

الفصل الثانى

تلف المواد المسامية

**Deterioration of Porous materials**

الضغط الميكانيكى

**Mechanical stress**



## ٢-١ - سلوك المواد الهشة تحت إجهادات الضغط والشد

### Stress- strain behaviour of brittle materials:

السلوك الميكانيكي للطوب والمون والحجر يمكن تعريفه بلفظ هش Brittle أو بتفصيل أكثر .... صلب وصلد وسهل الكسر . Hard, rigid and fragile

وغالبا ما يتم دراسة السلوك الميكانيكي للمواد بواسطة اختبارات الشد والضغط Tension & Compression tests حيث تخضع العينات القياسية لزيادة في الضغوط أو الأحمال، وكذلك تخضع لاختبارات الشد أو التغير في الأبعاد.

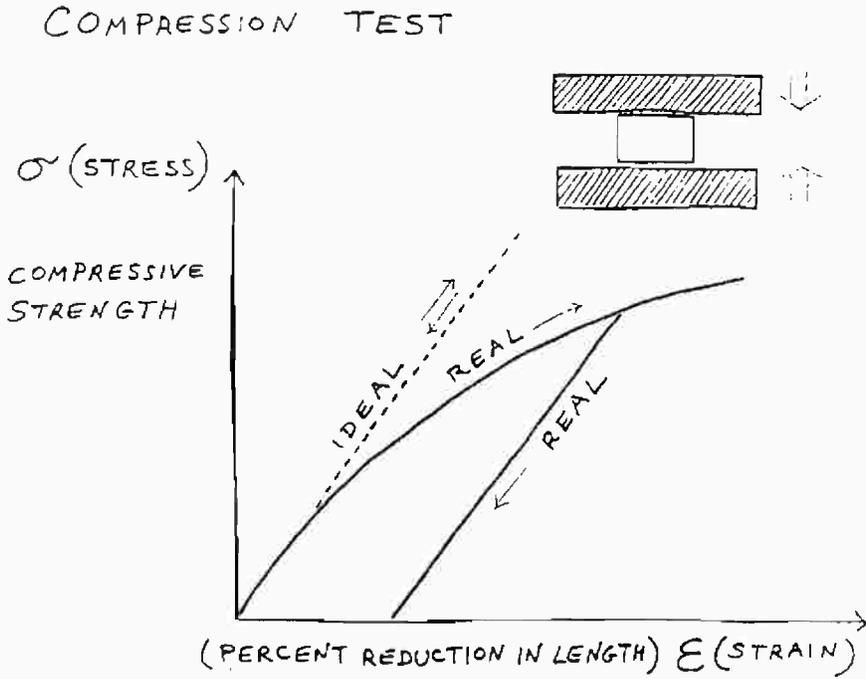
وتسجل باستمرار هذه الاختبارات الإجهادات التي تتعرض لها العينات، والتي تؤدي إلى تكسيرها ، وتسمى مقاومة الضغط أو الشد لهذه المواد The tensile or compressive strength of the Material .

وفيما يلي رسم بياني يوضح نتائج اختبارات الشد والضغط ، شكل رقم (١٥).

حيث يعبر محور الإحداثي الصادي (Y) عن الاجهادات أو الضغوط Stresses ومحور الاحداثي السيني (X) يعبر عن الشد Strain.

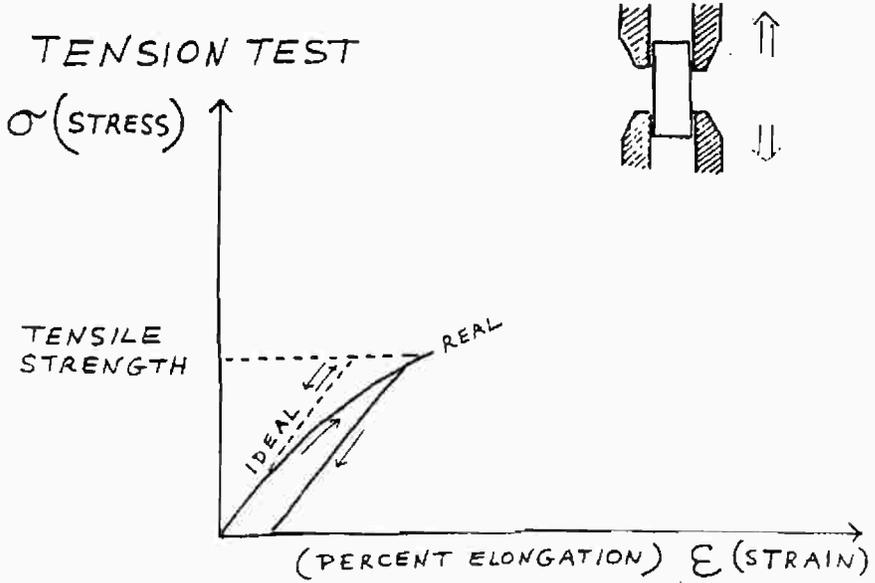
وفيما يلي أمثلة لمنحنيات نموذجية تمثل مقاومة الضغط والشد للمواد

الهشة، شكل رقم (١٥)



شكل رقم (١٥/أ) يوضح

رسم بياني لاختبارات الشد للمواد الهشة



شكل رقم ( ١٥ / ب ) يوضح  
 رسم بياني لاختبارات الضغط للمواد الهشة

في الحالة المثالية : المنحنى البياني يمثل على هيئة خط مستقيم ويدل على أن قوة الشد تساوي قوة الضغط الموجهة للعينة . وفي هذه الحالة تكون النسبة بين قوة الشد وقوة الضغط ثابتة وهذا يعطينا فكرة عن قدرة المادة على مقاومة أي تغير في أبعادها .

هذا الثبات لايعتمد على شكل العينة فحسب ، ولكن أيضا يعتمد على طبيعة المادة .. وهذا مايسمى المعامل Modulus أو معامل المرونة Elasticity modulus أو المعامل الشاب Young's modulus .

وتعتمد قيمة معامل المرونة على قوة الروابط التي تربط الذرات والبلورات معا داخل المادة .

أيضا في الحالة المثالية ، عندما يتم إزالة الضغط فإن معامل الشد يجب أن يعود إلى نقطة الصفر، ويجب على المادة أن تعود إلى حالتها الأولى.

