



UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

Máster Universitario en Estructuras  
Curso 2020-2021

# Tema II: Fuentes de deterioro, patologías estructurales, y tecnologías de monitorización

Módulo: MÓDULO FUNDAMENTAL: CALIDAD Y DAÑO

Materia: Análisis Modal y Detección de Defectos

**Enrique García Macías**

[enriquegm@ugr.es](mailto:enriquegm@ugr.es)

**Departamento de Mecánica de Estructuras e  
Ingeniería Hidráulica**

# Desarrollo del curso

º	FECHA		HORA	PROFESOR	TEMA		
Clase 1	Lunes	1	febrero	9:30-11:30	EGM	1	Introducción: Análisis modal dentro del marco del mantenimiento de la salud estructural.
Clase 2	Lunes	8	febrero	9:30-11:30	EGM	2	Fuentes de deterioro, patologías estructurales, y tecnologías de monitorización.
Clase 3	Lunes	15	febrero	9:30-11:30	EGM	3	Taller: procesamiento de señales.
Clase 4	Lunes	22	febrero	9:30-11:30	EGM	4	Análisis modal experimental.
Clase 5	Lunes	15	marzo	9:30-11:30	EGM	5	Análisis modal operacional.
Clase 6	Lunes	12	abril	9:30-11:30	EGM	6	Análisis modal operacional automatizado. Práctica de laboratorio I.
Clase 7	Lunes	19	abril	9:30-11:30	EGM	7	Taller: Identificación del daño estructural.
Clase 8	Lunes	26	abril	9:30-11:30	RCT	8	Técnicas de identificación dinámica basadas en análisis modal operacional.
Clase 9	Lunes	26	abril	12:00-14:00	RCT	9	Práctica de laboratorio II: Test de vibración ambiental.
Clase 10	Martes	27	abril	9:30-11:30	RCT	10	Casos de estudio.
Clase 11	Martes	27	abril	12:00-14:00	RCT		Presentación de trabajos.

ENTREGA DE TRABAJOS Y EVALUACIÓN

Del 3 al 28 de mayo



UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

# ÍNDICE

- Patologías estructurales.
- Agentes de degradación.
- Tecnologías de monitorización.
- Sensores



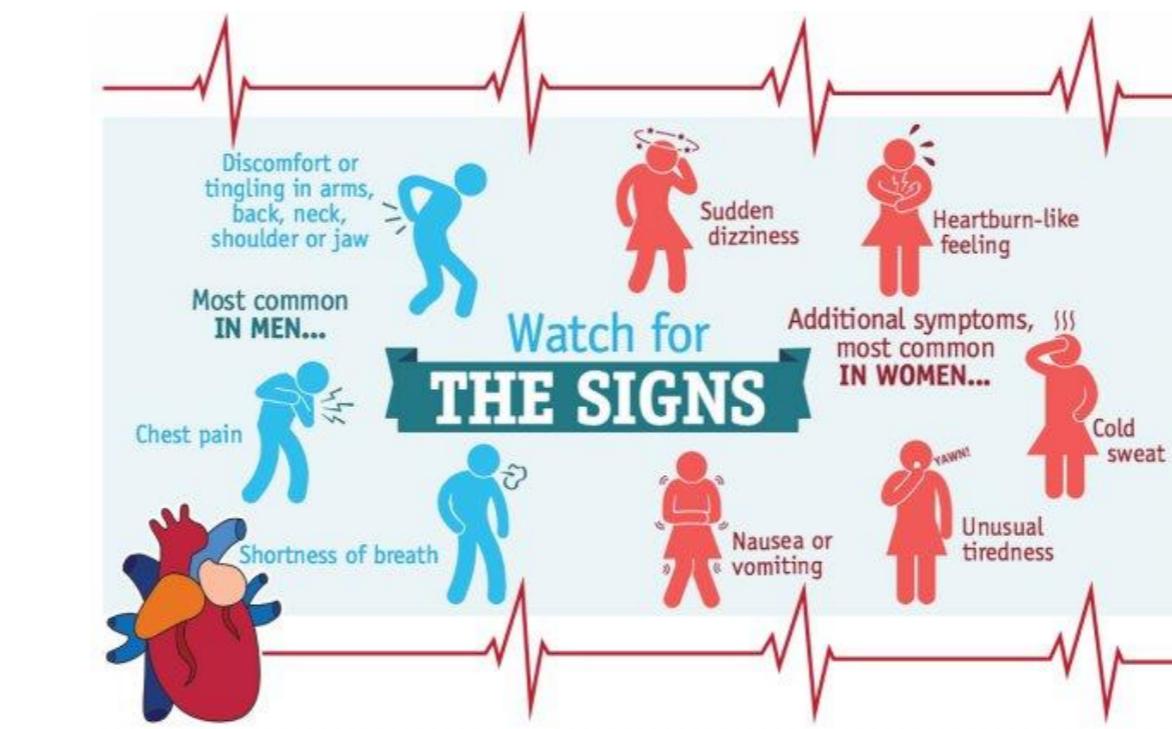
# Patologías estructurales



**Síntomas: Patologías Estructurales**  
*Symptoms  
Structural pathologies*

**Causas de degradación**  
*Causes of distress*

# Patologías Estructurales.



# Patologías estructurales

- ❑ Shoddy workmanship
    - Cold joints
    - Bug holes
    - Reinforcing steel that has become exposed
    - Honeycombing
  - ❑ Spalling
  - ❑ Scaling
  - ❑ Popouts
  - ❑ Curling
  - ❑ Delamination
  - ❑ Erosion
    - Abrasion
    - Cavitation
  - ❑ Joints seals and seepage
  - ❑ Efflorescence
  - ❑ Cracking
    - Structural
    - Non-structural
- Pre-hardening cracks
    - Plastic shrinkage cracks
    - Plastic settlement cracks
    - Cracks caused by formwork movement
  - Cracks in hardened concrete
    - Craze cracking
    - D-cracking
    - Drying shrinkage cracks
    - Thermal movement cracks
  - Cracks due to chemical effects
    - Corrosion
    - Alkali-silica reaction cracks



### SHODDY WORKMANSHIP – MANO DE OBRA DEFECTUOSA

La mano de obra de mala calidad puede provocar problemas importantes en las estructuras de hormigón. Es por tanto muy importante planificar inspecciones *in situ* durante la obra y puesta en servicio. Entre otros defectos, es común encontrar:

- Cold joints (*juntas frías*)
- Bug holes (*bolsas de aire o poros*)
- Acero estructural que ha quedado expuesto
- Honeycombing (*nido de abejas*)

## SHODDY WORKMANSHIP – MANO DE OBRA DEFECTUOSA

■ Cold joints: Una junta fría es un **plano de debilidad en el hormigón causado por una interrupción o retraso en las operaciones de hormigonado**. Ocurre cuando una tongada de hormigón ha comenzado a fraguar antes de agregar la siguiente tongada, de modo que ambas no se entremezclan correctamente. A veces, las juntas frías ocurren debido a interrupciones del trabajo por emergencia o una mala planificación de la jornada laboral, aunque también pueden ocurrir fruto de mala consolidación.

