فيما بينها بروابط ثانوية ضعيفة تزول بسهولة بوجود المذيب المناسب.[11]

3- آليات تغلغل المقويات في الشبكة المسامية

3 1 الشبكة المسامية للحجارة

تلعب المسامية دورا أساسيا في مدى فعالية تقوية الحجارة، فقبل اقتراح أي علاج يجب أولا تحديد الشبكة المسامية للحجارة، والمسامية عبارة عن فراغات تتخلل العناصر الصلبة للمادة ويتخذ الوسط المسامي شكل شبكة مستمرة ومعقدة مكونة من مسامات بأبعاد مختلفة تكون في غالب متصل فيما بينها بواسطة وصلات، ترتبط المسامية بمدى تجانس العناصر المشكلة للمادة، فالحجارة ذات نسيج غير متجانس عادة ما ترافقها مسامية صغيرة مقارنة بالحجارة ذات نسيج متجانس (الشكل رقم:1) لأن العناصر الدقيقة يمكنها شغل الفراغات المجودة بين العناصر الأكبر وهذا ما يؤدي إلى خفض في المسامية.



الشكل رقم 1: شكل يبين ارتباط المسامية بتجانس العناصر المشكلة للحجارة
1/ عدم تجانس (مسامية منخفضة) 2/ تجانس (مسامية مرتفعة)

يتم تصنيف المسامية حسب معايير مختلفة، فإذا أخذنا معيار اتصال المسامات فيما بينها من عدمه فهي تقسم إلى:
- مسامية مفتوحة، وتتشكل من مسامات متصل فيما بينها بواسطة وصلات.
-مسامية مغلقة، وهي عبارة عن مسامات غير متصلة فيما بينها، ما يترتب عليه عدم وجود أي شكل من أشكال النفاذية أو الحركة.

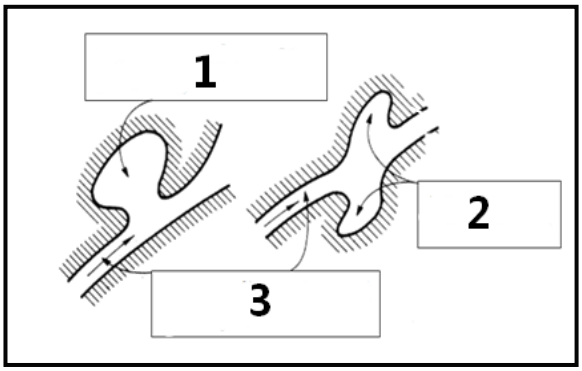
[9] Torraca (G), *Matériaux poreu…*, Op.Cit., p.91
[10] Ozturk (I), Op.Cit., p.13
[11] Bonora (R), « *L'utilisation des résines pour la conservation et la protection de la pierre* », La dégradation et la conservation de la pierre, texte des cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre, publié sous la direction de Lazzarini (L) & Pieper (R), UNESCO 1982, pp.245-254

كما يمكن تصنيف المسامية بحسب أبعاد المسامات وتقسم إلى:[12]

- مسامية دقيقة: معدل قطر المسامات أقل من 0,0001 ملم.
- مسامية متوسطة: معدل قطر المسامات والشعيرات يكون بين 0,0001 و2,5 ملم.
- مسامية كبيرة: معدل قطر المسامات أكبر من 2,5 ملم.

3 2 أسباب التغلغل السيئ للمقويات:

إن أي محاولة لتحديد فعالية مواد المقوية المطبقة تستوجب بالضرورة معرفة سلوكها داخل الشبكة المسامية للحجارة المعالجة، ولعل أكبر عائق لمعظم المقويات هو أبعاد جزيئاتها الكبيرة، وهذا ما يؤدي لتشكيل محلول مقوي ذو لزوجة عالية تمنع من التغلغل الجيدة خاصة بالنسبة للحجارة ذات المسامية الصغيرة، كما أن بعض المسامات تكون غير معنية بالحركة السوائل والغازات لأنها تقع في مناطق ميتة حيث تشكل جيوب معزولة. (الشكل رقم:2)