مثل هذا السلوك أو التصرف للمواد يسمى: السلوك المرن Elastic behaviour وتسمى هذا المواد مواد مرنة Elastic Materials .  
ومن الرسم البياني السابق يتضح نتيجة اختبار مواد بناء حقيقية ، حيث نجد أن الخط البياني غير مستقيم، وهذا يوضح أن معامل المرونة Modulus لا يكون ثابتا على الأكثر .

أيضا قد يحدث بعض التشوه غير العكسي Irreversible deformation في بعض المواد اللدنة بعد إزالة إجهادات الضغط من عليها، وهذا يرجع إلى حقيقة هامة هي : أن معظم مواد البناء تتكون من عناصر مختلفة ، لها خواص مختلفة أيضا Heterogeneous .

وقد تتكون هذه المواد من بللورات عديدة مختلفة أو مواد زجاجية Glasses تتماسك مع بعضها بواسطة روابط بقوى مختلفة، وغالبا ما تبدأ بعض الروابط في التكسر قبل الأخرى ، أو يحدث أن تتفكك بعض العناصر قبل الأخرى .. كل ذلك يسبب تشوهات غير عكسية في مواد البناء.

كما أن هناك سبب آخر من أسباب الانحراف أو التغيير في السلوك المثالي Ideal behaviour لمود البناء ، عند تعرضها لاجهادات الضغط، وهذا يعتمد على حقيقة أن الضغط لا يكون موزعا بانتظام أو بصورة متجانسة خلال العينة التي يتم اختبارها .

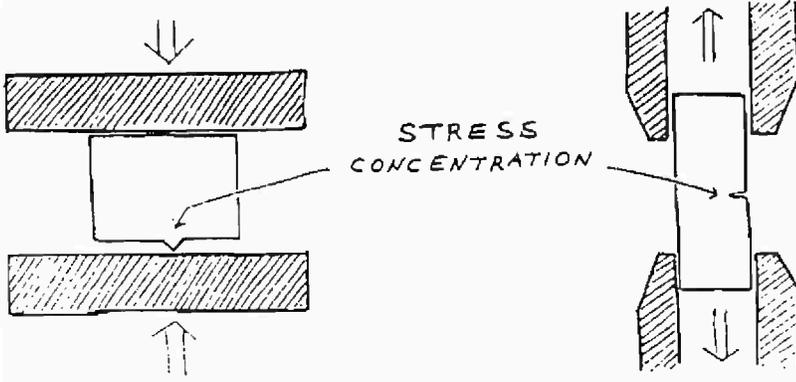
وبناء على ذلك يتركز الضغط على بعض المساحات دون الأخرى ، ونتيجة لذلك تتعرض بعض الأجزاء لضغوط أعلى من معدلاتها ، في حين تتعرض أجزاء أخرى لضغوط أقل مما كان متوقعا لها ، فإذا كانت المادة متجانسة تماما ، فإن الأجزاء التي تتعرض لضغوط أعلى تبدأ في التكسر قبل الأجزاء الأخرى .

وفيما يلي نذكر المناطق التي يتركز عليها الضغط :

١- الأسطح غير المنتظمة في اختبارات الضغط .

٢- الشروخ السطحية في اختبارات الشد .

يظهر ذلك في الشكل رقم (١٦).



شكل رقم (١٦) يوضح

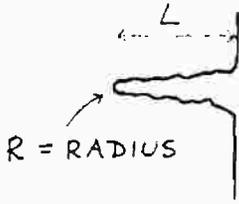
### مناطق تركيز الضغوط في العينات المختبرة

ومن المحتمل إلا تكون مواد البناء مواد لدنه ، وذلك لأنها يحدث بها تشوه غير عكسي إذا تعرضت لإجهادات الضغط ، ويطلق عليها مواد هشة Brittle ويحدث التشوه غير العكسي بصفة أساسية في مواد لبناء الهشة بسبب الكسور الموضعية Localized fractures مثل التشقق في البللورات Cleavage in Crystals أو تكسر في الزجاج Fracture in glass وهذه التشوهات لاتعود مرة ثانية بعد ازالة الضغط من عليها . المساحات المشوهة تكون أضعف من المساحات غير المشوهة ، وتحتوى على العديد من الشروخ الدقيقة .

وفى اختبار الشد لهذه المواد نجد أن تأثير تركيز الضغط فى مناطق التشوه - على الأخص - يكاد يكون ميتا Deadly .

وتبين معادلة تركيز اجهاد الشد أن عامل التعاضم أو التكبير Magnification factor على قمة الشرخ السطحى تتناسب مع الجذر التربيعى للنسبة بين عمق واتساع الشرخ Depth & width of the crack

TENSILE STRESS MAGNIFICATION  
AT CRACK TIP



$$m = 1 + 2 \sqrt{\frac{L}{R}}$$

m = MAGNIFICATION  
FACTOR

شكل رقم (١٧) يوضح

معامل تعاضم ضغط الشد على قمة الشرخ

ومعادلة معامل التعاضم

وطبقا للمعادلة السابقة فإن الشرخ الدقيق أو الشعرى الموجود فى سطح المادة يمد قمته - قمة الشرخ - باجهاد ضغط يتراوح بين ١٠-١٥٠ مره أعلى من نسبة إجهاد الشد.

وفى هذه الحالة فإن الشرخ يمت بسهولة داخل المادة ويحدث الكسر طبقا لتعاضم قيمة الاجهاد . ويظهر التشوه فى هذه المواد بصورة أكثر من الذى يظهر بواسطة إجهادات الضغط فى اختبار الضغط .

هذا وتقاوم المواد الهشة إجهادات الضغط بصورة أفضل من إجهادات الشد، كما أن قوة مقاومة الشد في هذه المواد تكون أقوى ، وذلك يعتمد على حالة سطح المادة .. مثل وجود شروخ من عدمه .

وبلاحظ أن مغامل مرونة مواد البناء الهشة لايمكن قياسه باستمرار ، وبالتالي يعتبر غير ثابت .

وعندما تتعرض المواد الهشة لإجهادات عالية نسبيا دون أن تتكسر ، فإنه يحدث بها - كما سبق الذكر - تشوه دائم ، كما يظهر بها بعض الشروخ الدقيقة Microscopic cracks في المناطق التي تتعرض لضغوط عالية، أو تتعرض لإجهادات داخلية .