Para evitar juntas frías en muros, vigas y otros componentes estructurales es necesario colocar el hormigón en capas de unos 20 cm de espesor y entremezclar cada tongada con la anterior utilizando un vibrador. La colocación del hormigón debe comenzar en las esquinas y avanzar hacia el centro. En pendientes inclinadas, el trabajo debe realizarse cuesta arriba. En climas cálidos, puede ser necesario un aditivo retardador para reducir el tiempo de fraguado.



<https://foundation-crack-expert.com/concrete-joint-cold-joint-repair/>

## SHODDY WORKMANSHIP – MANO DE OBRA DEFECTUOSA

■ **Bug holes:** Pequeñas cavidades regulares o irregulares, que generalmente no exceden los 15 mm de diámetro, resultado del atrapamiento de burbujas de aire en la superficie del hormigón durante el vertido y consolidación.

Los “bug holes” suelen aparecer en el hormigonado de elementos verticales. Sin embargo, estos pueden considerarse defectos de riesgo si exceden en diámetro y profundidad los límites prescritos por los códigos de diseño. Por ejemplo, el código ACI 301-10, “Specifications for Structural Concrete” establece un límite de ~1.25 cm en superficies expuestas.

ACI 347-04, “Guide to Formwork for Concrete,”



<https://www.forconstructionpros.com/concrete/equipment-products/article/10726215/tips-to-minimize-concrete-consolidation-issues-with-forming-projects>

## SHODDY WORKMANSHIP – MANO DE OBRA DEFECTUOSA

### ■ Acero estructural que ha quedado expuesto

Las armaduras deben estar cubiertas con hormigón cumpliendo con los recubrimientos mínimos establecidos por la normativa (EHE-08). Sin embargo, en ocasiones las barras de refuerzo puede desplazarse de su posición cuando se vierte el hormigón y, pudiendo no cumplir con las especificaciones de recubrimiento. Evidentemente, esto puede dar origen a una corrosión acelerada del elemento estructural en cuestión.



[www.buyersask.com/structural/rebar-problems-in-concrete-foundations-slabs-and-walls/](http://www.buyersask.com/structural/rebar-problems-in-concrete-foundations-slabs-and-walls/)



Chemrouk, M. (2015). The deteriorations of reinforced concrete and the option of high performances reinforced concrete. *Procedia Engineering*, 125, 713-724.

## SHODDY WORKMANSHIP – MANO DE OBRA DEFECTUOSA

■ Honeycombing: áreas de la superficie de hormigón que presentan una concentración del agregado grueso.

- Compactación insuficiente del hormigón.
- Gran caída libre del hormigón durante el vertido.
- Uso de agregados más gruesos o en mayor proporción que los definidos por la composición de diseño.
- Adición de más agua de las necesaria para lograr una buena trabajabilidad.
- Concentración excesiva de acero no permitiendo que el hormigón fluya a todos los rincones.



<https://foundation-crack-expert.com/concrete-repair-holes-honeycombs/>



<https://www.cfcrcivil.com/concrete-honeycomb-repair-using-cempatch/>

# Patologías estructurales

## SPALLING (desconchado)

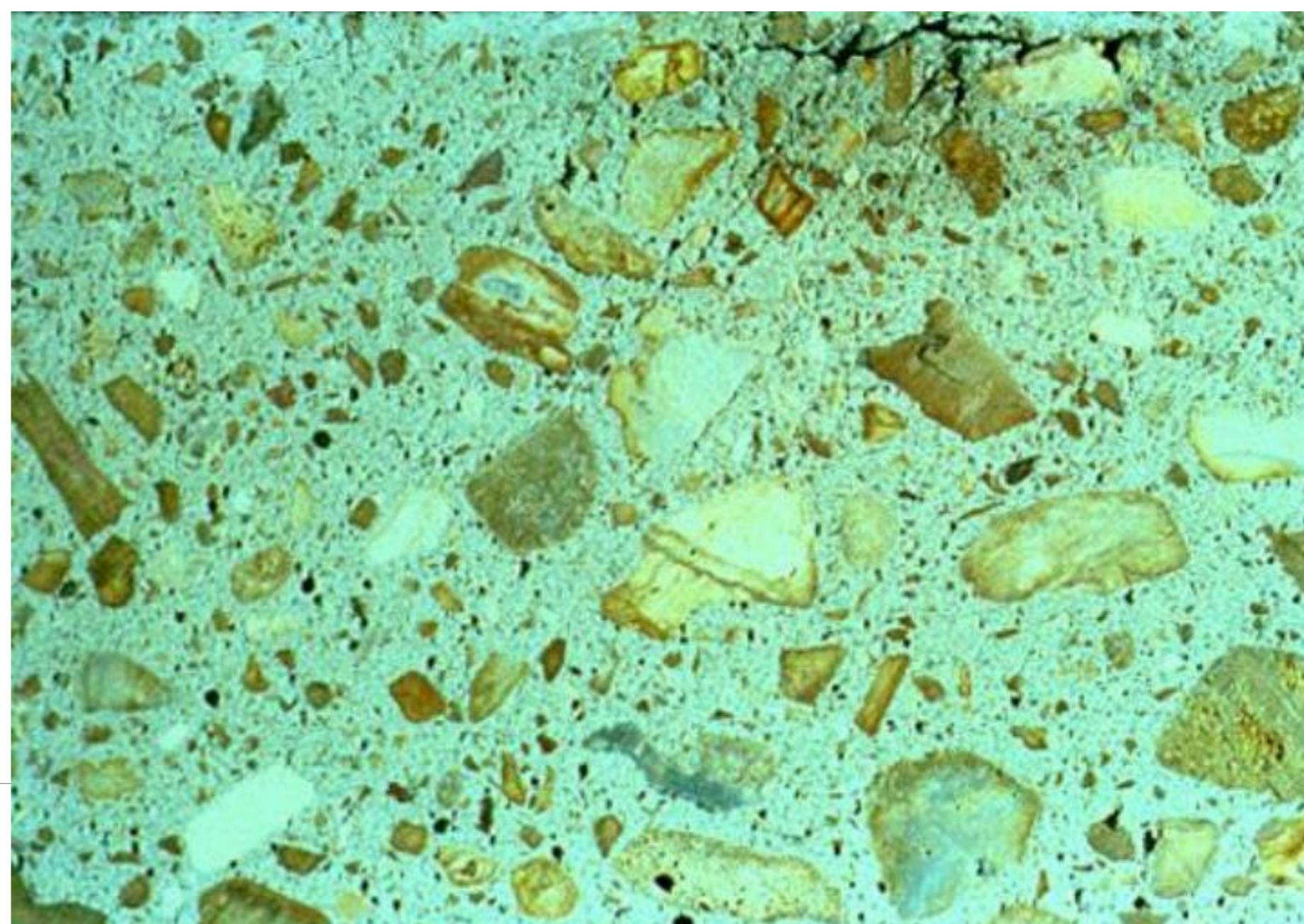
**Disintegration** es la pérdida o desprendimiento de porciones de hormigón por cualquier medio. Los fenómenos de “disintegration” y “spalling” se diferencian por la cantidad de material que se desprende del cuerpo principal de hormigón. Cuando la pérdida es pequeña, hablamos de “disintegration”. Por el contrario, cuando la masa desprendida es considerable normalmente hablamos de “spalling”.