الشكل رقم 2: رسم توضيحي يبين أنواع الجيوب في الشبكة المسامية

1: مسام على شكل جيوب (سائل غير متحرك) 2: مسامات على شكل جيوب مفتوحة (سائل قليل الحركة)
3: وصلات (سائل متحرك)

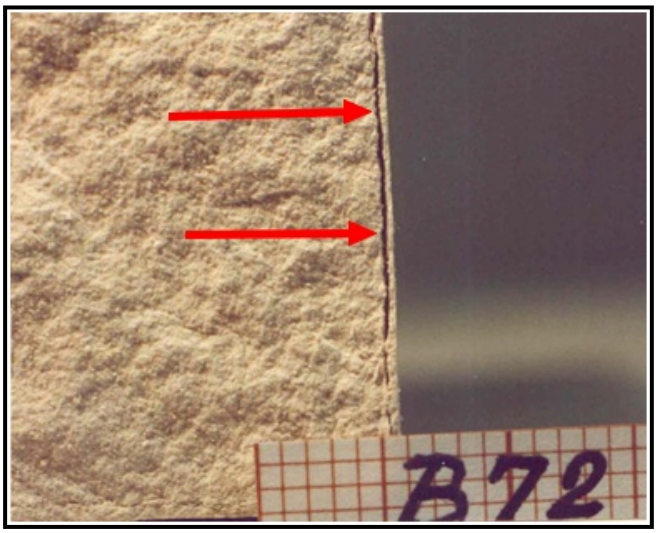
غالبا ما تؤدي عملية التقوية إلى خفض في مسامية الحجارة، قد يكون هذا الخفض جزئي أي بمسامية متبقية كبيرة أو كلي بمسامية متبقية صغيرة، يرى بعض الباحثون أنه من الناحية النظرية يفضل الحصول على الحالة الثانية أي خفض كلي للمسامية الأولية، لأن حالات كثيرة من التلف مرتبطة بالفراغات الموجودة داخل الحجارة التي تعتبر فضاء لحركة الماء وتبلور الأملاح وتجمد الماء، لكن من الصعب الحصول على خفض متجانس للمسامية، مما قد يشكل خطر احتباس الماء في المسامات التي لم تصلها المادة المقوية بحيث لا يمكن لهذا الماء أن يتحرك أو يتبخر، ويحدث عندئذ ضغط ميكانيكي على جدران المسامات، لذا يطبق حاليا خفض جزئي للمسامية الذي ينقص من نفاذية الحجارة للماء، وفي نفس الوقت يحافظ على نفاذية البخار من وإلى المادة الحجرية.[13]

سببا آخرا يضاف إلى التغلغل السيئ وهو كمية الرطوبة الموجودة في الشبكة المسامية أثناء عملية التقوية خاصة عندما يكون الوسط مشبع بالرطوبة، فالمقويات السيلانية مثلا تتطلب وجود كمية الرطوبة داخل الحجارة لتتم بلمرتها، لذا

[12] Beck (K), *Etude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité*, Thèse de doctorat en sciences des matériaux, université d'Orléans, Soutenue en octobre 2006, p.77
[13] Doehne (E) & Clifford (A), *Stone Conservation: An Overview of Current Research*, The Getty Conservation Institute, Second Edition, Los Angeles 2010, p.35

فإن نقصا في الرطوبة يؤدي بالضرورة لعدم تفاعل نسبة كبيرة من المادة المقوية، وفي المقابل فإن وجود الرطوبة في المسامات يعيق تغلغل وبلمرة أنواع أخرى من المقويات مثل الأكريليك، لذا فإنه من الضروري مراقبة نسبة الرطوبة داخل الشبكة المسامية قبل تطبيق المادة المقوية.[14]