هذه الشروخ تسلك سلوك المسام - بصفة خاصة - عند تعاملها مع ظاهرة الامتصاص- امتصاص الماء مثلا - وهذا يفسر العلاقة بين الاجهاد الميكانيكي ، وعمليات التلف التي تحدث بواسطة زيادة المياه في مسام المواد الهشة.

وربما يساعد دور الاجهاد الميكانيكي في عمليات تلف المواد الهشة ، في تفسير التناقض الذي يقابلنا غالبا بين اختبارات التجوية المسرعة (المعجلة) Accelerated weathering Tests وسلوك المواد الحقيقي Actual Field behaviour عندما يتم تطبيق مواد العلاج واختبارها .

حيث أنه في اختبارات التسريع أو التسارع Accelerating tests التي تتم في المعمل ، العينات تدور بين درجات الحرارة القصوى التي تتطابق مع حالة الجو Field conditions ولكن طبقا لصغر أبعاد العينات وتحررها من ظاهرة الاحتباس Constraints فإن نتائج الإجهادات تكون أقل

من تلك التي تؤثر على قطعة من مادة معرضه من خلال قطاع في بناء حقيقي.

كما تتأثر مقاومة الشد أيضا في مواد البناء المسامية القطبية ، بوجود مياه داخل هذه المسام . إذ أن الماء يسبب إنقاص مقاومة الشد ، وذلك لأنه عال القطبية ، وتستطيع جزيئاته بكل سهولة تكوين روابط على الأسطح الجديدة في الشروخ الحديثة Newly opened cracks .

أما المواد غير القطبية- وبنفس البرهان السابق - تؤدي إلى إنقاص مقاومة الشد ، ويمكن توضيح ذلك عن طريق الإختبارات ، حيث ثبت أن شمع البرافين Paraffin wax على الرغم من أنه ليس له مقاومة شد تذكر ، فإنه ربما يزيد مقاومة شد الحجر الجيري لأكثر من ٤٠٠٪.

## ٢-٢ الضغط الخارجي External stress:

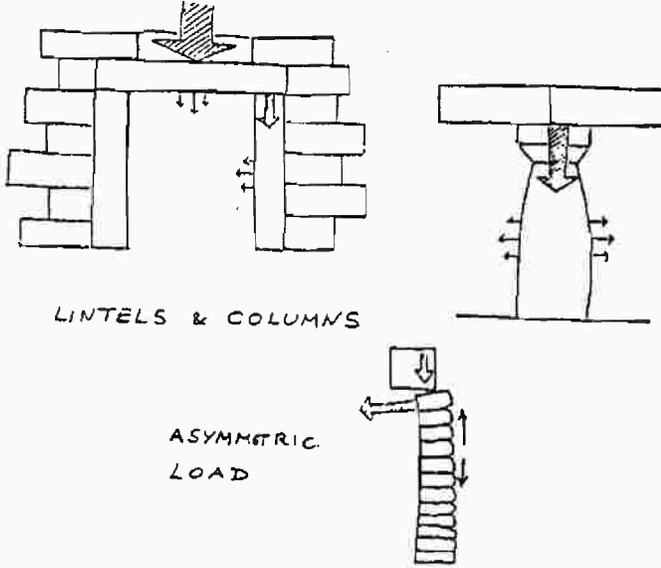
الضغوط الميكانيكية التي تتعرض لها مواد البناء، في مكانها، تؤدي إلى تدهورها ، خاصة ضغوط الشد Tensile stresses التي تؤثر في المواد الهشة ، ذات المقاومة الضعيفة .

وإذا لم تحدث هذه الضغوط كسور كبيرة Macroscopic breaking فإنها تسبب تشوهات دائمة، أو ثابتة Permanent deformation وشروخ دقيقة Microscopic cracks يعجل من حدوثها نسب التجوية التي تعرضت لها هذه المواد.

وفيما يلي نذكر العديد من الميكانيكيات التي تؤدي إلى ضغوط محلية عالية Localized High Stresses في مواد البناء.

## - الحمل Load:

في أي مبنى توجد بعض الأجزاء التي تكون عرضة لضغوط أعلى من الأجزاء الأخرى ، على سبيل المثال : الأعمدة Columns والعتب Lintels والدعامات Pillars . انظر الشكل رقم (١٨)



شكل رقم (١٨) يوضح

الضغوط التي تتعرض لهما الأعمدة والأعتاب

في الغالب يكون الهدف من وجود ضغوط شد قليلة Minimize tensile stresses لأنها تسمح لمواد البناء بالتصرف تحت ظروف اجهادات الضغط الرئيسية أو الحمل Mainly compression or load.

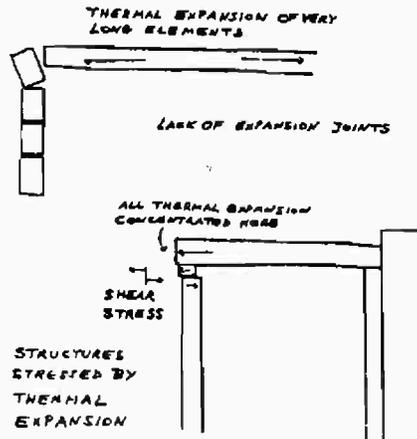
ومهما يكن فإن نظم الأسقف والأحمال غير المتماثلة ، وقوى الدفع الجانبية Side thrusts الخ تسبب بعض ضغوط شد Some tensile stresses ، هذه الضغوط - في الغالب - تلاحظ في المباني ، بصفة خاصة ،

فى الأجزاء التى تعرضت لقوى ضغط تحت تأثير عمليات التحلل السريعة.  
انظر الشكل السابق رقم (١٨).