**Spalling** supone un fallo estructural. Ésta normalmente ocurre como resultado de la la aparición de cargas excesivas o solicitudes concentradas repetitivas. Por otra parte, el desconchamiento del hormigón puede ser un síntoma de corrosión del hormigón, reacciones alkali silica, o aparecer como causa de fuego o fenómenos climáticos extremos.



## SCALING (escamado)

**Scaling** se define como la descamación o desprendimiento local de una parte superficial de hormigón endurecido o mortero. Puede originarse por el uso de sales de deshielo o ciclos de congelamiento y descongelamiento. Otros factores pueden ser el uso de agregados en mal estado, operaciones de acabado en presencia de agua de exudación (bleeding o sangrado), o un curado insuficiente.



## POPOUTS (desprendimientos)

**Popouts:** define la rotura de pequeñas porciones de la superficie del hormigón como resultado de una presión interna. Normalmente presentan una geometría cónica. Dichas presiones aparecen a raíz de la expansión de agregados porosos con altas tasas de absorción. A medida que el agregado absorbe humedad o se congela en ambientes húmedos, éste se expande creando presiones internas que pueden finalmente provocar el desprendimiento de la superficie del hormigón. También puede ser resultado de la presencia de impurezas en el agregado.

La aparición de popouts se puede minimizar con las siguientes prácticas:

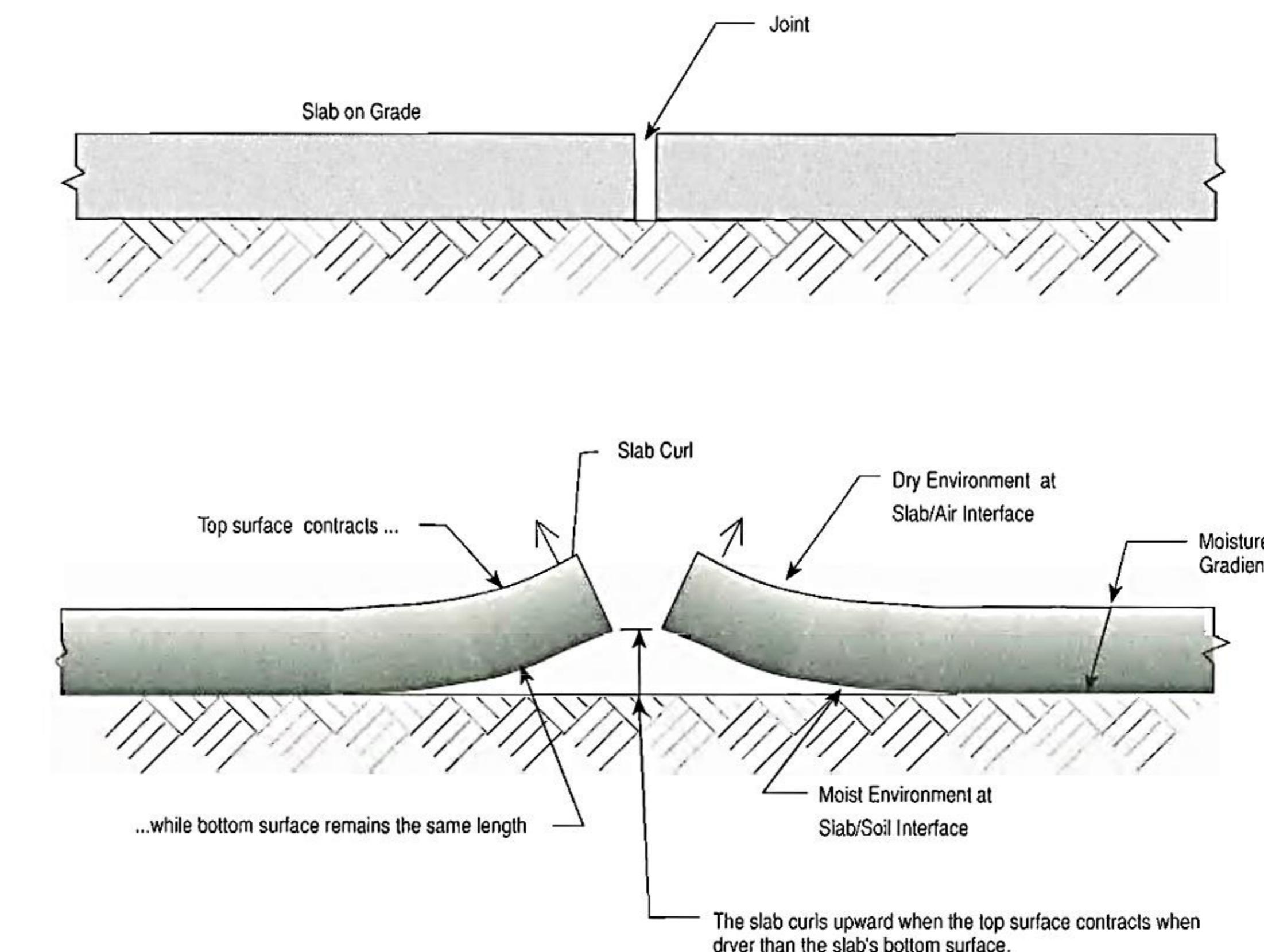
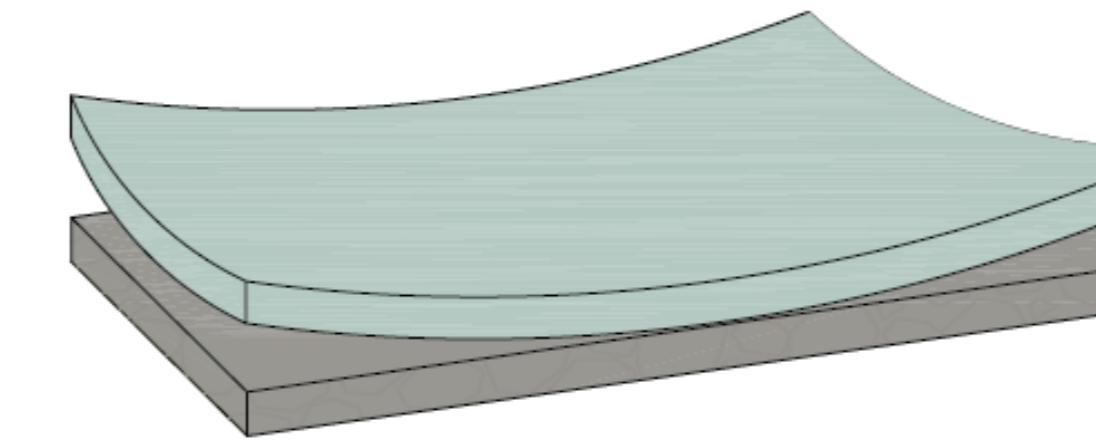
- Buenas granulometrías, con áridos de calidad y libre de impurezas.
- Inclinaciones adecuadas en el hormigón para asegurar un correcto drenaje.
- Evitar que el hormigón se congele antes del secado.
- Mantener limpias las superficies de hormigón quitando nieve y hielo.