يؤدي التغلغل الضعيف للمادة المقوية وانحساره في السطح إلى انفصال الطبقة السطحية للحجارة المعالجة نتيجة اختلاف في التمدد الحراري للسطح وعمق الحجارة أو تحت تأثير تبلور الأملاح أو تجمد الماء تحت الطبقة المعالجة، كما هو الشأن مثلا بالنسبة للبوليمير الأكريليكي بارالوييد ب 72 (الصورة رقم:3)، كما أن تبخر المذيب بسرعة يؤدي إلى تشكّل المادة الفعالة بالقرب من السطح ولا يكون لديها الوقت الكافي لتغلغل أعمق، ونتيجة ذلك تتشكل المادة الرابطة قريبة من السطح وبعيدة عن الأجزاء التي يستوجب علاجها.[15]



الصورة رقم 3: انفصال طبقة رقيقة لحجارة كلسية بسبب تغلغل سيئ للبارلويد ب72 (بتصرف)
(Podany (J) & al 2001)

عكس الحالات السالفة الذكر أحيانا يكون التغلغل الجيد مشكل في حد ذاته، وهذا عندما يكون التلف محسورا في السطح ولا يمتد إلى العمق، في مثل هذه الحالات لا يجب أن يتجاوز المقوي حدود الطبقة السطحية، لأن من بين القواعد الأساسية للتقوية هي اقتصار تطبيق العلاج على الأجزاء الفاقدة للتماسك فقط، ففي مثل هذه تطبق مادة مقوية ذات تغلغل ضعيف أو يطبق مقوي بتركيز منخفض.

4 –التغلغل الأمثل للمقويات

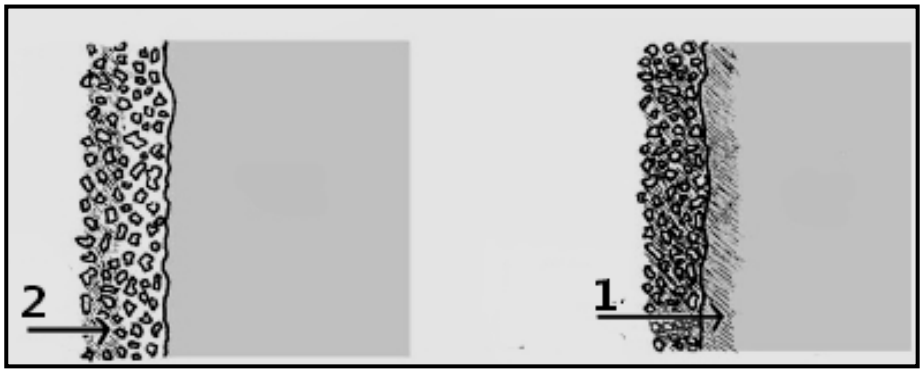
[14] Lewin (S.Z), « *Substances synthétiques pour la conservation de la pierre* », La dégradation et la conservation de la pierre, texte des cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre, publié sous la direction de Lazzarini (L) & Pieper (R), UNESCO 1982, pp.225-234

[15] Podany (J) & al, «*Paraloid B-72 as a structural adhesive and as a barrier within structural adhesive bonds: evaluations of strength and reversibility*», In JAIC 40 (2001), pp.15-33

لا تخلو أي عملية من عمليات الصيانة من نقائص وسلبيات، وتهدف مختلف الدراسات والأبحاث التي تجرى في مجال العلاج إلى محاولة حصر سلبيات العلاج وجعلها أقل ضررا وتأثيرا على المادة الأثرية، فيما يخص تقوية الحجارة يعتبر التغلغل السيئ وتغير لون الحجارة المعالجة من بين أهم سلبيات العلاج، بالإضافة إلى صعوبة تحديد الكمية الملائمة للمقوي، حيث لا ينصح بتشبيع الحجارة بالمادة المقوية لتفادي سد كلي للمسامات ما يؤدي إلى تغيير في نفاذية وحركة بخار الماء، كما يؤدي هذا إلى تغيير في الخصائص الفيزيائية للحجارة المعالجة مقارنة بالأجزاء السليمة، لكن يبقى هذا المبدأ نسبي بحسب نوع المقويات المستعملة.