### - التمدد الحرارى Thermal expansion :

تخضع مواد البناء يوميا وموسميا لدورات الحرارة  
Temperature cycles " أى أن هذه المواد تتعرض للتغير فى درجات  
الحرارة يوميا وموسميا" مثل هذه الدورات تكون مصادر هامة للضغط ،  
لأنهما تودى إلى تمدد Expand هذه المواد عند ارتفاع درجة الحرارة .  
وانكماشها Contract عند انخفاضها . انظر الشكل رقم (١٩)

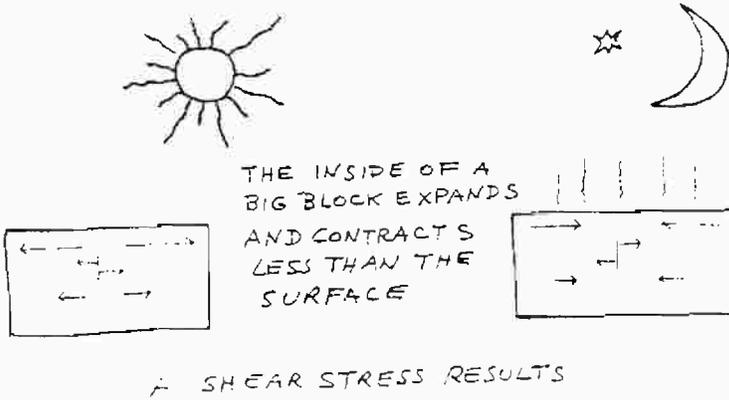
ويصبح التغير فى أبعاد مواد البناء، نتيجة طبيعية لحالات التمدد  
والانكماش المستمرة . ويزداد التغير نسبيا فى اتجاه الطول ، عندما يكون  
البناء عاليا ، وذلك لأن القطع الطويلة تكون عرضه لضغوط أكثر من القطع  
القصيرة . انظر الشكل رقم (١٩)



شكل رقم (١٩) يوضح

الضغوط الناتجة عن التمدد الحرارى لمواد البناء

وتزداد الضغوط داخل أجزاء المواد المتجانسة Homogeneous بين السطح الخارجى المعرض مباشرة ، للبيئة ، ويتعرض لتأثير التغير الكبير فى درجات الحرارة ، وبين الأجزاء الداخلية، التى تبعد عن المؤثرات الخارجية المباشرة ، وتكون درجة حرارتها أقل من درجة حرارة السطح الخارجى . وفى المناطق الصحراوية ، وعندما يكون الجو صافياً، فإن التغير فى معدلات درجات الحرارة يكون كبيراً جداً بين الليل والنهار ، حيث تبرد الأرض فى الليل عن طريق اتجاه الاشعاعات Radiation نحو السماء المظلمة The black sky . انظر الشكل رقم (٢٠)



شكل رقم (٢٠) يوضح

التمدد والانكماش فى مواد البناء نتيجة التغير فى معدلات الحرارة

وينكرر حدوث ظاهرة التمدد والانكماش المعروفة بالتمدد الحرارى، فى المباني، حيث تتسبب فى تحريك التمدد الناتج عن الحرارة فى عناصر

المبنى، الذى يحدث بدوره ذبذبات داخل هذه العناصر. وبما أن هذه العناصر مقيدة فى البناء ، فإن الذبذبات تسبب إجهادات ينتج عنها تشويه دائم أو شقوق فى العناصر المعمارية .

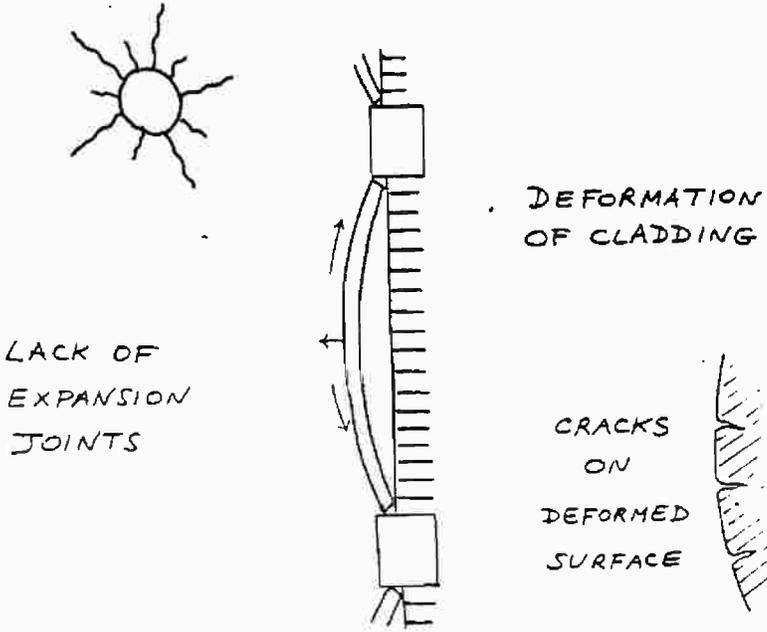
وعندما تظهر الشروخ أو الشقوق فى العناصر المعمارية غالبا لا تعود إلى حالتها الطبيعية مرة أخرى ، بصورة كاملة وذلك لأن حطام مواد البناء يسقط داخل هذه الشروخ ويؤدى إلى توسعتها تدريجيا أكثر فأكثر.

ومن الممكن أن تكون مواد الكسوة الخارجية محل ضغوط كبيرة إذا لم يراع المصمم ، أو يضع فى حسابه التمدد الحرارى للمواد التى تستخدم فى تنفيذها .

فمثلا : الكسوة الحجرية تتمدد تمدا محـدودا Restricted expansion بسبب الحرارة، هذا التمدد يسبب انبعاج ينتج عنه شروخ دقيقة، وتشوهات غير عكسية فى السطح الخارجى للكسوة . انظر شكل (٢١).

مع ملاحظة أن البلاطات العديدة إذا جمعت مع بعضها فإنها تتصرف وكأنها قطعة واحدة.

ويمكن حساب نسبة التمدد بسهولة ، ولو افترضنا وجود بلاطه طولها ٦ م ، تعرضت لحرارة أعلى من الحرارة الجوية بمقدار ١٠ م° . فإنها سوف تتبعج بنسبة ٢٥مم، بمعدل تغير فى الطول حوالى ٠,٢٥ مم.



شكل رقم (٢١) يوضح

التشوهات التي تحدث في طبقات الكسوة

الخارجية بسبب التمدد الحرارى

- تحلل الرخام Deterioration of Marble :

يحتوى الرخام على بللورات كبيرة من الكالسيت (كربونات الكالسيوم) ويتغير معامل التمدد الحرارى للكالسيت طبقا لاتجاه هذه البللورات ، أو مظهرها الخارجى .