# Patologías estructurales

## CURLING

**Curling** se define como la distorsión de una losa de hormigón adquiriendo cierta curvatura (hacia arriba o hacia abajo) en los bordes de la misma. Es una problemática común en las losas hormigonadas in situ. El fenómeno de “curling” es causado por la existencia de condiciones de humedad y temperatura desiguales a lo largo del espesor de la losa. Asimismo, el curling se ve acrecentado a medida que aumenta la retracción por secado. Las superficies de las losas normalmente se encuentran secas en la cara superior y sometidas a mayores temperaturas, donde están expuestas al aire, mientras que la cara inferior suelen estar más húmedas y frías en contacto con el suelo. La cara seca tiende a contraerse al contrario que la cara inferior. Para acomodar estas deformaciones diferenciales, la losa tiene que curvarse hacia arriba.



# Patologías estructurales

# **DELAMINATION (Delaminación)**

**Delaminación** se define como la separación de una capa superficial de hormigón. Las delaminaciones suelen ser paralelas a la superficie y originarse cerca de la cara superior de las barras de refuerzo.

Las causas de delaminación puede ser variadas:

- Realizar tareas de acabado antes del tiempo de fraguado produce que el agua de exudación o burbujas de aire formen ampollas. Cuando la superficie se ve sometida a alguna acción mecánica, estas ampollas suelen delaminarse.
  - Alta tasa de evaporación.
  - Expansión de armaduras con avanzado estado de corrosión.



Rebar / Delamination

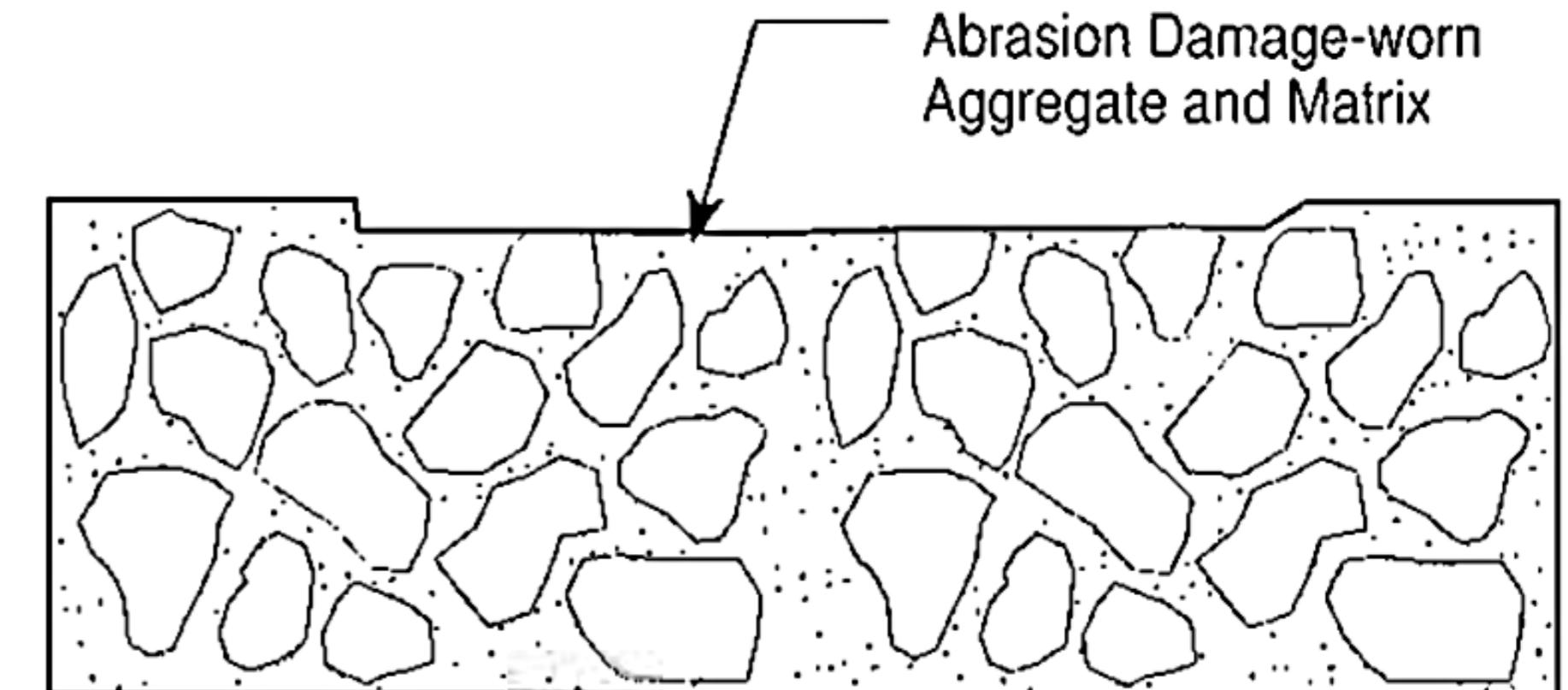


# Patologías estructurales

## EROSIÓN

Solemos diferenciar los fenómenos de erosión en dos categorías: **abrasión** y **cavitación**.

**Abrasión** se define desgaste de la superficie por frotamiento y fricción. Generalmente, la superficie se desgasta uniformemente, incluyendo tanto la matriz de cemento como los agregados. Los factores que afectan la resistencia a la abrasión incluyen: 1) Resistencia a la compresión; 2) Propiedades de los agregados; 3) métodos de acabado; 4) Uso de coberturas; 5) Curado.