يجب على المادة المقوية أن تتغلغل بشكل جيد حتى يتم إعادة تماسك العناصر الفلزية فيما بينها، وأن تتغلغل في عمق الحجارة إلى أن تصل إلى حدود الأجزاء السليمة منها كي تضمن إعادة تماسك الأجزاء الهشة التي يمكنها أن تنفصل بسهولة، أما إذا كان فقدان التماسك يصل إلى نواة الحجارة ففي هذه الحالة يجب أن يكون تغلغل كلي للمقوي (الشكل رقم:3)، يكون التغلغل سهلا نوعا ما بالنسبة للمادة الأثرية المنقولة حيث يمكن نقلها للمخبر وعلاجها بطرق مناسبة، كما يمكن زيادة في فعالية العملية إذا تمت ذلك في وسط مفرغ من الهواء، عكس الحجارة المشكلة للعناصر المعمارية التي لا يمكن نقلها.[16] ترتبط ظاهرة التغلغل بعدة عوامل منها:[17]

- الهندسة المسامية للحجارة وخصائصها.
- الخصائص الفيزيوكيميائية للمادة المقوية: تركيبتها الكيميائية، وزنها الجزيئي، آلية تفاعلها.
- الخصائص الفيزيوكيميائية للمذيب: تركيبته الكيميائية، كثافته، لزوجته، ضغطه السطحي.
- طريقة تطبيق المقوي، مدة هذا التطبيق وطبيعة الشروط المحيطة أثناء القيام بالعملية.



الشكل رقم 3: رسم توضيحي لمدى تغلغل المادة المقوية

(1) تغلغل جيد (2) تغلغل ضعيف

كما أن فعالية العلاج ترتبط بشكل مباشر بكمية المادة المتغلغلة وانتشارها المتجانس، إلا أنه يمكن لعوامل أخرى أن تؤثر بدرجات متفاوتة على النتائج النهائية للعملية، من الناحية النظرية يمكن القول أن معدل عمق التغلغل الأدنى للمادة المقوية هو 25 ملم بحسب طبيعة المادة، لكن في الواقع هناك القليل من المقويات التي يمكنها أن تتغلغل إلى عمق كبير

[16] Torraca (G), *Matériaux poreux* …, Op.Cit., p.87
[17] Ibid., p.119

باستثناء موادا معدودة كالمواد السيلانية، بينما أغلب المواد الأخرى كفليوسيليكات والأكريليك والفينيل والإيبوكسي والبولي إيريثان كلها تتميز بتغلغل ضعيف بسبب جزيئاتها الضخمة والتي تصل أبعادها إلى مئات الأنستروم*، ما يجعل محاليلها تمتاز بلزوجة عالية،[18] وهو السبب الأساسي في ضعف تغلغلها خاصة بالنسبة للحجارة ذات المسامات الدقيقة، لذا فإن تطبيق مواد على شكل مونومير يبقى الحل الأمثل بحيث تتم علمية البلمرة داخل الشبكة المسامية للحجارة، بالإضافة إلى المقويات غير العضوية التي تتميّز هي الأخرى بتغلغل ضعيف مثل كربونات الكالسيوم والباريوم.

هناك عدة معايير تؤخذ بعين الاعتبار عند اختيار المادة المقوية، فعلى سبيل المثال عازلية المادة المستعملة للرطوبة، ولكن ليست كل المواد المقوية بالضرورة مادة عازلة للرطوبة (Hydrofuge)، يمكن ضمان هذه الخاصية باستخدام مواد للحماية تطبق على سطح الحجارة بعد العلاج[19]، إن التوزيع الجيد والمتجانس للمحلول المطبق وعدم تشكل مواد ثانوية خطرة بعد تفاعله تعتبر أيضا معايير أساسية عند اختيار المادة المقوية، أما في ما يخص الإرجاعية فيمكن اعتبارها إلى حد ما معيار نظري ونسبي، فعند تغلغل أي مادة في الشبكة المسامية للحجارة والتحامها مع مكوناتها الفلزية فإنه من الصعب إزالتها بشكل نهائي.[20]