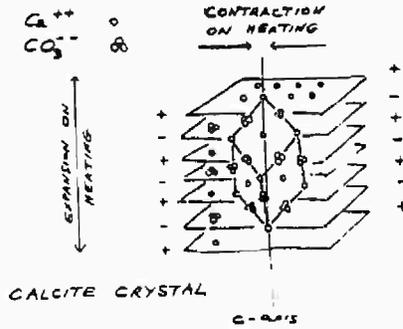
وقد ثبت أن معامل التمدد الحرارى لبلوره الكالسيت

\*  $25 \cdot 10^{-6}$  m/m°C along the C.axis

\*  $-5 \cdot 10^{-6}$  m/m°C across the C. Axis

وفيما يلى شكل يوضح تأثير زيادة درجة الحرارة على بللورة الرخام، حيث تتمدد البللوره فعليا فى اتجاه المحور (C) أى فى الاتجاه الرأسى أو

الطولى ، وتتكمش فى الاتجاه الأفقى أو العرضى The transversal direction . انظر الشكل رقم (٢٢)



شكل رقم (٢٢) يوضح تمدد وإنكماش بللوره رخام بواسطة التغير فى معدلات الحرارة

ويسبب التحرك الناتج عن التمدد والانكماش فى الرخام ضغوطا بين كل بلورتين تعرضتا لظروف التمدد " أى تعرضتا لزيادة الحرارة ". وقد يحد نفس الشيء بسبب إتصال كل بللوره بالأخرى داخل معدن الكالسيت نفسه .

وعموما فإن الضغوط الحرارية The thermal stresses تحدث تفكك أو تصفح Cleavage داخلى فى البلورات. "أى تنفصل البلورات عن بعضها". لهذا السبب نجد أن الرخام تزداد مساميته بزيادة وقت تعرضه للحرارة فى البيئة المحيطة .

ونلاحظ أن شكل الشروخ التى تحدث نتيجة التمدد الحرارى، يوضح شكل وكيفية حركة المياه عند زيادتها داخل هذه الشروخ ، مما يندرج بحدوث عمليات تحلل فى الأجزاء الداخلية للمواد .

## - التمدد الحرارى التفاضلى Differential thermal expansion:

تختلف بعض مواد البناء بشدة عن المواد الأخرى فى معامل التمدد

الحرارى Expansion coefficient.

وفيما يلى جدول يوضح حركة تقريبية حررة Unrestrained

movement فى قطع من مواد مختلفة ، عند زيادة درجة الحرارة ٣٠ م°.

بمعنى أن هذا الجدول يوضح التمدد الطولى الذى يحدث فى بعض مواد البناء

نتيجة تعرضها لإرتفاع فى درجة الحرارة .

جدول رقم (١) يوضح

مقدار التمدد الحرارى لبعض مواد البناء

Materials	Thermal Expansion
Marble	0.15 mm
Cement concrete	0.3 ÷ 0.4 mm
Limestone	0.15 mm
Granite	0.25 mm
Lime - sand mortar	0.3 ÷ 0.4 mm
Brick and terracotta	0.15 ÷ 0.20 mm
Iron	0.3mm
Glass	0.3 mm
Aluminium	0.7 mm
Thermo-plastic resins	1.5 ÷ 3.0 mm
Reinforced plastics	0.7 mm

ويجب الوضع فى الاعتبار أن معاملات التمدد الحرارى للحديد

والخرسانة تقريبا ضعف معاملات تمدد الطوب والحجر الجيرى والحجر

الزملى ومونة الجير .

مثل هذا الاعتبار هام جدا خاصة عندما يتم وضع مخطط إنشائى

لتسليح المباني القديمة باستخدام مواد مثل : الحديد والخرسانة .

إذ أنه عندما يتصل هذين العنصرين بمواد البناء ويتجهان نحو التمدد أو الانكماش بطريقة أو بأخرى ، فإن الاجهادات سوف تزداد فى كل منهما . لكن المادة الضعيفة سوف تتكسر أو تتشوه بسرعة أكثر ، ويحدث فيهما شروخ ميكروسكوبية .

وفى الغالب فإن عناصر البناء القديم القريبة من المنشآت المسلحة الحديثة تتعرض للتلف المتزايد باستمرار ، ويظهر بها شروخ دقيقة .Micro cracks

وفيما يلى قائمة بمعاملات التمدد الحرارى للمواد الشائعة الاستعمال فى المياني .

### جدول رقم (٢)

#### معامل التمدد الحرارى لبعض مواد البناء

Concrete	$10.10^{-6}$	
Concrete with gravel	$9 \div 12. 10^{-6}$	
Concrete with expanded clay	$7 \div 9.10^{-6}$	
Cement mortar	$10 \div 11.10^{-6}$	
Lime mortar	$8 \div 10.10^{-6}$	
Lime stone	$7.10^{-6}$	
Brick	$5.10^{-6}$	
Granite	$8.10^{-6}$	
Glass (10% alkali)	$4.8.10^{-6}$	
Iron	$11.5. 10^{-6}$	
Steel	$10 \div 14. 10^{-6}$	
Copper	$16.8. 10^{-6}$	
Aluminium	$23.8. 10^{-6}$	
Lead	$29.4, 10^{-6}$	

Pine, along fibres	$5.4. 10^{-6}$	across fibres $34.1. 10^{-6}$
Oak, along fibres	$3.4. 10^{-6}$	across fibres $28.4. 10^{-6}$
Fir		across fibres $58.4. 10^{-6}$
Wood Laminates	$10\div 40. 10^{-6}$	
Polyester resins	$100\div 150. 10^{-6}$	
Glass-polyester laminates	$35 \div 45. 10^{-6}$	
Epoxy resins	$60.. 10^{-6}$	
Epoxy with silica filler (1:5)	$20. 10^{-6}$	
Acrylic resins	$70 \div 80. 10^{-6}$	
PVC	$70\div 80. 10^{-6}$	
Nylon 66	$70\div 100. 10^{-6}$	

### - التمدد بسبب الرطوبة Expansion due to Moisture :

تتمدد معظم مواد البناء عندما تمتص Absorb الماء وتتكمش عندما تطلقها Release it .

وفي الغالب فإن معاملات تمدد هذه المواد تكون صغيرة إلى حد ما وقد تتشابه معها الإجهادات الناتجة عنهما ، لذلك فمن المتوقع إهمال هذه الإجهادات عند حدوثها بسبب التغيرات في درجة الحرارة .Temperature variations

ومن المهم جدا أن نضع في الاعتبار التمدد الذي يحدث بسبب الرطوبة ، عند فحص المواد التي تحتوى على طفله Clay. مثال ذلك : بعض أنواع الحجر الرملى الواسع الاستخدام فى البناء ، كالمولاس السويسرى The swiss Molasses الذى يتمدد عند بلله بنفس مقدار التمدد الذى يحدث عند زيادة درجة الحرارة التى يتعرض لها الأكثر من  $50^{\circ} \text{C}$  .