## Patologías estructurales

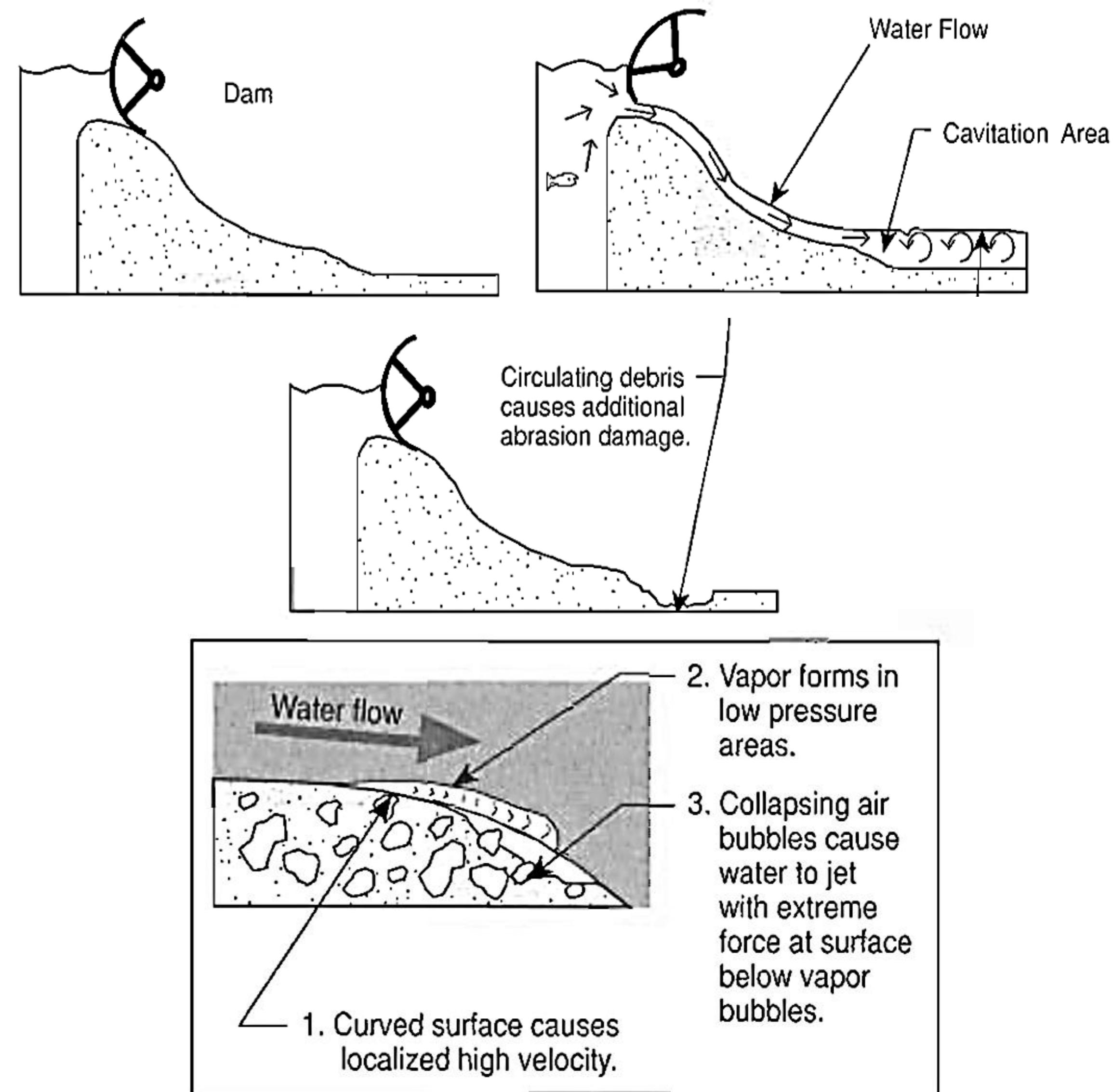
### EROSIÓN

Solemos diferenciar los fenómenos de erosión en dos categorías: **abrasión** y **cavitación**.

**Abrasión** se define desgaste de la superficie por frotamiento y fricción. Generalmente, la superficie se desgasta uniformemente, incluyendo tanto la matriz de cemento como los agregados. Los factores que afectan la resistencia a la abrasión incluyen: 1) Resistencia a la compresión; 2) Propiedades de los agregados; 3) métodos de acabado; 4) Uso de coberturas; 5) Curado.

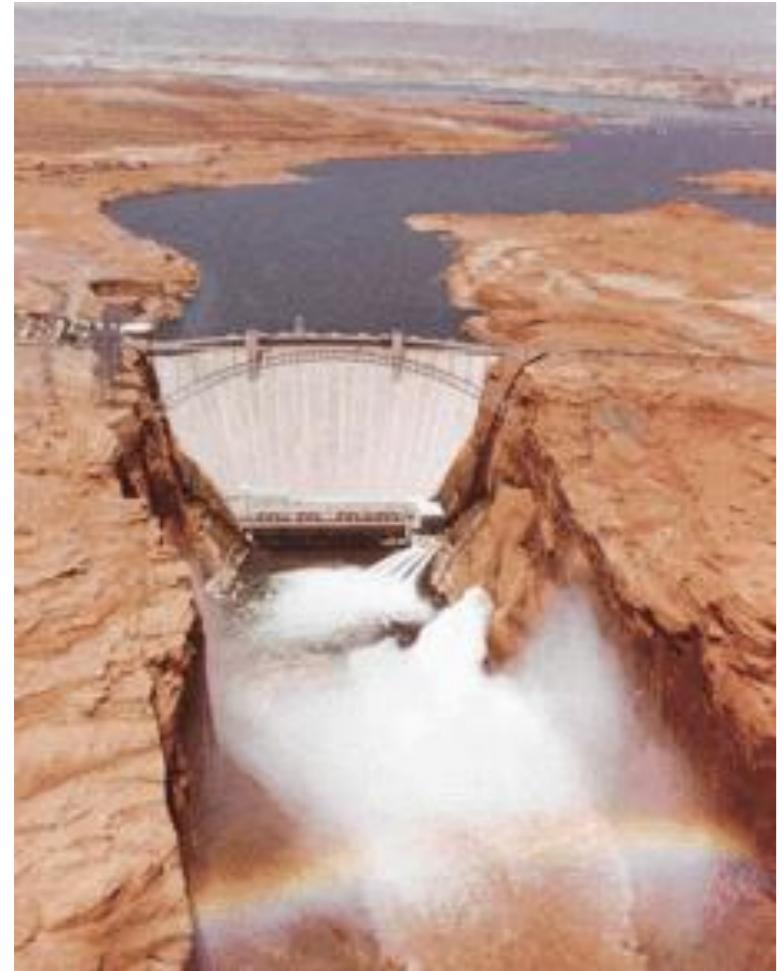
**Cavitación:** causa la erosión de las superficies de hormigón como resultado del colapso de burbujas de vapor formadas por cambios bruscos de presión dentro de un fluido a gran velocidad. Cuando las burbujas de vapor se forman en el fluido, éstas viajan con él corriente abajo. Cuando el fluido entra en una región de altas presiones, las burbujas colapsan (implosionan) liberando una gran energía que puede formar cavidades en el hormigón. Estas cavidades se forman cerca de curvas, salientes, y cambios de pendiente. El daño debido a la cavitación se materializa en la erosión de la matriz de cemento, dejando los agregados intactos y liberando grandes cantidades de hormigón.

Los fenómenos de cavitación se pueden evitar produciendo superficies y perfiles suaves sin protuberancias que se opongan al flujo.



# Patologías estructurales

<https://www.youtube.com/watch?v=m8xZzmtM8iw>



Glen Canyon Dam



0.91 m-thick concrete tunnel spillway  
Cavitation damage during the 1983-84 flooding



# Patologías estructurales

## JOINT SEALS AND SEEPAGE (Sellos de juntas y filtraciones)

**El sellado de juntas** está destinado a repeler la entrada de agua. Si el sello de una junta falla permitiendo la entrada de agua en la junta de hormigón, esto puede provocar la aparición de problemas de pandeo, agrietamiento, erosión, etc. Otro propósito del sellado de juntas es el de evitar la entrada de debris que pueda expandirse en la junta, provocando agrietamiento y roturas. **Las filtraciones** consisten en el movimiento de agua u otros fluidos a través de los poros o juntas del hormigón.