من بين الإشكاليات الأساسية لعملية التقوية هي كمية المادة المقوية اللازمة لضمان تقوية جيدة، يرى بعض الباحثون أن الطريقة المثلى لعملية التقوية تكمن في وصل العناصر الفاقدة للتماسك عن طريق جسور عادة لا يتعدى أبعادها 50− 80 µm (الصورة رقم: 4)، فعند تطبيق كمية قليلة من المادة المقوية تترتب عن هذه العملية تقوية ضعيفة (Sous-consolidation) لا تؤدي إلى العلاج المناسب، وفي المقابل يترتب عن تغلغل كمية كبيرة من المقوي تقوية مضاعفة (Sur-consolidation) حيث يكون سد معظم مسامات الأجزاء المعالجة ما يشكل خطرا، لكن بالرغم من ذلك يبقى مبدأ التطبيق بالتشبع (à refus) الأكثر تطبيقا في انتظار دراسات وأبحاث حديثة تعالج إشكالية التغلغل المتجانس للمقوي في الشبكة المسامية للحجارة المعالجة.[21]

أيضا في حالات تطبيق المقويات العضوية لا يجب القيام بسد للمسامات بشكل تام، لأن التغيرات في درجة الحرارة تسبب ضغط داخل الحجارة بسبب التباين الكبير في معاملا العناصر الفلزية للحجارة والراتنج، إن أفضل صيغة لتغلغل المقويات العضوية هي وصل جزيئات الحجارة فيما بينها بواسطة جسور من المادة المقوية، وتسمح هذه الطريقة بحركة السوائل والبخار.[22]

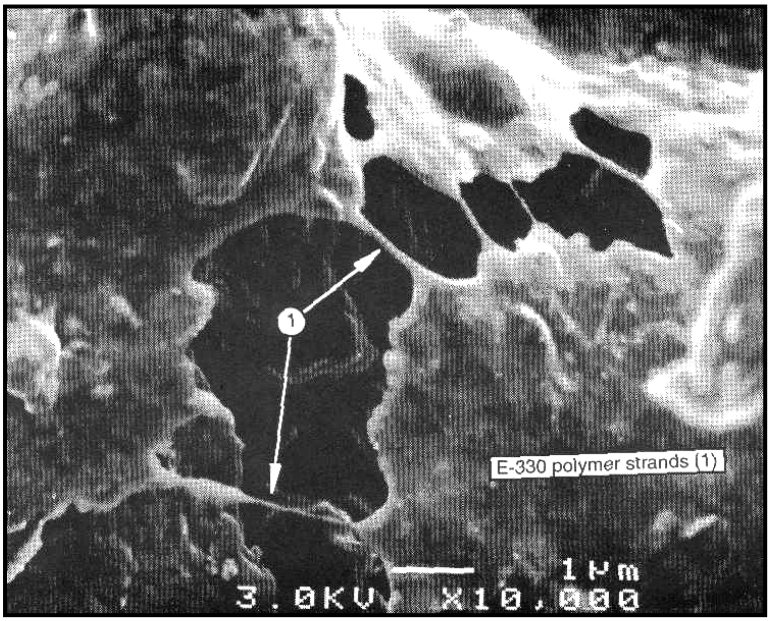
* 1 أنستروم = 10^{-10} م (Angström)

[18] Pinto (F) & Rodrigues (D), «*Stone consolidation: The role of treatment procedures*», Journal of Cultural Heritage 9 (2008), pp.38-53

[20] Ibid., p.36

[21] Pinto (F) & Rodrigues (D), Op.Cit. pp.38-53

[22] Lazzarini (L) & Tabasso (L), *Il restauro della pietra*, CEDAM, Milani 1985, p.167



الصورة رقم 4: صورة مجهرية (MEB) تبين جسور من المادة المقوية تربط عناصر الحجارة المعالجة
(Rodriguez-Navaro (C) & al 2007)

خاتمة

من غير السهل تقييم عملية تقوية الحجارة لأن هناك عدة معايير تتحكم في هذه العملية، فعامل الزمن يلعب دورا حاسما في تقييم عملية التقوية، حيث لا يكفي تقييم التقوية بعد العلاج مباشرة بل يجب متابعة التقييم للعدة سنوات، لأن طول مقاومة المادة المقوية لمختلف التأثيرات تعتبر ميزة من مميزات الفعالية في حد ذاتها، كما أن بعض الأبحاث جربت موادا وطرقا تبدو للوهلة الأولى أنها فعالة لكن بمرور الوقت تبين أنها غير ناجعة وفي بعض الحالات تسرع في عملية التلف.