وفي مثل هذه الحالة فإن التمدد بسبب الرطوبة يسبب إجهادات كبيرة ، تحدث بين سطح الحجر والأجزاء الداخلية - وبصفة خاصة - عند تبليل هذا السطح بالماء.

- الضغط الذي يحدث بسبب تقنيات العمل

### Stress caused by working techniques

ربما يحدث التلف الميكانيكي لأسطح مواد البناء أثناء تجهيز هذه المواد للاستخدام، أو بسبب التنظيف الميكانيكي.

وذلك يحدث، وبصفة خاصة، في الأحجار التي يتم الحصول عليها من المحاجر، بواسطة التفجير بالديناميت ، حيث تتصدع أسطح هذه الأحجار . كما أن عمليات النحت والتشكيل باستخدام الشواكيش أو السكاكين أو غيرهم تؤدي إلى نفس النتيجة .

أيضا عمليات التنظيف باستخدام Grit blasting أو Scratch brushing ربما تسبب أضرار ميكانيكية على الأسطح ، عن طريق زيادة عدد الشروخ الميكروسكوبية والتي تؤدي دائما إلى تعجيل معدلات التجوية. على العكس من ذلك يجب معرفة أن الصقل الجيد لأسطح الأحجار ، أثناء إعدادها للاستخدام في أعمال البناء ، يمكن أن يزيل كل عيوب المادة، وذلك لأن هذا العمل يؤدي إلى إعطاء المادة سطح أمامي أملس ناعم يقاوم عمليات التجوية ، ويصبح أكثر مقاومة لعمليات التلف .

ويلاحظ أنه في معظم مواد البناء تعتمد معدلات التلف الذي يحدث بها على حالة أسطحها.

## ٢-٣- الضغط الداخلي Internal stress:

من الممكن أن ترتفع الضغوط داخل مسام المواد المنفذة ، وذلك عندما تتكون داخل هذه المسام بللورات ثلجية في حالة وجود الصقيع Frost ، أو عندما تتبخر المياه تاركة بللورات لمواد ذائبة - مثل : بللورات الملح Salt crystallization داخل مسام المواد .

في كلتا الحالتين فإن نمو البللورات داخل مسام المواد يؤدي إلى وجود ضغوط داخلية " قد تتساوى مع مقاومة الضغط في المواد التي تحيط بها " ، إلا أن زيادة ضغوط النمو البللوري - في الغالب - يؤدي إلى تفتت هذه المواد .

ومهما يكن .. فإنه بالقرب من السطح ، يتعرض قطاع رقيق من المادة - طبقة رقيقة - لقوى دفع من الداخل ، قد تساوى قوى الشد التي تقتلعها من الخارج ، وربما يسهل ذلك من تشقق أو تفتت أو كسر المواد الهشة في هذه الطبقة أو القطاع .

الميكانيكيات التي تحدث بواسطتها الضغوط الداخلية يمكن مناقشتها أو وضعها في الاعتبار ، خاصة بعد ماتوفرت لدينا معلومات كافية ومتاحة لتفسير هذه الميكانيكات، إلا أن ذلك لا يمنع أننا مازلنا في حاجة إلى أبحاث أخرى .

### الصقيع Frost:

يوجد ميكانيكيتان أساسيتان للضغوط الداخلية الحاصلة بسبب الصقيع يمكن شرحهما فيما يلي :

## الميكانيكية الأولى : ميكانيكية دفع الثلج أو الصقع Frost heave:

هذه الميكانيكية تعطينا فكرة عامة عن بللورات الثلج Ice Crystals أو عدسات الثلج Ice Lenses التي تنمو في الفراغات الواسعة نسبيا ، لكنها لا تستطيع النمو في المسام الضيقة إلا تحت ضغط .

والماء الموجود داخل المسام الصغيرة يمد البللورات بمصدر دائم للمياه عن طريق الانتشار Diffusion

## الميكانيكية الثانية : الاحتمال أو الإمتلاء بالماء Water interapment:

تعتمد هذه الميكانيكية - في الأصل - على زيادة الحجم الذي يتزامن مع عملية التجمد .

وفي هذا النموذج ، يكون الماء الذي يظل على حالة السيولة معوقا لعملية التجمد في مناطق التجمد ، حيث لايجد مكانا يسمح له بالتجمد عندما يريد ذلك . وتظل المياه المتبقية متحركة في حالة السيولة ، منتقلة من مكان لآخر إلى أن تبدأ فعلا في التجمد ، لذلك يتشأ الضغط عندما يتجمد الماء المتبقى فعليا . انظر الشكل رقم (٢٣).

## - تبلور الأملاح Salt crystallization:

في هذه الحالة - أيضا - يحدث نموذجين لميكانيكا التلف .

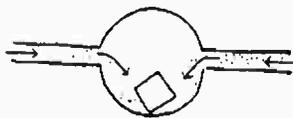
## النموذج الأول : نموذج الدفع A Heave Model:

هذا النموذج يشبه نموذج دفع الثلج ، ويعتمد على نمو بللورات الملح في المسام الواسعة ، أو الشروخ ، عندما تمتص هذه البللورات المحلول المائي من المسام الصغيرة . ولو استمر مص الماء متاحا من المسام

الصغيرة ، ستملئ المسام الواسعة بالبلورات مسببة ضغوط داخلية متلفة في المواد .

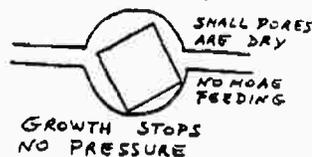
وفى هذه الحالة - أيضا - تحدد النسبة بين حجم المسام الضيقة والمسام الواسعة ، مقدار الضغوط ، التي تزداد نسبتها غالبا فى المسام الضيقة - الدقيقة - عنها فى المسام الواسعة .

A CRYSTAL GROWS IN A LARGE PORE. THE SMALL PORES FEED THE GROWTH

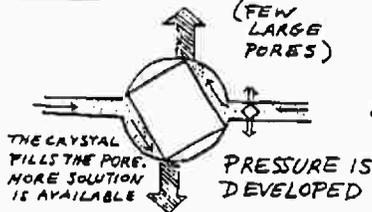


CASE 1.