### EFFLORESCENCE (Eflorescencias)

El término eflorescencia refiere a depósitos cristalinos en superficies de mampostería, estuco, u hormigón. Suelen ser de apariencia blanquecina.

- La eflorescencia es causada por la migración de agua a través de la estructura que trae sales solubles a la superficie.
- La eflorescencia requiere el movimiento de la humedad.



## CRACKING (Agrietamiento)

¡El agrietamiento es omnipresente en el hormigón!

En la mayoría de los casos, las grietas no suponen un riesgo para la seguridad estructural, aunque en algunos casos pueden causar un deterioro acelerado que termine comprometiendo la capacidad portante de la estructura

Structural (load induced)

Non-structural

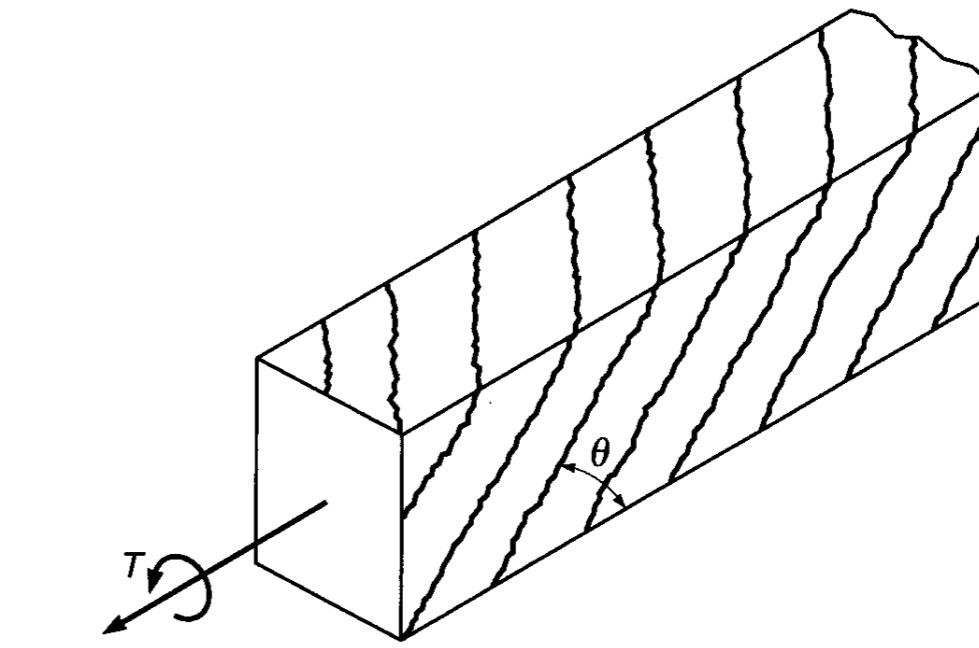
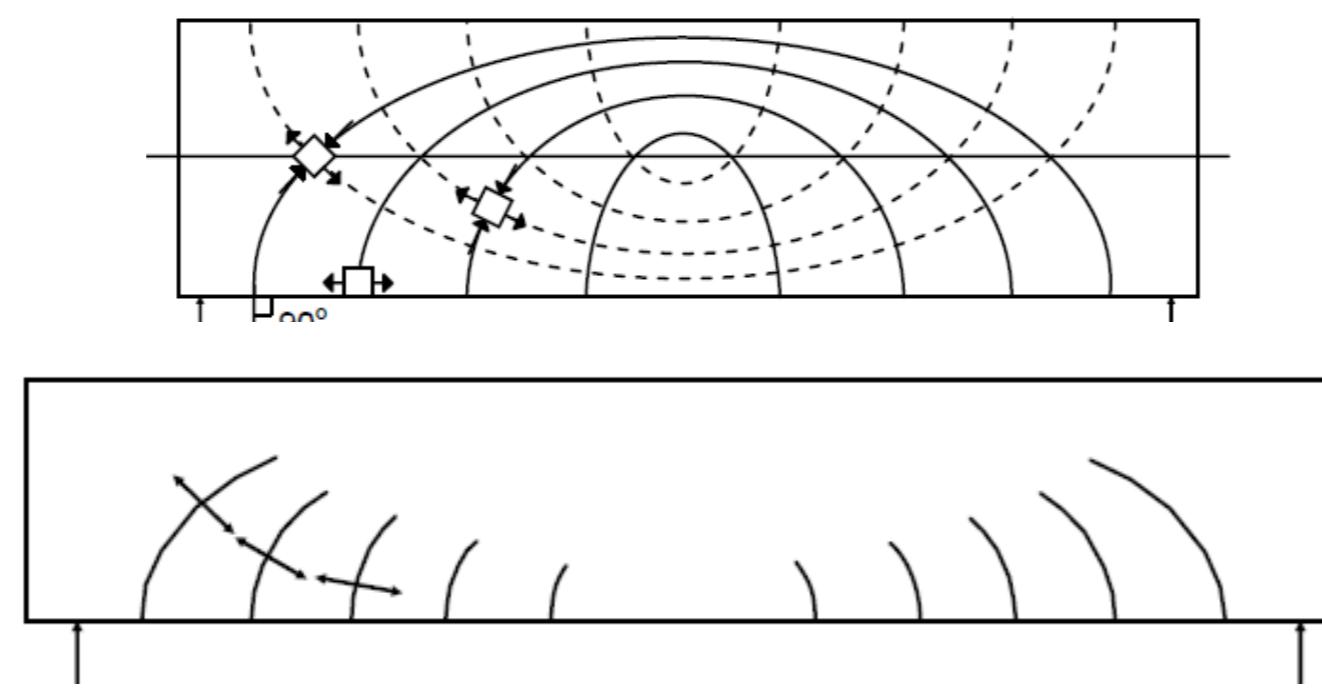
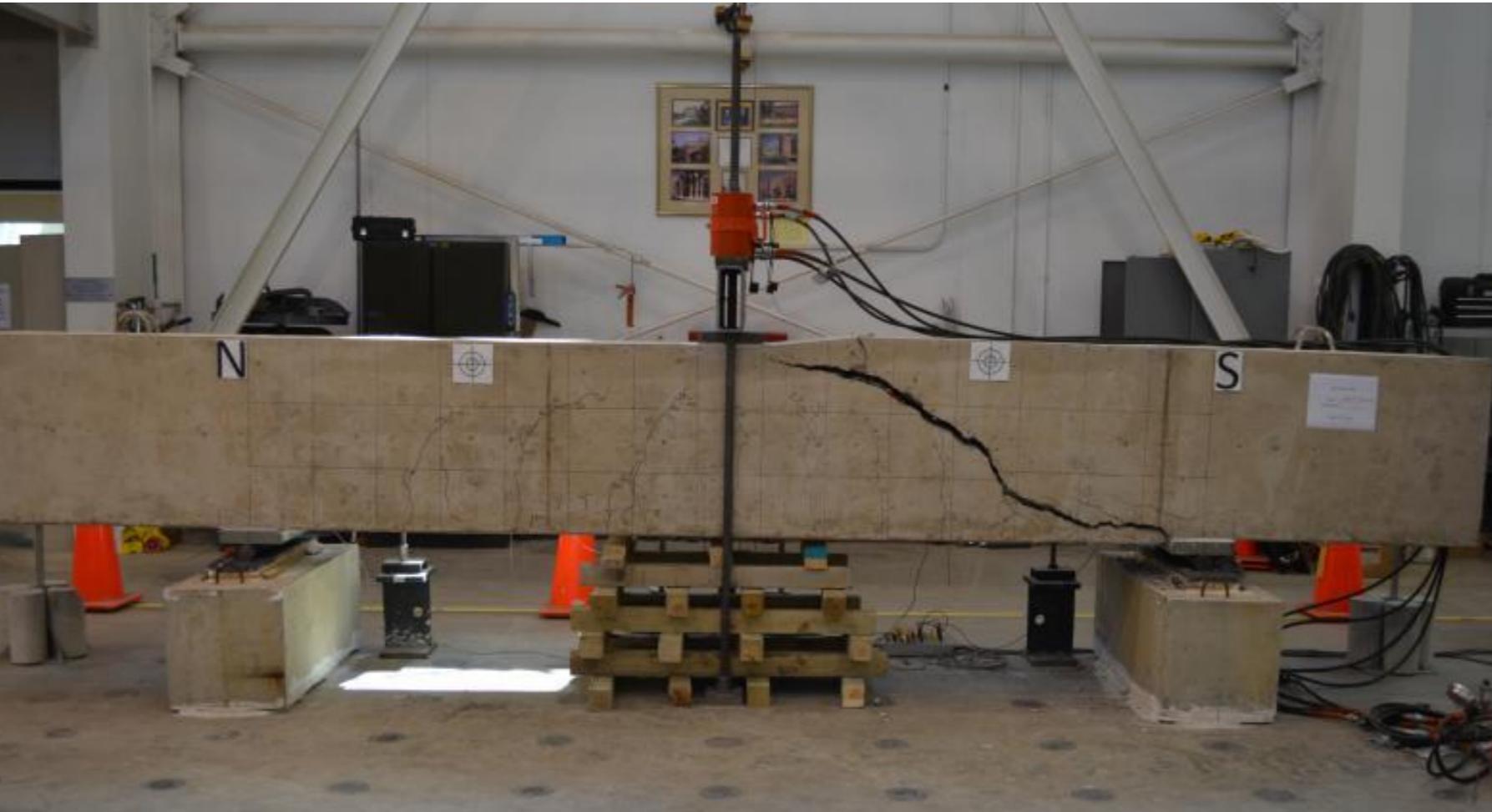