تؤدي عملية التقوية لخفض متفاوت في المسامية الأصلية للحجارة بشكل غير متجانس، هذا ما قد يؤدي إلى احتباس الماء والبخار في المناطق التي تفصل الأجزاء المعالجة (مسامية منخفضة) والأجزاء غير المعالجة (مسامية مرتفعة)، هذا ما أدى إلى اعتماد مقويات التي لا تؤدي إلى خفض كبير في المسامية بحيث يقلل من تغلغل الماء إلى الحجارة من جهة والحفاظ على نفاذية جيدة لبخار الماء من جهة أخرى، وتكمن التقوية المثلى أساسا في محاولة استرجاع الخصائص الأصلية للحجارة، ومن بين أهم هذه الخصائص: المسامية، النفاذية، التمدد الحراري، اللون،المقاومة الميكانيكية.

المراجع البيبليوغرافية

الكتب:

Doehne (E) & Clifford (A), *Stone Conservatio: An Overview of Current Research*, The Getty Conservation Institute, Second Edition, Los Angeles 2010

Domasloswski (W), *Conservation préventive de la pierre*, Traduit par Woszyck (I), UNESCO, Paris 1982

Lazzarini (L) & Tabasso (L), *Il restauro della pietra*, CEDAM, Milani 1985

Torraca (G), *Lectures on Materials Science for Architectural Conservation*, The Getty Conservation Institute, Los Angeles 2009

Torraca (G), *Matériaux de construction poreux*, Traduit par Di Matteo (C), ICCROM, Rome 1986

Torraca (G), *Solubilité et solvants utilisés pour la conservation des biens culturels*, Traduit par Demaret (V) & al, ICCROM 1981

Vergès-Belmin (V) & al, *Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre*, ICOMOS, Ateliers 30, Paris 2008

الأطروحات:

Ezzdine (R), *Endommagement des monuments historiques en maçonnerie*, thèse pour obtenir le grade de docteur spécialité : Mécanique, Université Bordeaux 1**,** Soutenue en 2007

Beck (K), *Etude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité*, Thèse de doctorat en sciences des matériaux, université d'Orléans, Soutenue en octobre 2006

Ozturk (I), *Alkoxysilanes consolidation of stone and earthen building materials*, a Thesis In The graduate Program in historic preservation Presented To The faculties of the university of Pennsylvania 1992

الدوريات:

Bonora (R), « *L'utilisation des résines pour la conservation et la protection de la pierre* », La dégradation et la conservation de la pierre, texte des cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre, publié sous la direction de Lazzarini (L) & Pieper (R), UNESCO 1982, pp.245-254

Lewin (S.Z), « *Substances synthétiques pour la conservation de la pierre* », La dégradation et la conservation de la pierre, texte des cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre, publié sous la direction de Lazzarini (L) & Pieper (R), UNESCO 1982, pp.225-234

Tobasso (L), « *Traitements de conservation de la pierre* », La dégradation et la conservation de la pierre, texte des cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre, publié sous la direction de Lazzarini (L) & Pieper (R), UNESCO 1982, pp.211-224

Torraca (G), « *Philosophie générale de la conservation de la pierre* », La dégradation et la conservation de la pierre, textes des cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre, publié sous la direction de Lazarreni (L) & Pieper (R), UNESCO 1982, pp.187-210

المقالات

Pinto (F) & Rodrigues (D), «*Stone consolidation: The role of treatment procedures*», Journal of Cultural Heritage 9 (2008), pp.38-53

Podany (J) & al, «*Paraloid B-72 as a structural adhesive and as a barrier within structural adhesive bonds: evaluations of strength and reversibility*», In JAIC 40 (2001), pp.15-33