MANY LARGE PORES (FEW SMALL PORES)



CASE 2. MANY SMALL PORES (FEW LARGE PORES)



GROWING CRYSTAL  
CAPILLARY SUCTION  
PORE WALL  
CAPILLARY SUCTION IS THE DRIVING FORCE

### شكل رقم (٢٣) يوضح

حالات نمو البلورات داخل مسام المواد

الحالة الأولى : توقف نمو البلورات نتيجة جفاف المسام .

الحالة الثانية : استمرار نمو البلورات نتيجة وجود تحاليل داخل المسام .

## النموذج الثاني : نموذج تميؤ الأملاح Hydrated salts:

هذا النموذج يعتمد على الأملاح التي تكون بللورات ملحيه مائية Hydrated salt crystals ، هذه البللورات تحتوى على بعض جزيئات الماء التي تشغل مواقع هامة ضمن تركيبها البللورى The crystal structure مثل: كبريتات الصوديوم  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  وكربونات الصوديوم  $\text{NaCO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  وكبريتات  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  . بالاضافة إلى مركبات كيميائية أخرى عديدة ، مثل : الأملاح التي لا تكون بللورات مائية Not form Hydrated Crystals مثل كلوريد الصوديوم  $\text{CaCl}$ .

أيضا فإن الأملاح المائية ربما تتكون في شكل بللورات بدون وجود الماء ، مثل : الانهيدرايت - كبريتات الكالسيوم غير المائية - وهذه تشغل أحجام أقل من الأملاح المائية .

والأملاح المائية قد تتضخم ببطء شديد وبنسب متفاوتة لتتلاءم في النهاية - بكل سهولة - كل الفراغات المتاحة داخل المسام الواسعة في المواد، وينشأ عن ذلك ميكانيكة دفع Heave mechanism ذات فعالية كبيرة في عمليات التلف .

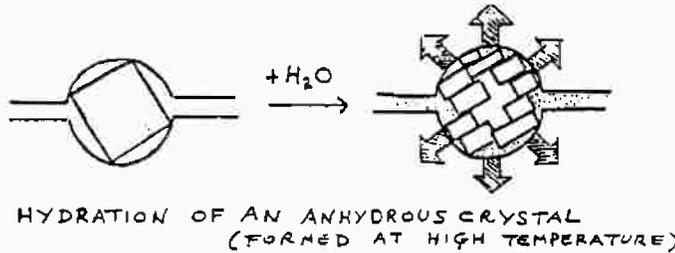
ومع ذلك فإن قدرتها الشخصية على خلق ضغوط تمزق Disruptive stresses تكون مشروطة بانتقالها إلى طور الانهيدرايت Anhydrite أو الأقل هدرته Less hydration . وهذا يعتمد على تأثير التغير في حالة الجو المحيط بمواد البناء المسامية .

فمثلا : عندما تملأ البللورات المائية مسام المواد ترتفع الضغوط الداخلية، وعندما ترتفع درجة الحرارة ، وتتنخفض الرطوبة النسبية ، تتحول

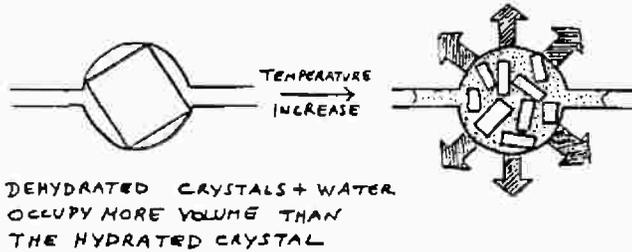
الحالة المائية Hydrated للأملاح إلى الحالة الأقل مائيه  
Less hydrated تاركة بعض جزيئات الماء حره .

وبلاحظ أن الحجم النهائي للبلورات الملحية تكون أكبر من البلوره  
الأصليه .

على الجانب الآخر فإن البلورات الملحية ، الأنهيدرايت أو الأقل  
هدرتة، والتي تملأ المسام الواسعة ، من الممكن أن تنتقل إلى الطور المهذرت  
أو المائى، بواسطة إمتزاز الماء من المسام المحيطة . وتصبح هذه البلورات  
أكثر ضخامة ، وتضيف ضغوط أخرى ال الضغوط الموجودة أصلا بسبب  
تبلور هذه الأملاح . انظر الشكل رقم (٢٤)



DEHYDRATION OF A HYDRATED CRYSTAL  
(FORMED AT LOW TEMPERATURE)



شكل رقم (٢٤) يوضح

الضغوط الناتجة عن تكون بللورات الأملاح داخل مسام المواد

## - التآكل النقرى Alveolar Erosion:

التآكل النقرى نموذج من نماذج تحلل المواد المسامية التي تلعب الأملاح المتبلورة أهم حلقاته .

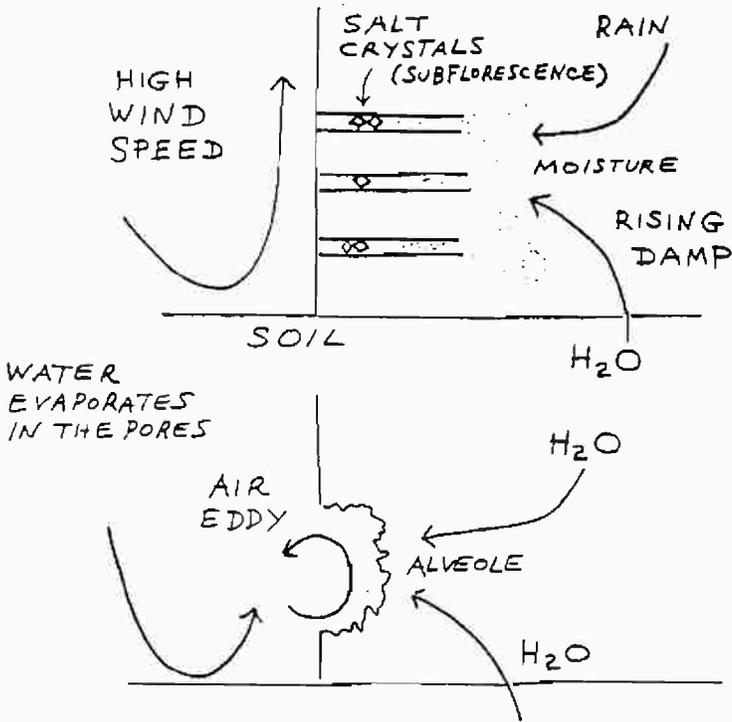
ويعتمد التآكل النقرى على حقيقة هامة تميزه ، وهى حدوث عمليات تآكل فى مناطق مميزة لتكون فى النهاية تجاويف عميقة أو نقر Deep cavities or Alveoles وذلك فى الأسطح غير المحمية ، فى الوقت الذى لا تتأثر فيه الأسطح الأخرى القريبة من مناطق التآكل .