# Patologías estructurales

## Structural cracks

El propósito del refuerzo de acero no es prevenir completamente el agrietamiento del hormigón. La capacidad de deformación por tracción del hormigón es pequeña en comparación con las deformaciones de trabajo habituales del acero, por lo que el agrietamiento suele ser inevitable.

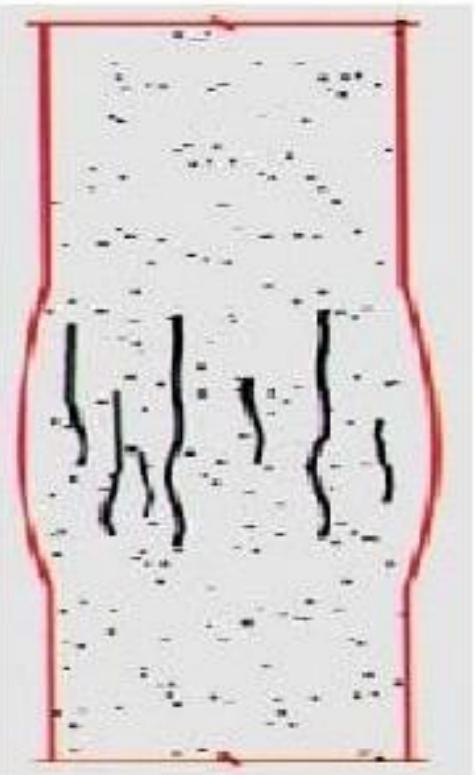
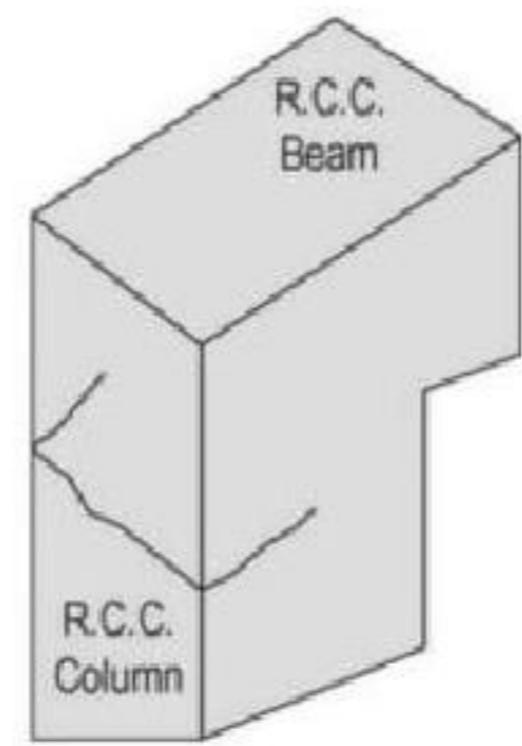
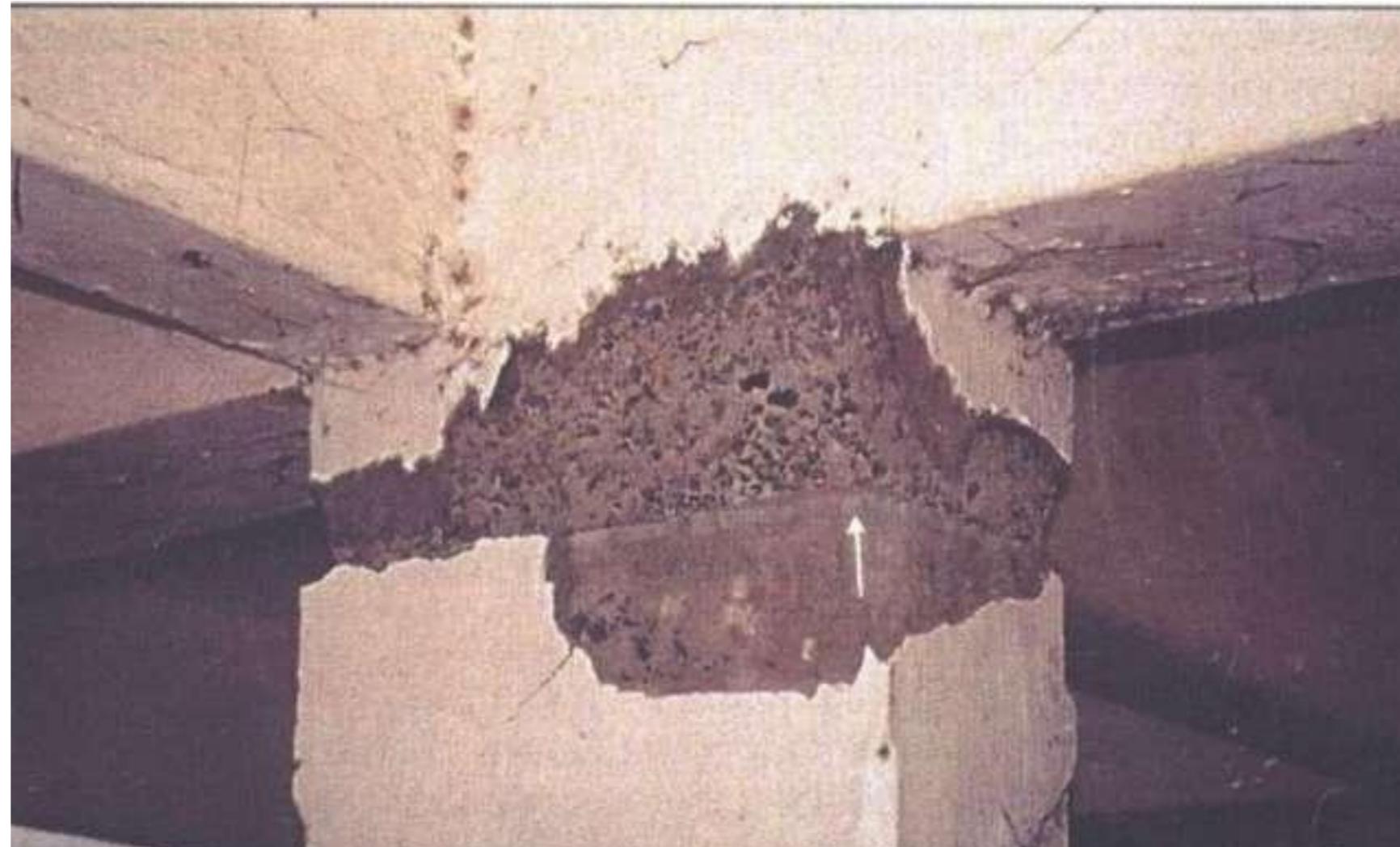
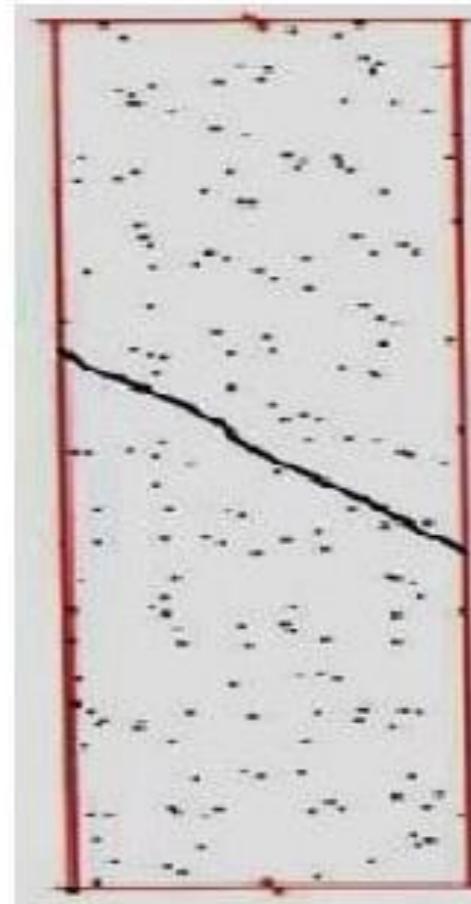
- Flexural cracking
- Shear cracking
- Torsion cracking



# Patologías estructurales

## Structural cracks

- Diagonal cracks
- Horizontal cracks
- Splitting cracks



# Patologías estructurales

EN 1992-1-1:2004

(1) Cracking shall be limited to an extent that will not **impair the proper functioning or durability of the structure or cause its appearance to be unacceptable.**

(2) Cracking is normal in reinforced concrete structures subject to bending, shear, torsion or tension resulting from either direct loading or restraint or imposed deformations.

- Crack width
- Crack spacing

Table 7.1N Recommended values of  $w_{max}$  (mm)

Exposure Class	Reinforced members and prestressed members with unbonded tendons	Prestressed members with bonded tendons
	Quasi-permanent load combination	Frequent load combination
X0, XC1	0,4 <sup>1</sup>	0,2
XC2, XC3, XC4		0,2 <sup>2</sup>
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3	0,3	Decompression

**Note 1:** For X0, XC1 exposure classes, crack width has no influence on durability and this limit is set to guarantee acceptable appearance. In the absence of appearance conditions this limit may be relaxed.

**Note 2:** For these exposure classes, in addition, decompression should be checked under the quasi-permanent combination of loads.



# Patologías estructurales

## Non-structural cracks

¡No son causados por ninguna carga externa!