وتحدث عمليات التآكل النقرى دائما على الأسطح التى تتعرض للرياح الشديدة ، حيث تزداد دوره بخر الماء من هذه الأسطح .

فى مثل هذه الحالة لا تتكون طبقة رقيقة من الماء ، فى حالة السيولة ، على السطح الخارجى لمواد البناء ، لأن البخر يكون سريعا إلى حد كبير . كما أن معدلات الماء الذى يصل إلى السطح لتغذية البخر تكون غير كافية لذلك تظهر المواد وكأنها جافة ، إلا أن البخر يحدث فعليا تحت السطح فى المسام نفسها . ويزداد تأثير ضغوط تمزق بللورات الأملاح Disruptive stresses فى مناطق البخر ، ويبدأ سطح البخر فى التحلل بسرعة.

علاوة على ذلك يحدث تعجيل لعمليات التلف عندما تحدث فجوة فى السطح ، لأن الرياح تزداد سرعتها داخل هذه الفجوة بسبب دوامات الهواء كما يزداد البخر فى هذه المساحة النوعية . انظر الشكل رقم (٢٥)

## ALVEOLAR EROSION



شكل رقم (٢٥) يوضح

التآكل النقرى بفعل الرياح والأملاح المتبلورة

فى الماضى كان يعتقد أن الرياح هى السبب الأساسى فى تكوين النقر  
Alveole formation بسبب ظاهرة السفع بالرمال Sand blasting التى  
تحملها هذه الرياح عند تحركها .

لكن اتضح أن الرياح ليست العامل الأساسى ، وإنما هى عامل ثانوى  
يساعد فى زيادة التلف بواسطة النقر وأن العامل الأساسى فى هذا النموذج من  
التلف هو الأملاح المتبلورة . لكن الرياح تسبب نموذج آخر من نماذج التحلل  
يسمى : التآكل الهوائى Eolic erosion أو التآكل بالرياح .

وقد يحدث أن يرى المرمم أثناء متابعته الدورىه للمبانى الأثرية  
المكشوفة ، الفجوات الناتجة عن التآكل النقرى ، ويقوم بعلاج هذه الفجوات  
علاجاً موضعياً عن طريق ملئها بمواد مانعة للماء  
Impervious to water وفى هذه الحالة للأسف تنتقل عمليات البخر إلى  
الأسطح الميطة فى المادة الأصلية ، والتى تبدأ بالتالى فى التحلل " لذلك يجب  
أن يكون العلاج شاملاً السطح كله " .

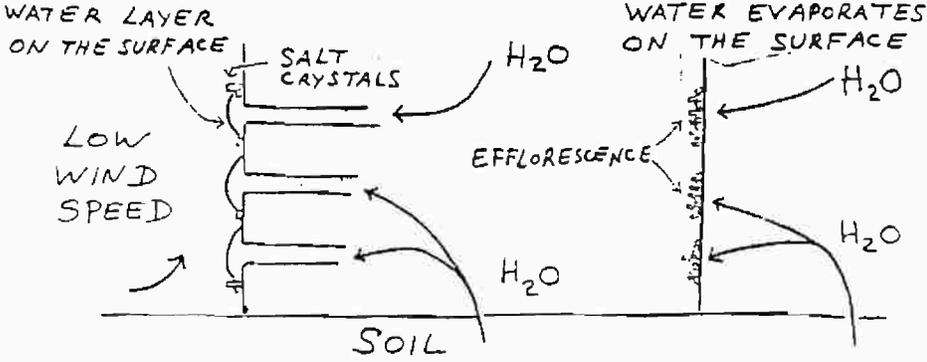
#### - تزهر الأملاح Efflorescences :

تزهر الاملاح عبارة عن : بللورات ملحية تتكون على أسطح المواد  
المسامية عندما يتبخر منها الماء ، لأن الماء يغذى هذه المسام بكميات كبيرة ،  
أو لأن سرعة الرياح تكون قليلة .

فى هذه الحالة فإن بللورات الأملاح تتكون من نقط - وبصفة أساسية  
- خارج المسام ، والتاثير المتلف لهذه البللورات يكون ضعيفاً أو قليلاً .

هذا الحالة موضحة فى الشكل رقم (٢٦) .

## EFFLORESCENCE



شكل رقم (٢٦) يوضح

تزهّر الأملاح على أسطح المواد المسامية

- تأكل الكلابات الحديدية :Corrosion of Iron Cramps

تحلل حديد التسليح ينتج عنه زيادة في حجم المعدن ، لأن صدأ الحديد Rust أو الأكاسيد المائية Hydrated oxides سواء كانت كثيرة أو قليلة تشغل حجوم أكبر من حجوم المواد الأصلية .

ولو أن الحديد تم طمره Imbedded في مواد البناء عند استخدامه كمادة تقوية أو تجميع Issemblage or Reinforcement فإن تآكل الحديد ربما يتأخر لعدة عقود . " العقد عشر سنوات " لأن الماء الزائد والأكسجين يصلان إلى سطح المعدن ببطء شديد إلى أبعد حد .

ومع ذلك فإنه لو بدأ بعض التآكل في الحديد ، فإن زيادة حجم الحديد، يسبب ضغطاً داخلية ، وتتكون شروخ دقيقة في المواد المحيطة .

والنتيجة أنه يسهل وصول زيادة من الماء والهواء إلى سطح المعدن ، لذلك فإن عمليات التلف الخطيرة بعد أن تبدأ بصورة ضعيفة ، فإنها تزداد فجأة ، وفي وقت قصير قد تؤدي إلى نتائج مدمره. Catastrophic results. وتوجد على سبيل المثال ، أمثلة هامة للتلف بسبب استخدام حديد التسليم في المباني الأثرية والتاريخية في :

The temples of the Acropolis of Athens, the pantheon in paris and st. Paul within the walls in rome.

\*\*\*\*\*