Types and causes of cracks	Causes	micro-vs. macro cracking	Comments*
After hardening	Physical	Shrinking aggregates Drying shrinkage Fire; thermal crazing	— Macro #1
	Physico chemical	Early-age autogenous shrinkage	— Macro #2
	Chemical	Corrosion of reinforcement Alkali–aggregate reaction Sulfate attack Carbonation	— Macro and micro #3, #4
	Thermal	Freeze/thaw cycles External seasonal temperature variations Early thermal contraction	— Micro #5
	Structural	Accidental overload Creep Design loads	— Macro #6
	Plastic	Plastic shrinkage Plastic settlement	— Macro and micro #7
	Constructional movement	Formwork movement Subgrade movement	— Macro and micro #8
			— Micro #9
			— Macro and micro #10
		External restraint Internal temperature gradients	— Macro #11
Before hardening			#12
			#12
			#13
			#14
			#15

Alexander, M., Bentur, A., & Mindess, S. (2017). *Durability of Concrete: Design and Construction*. CRC Press.

Concrete Society. (1992). *Non-structural cracks in concrete*. Wexham, Slough: Concrete Society.



## Non-structural cracks

- Pre-hardening (plastic) cracks
  - Plastic shrinkage cracks
  - Plastic settlement cracks
  - Cracks caused by formwork movement
- Cracks in hardened concrete
  - Craze cracking
  - D-cracks
  - Drying shrinkage cracks
  - Thermal movement cracks
- Cracks due to Chemical Effects
  - Corrosion of steel reinforcement
  - Alkali-Silica reaction cracks

### Pre-hardening (Plastic) Cracks (Grietas en el hormigón no endurecido)

Estas grietas aparecen a las pocas horas (10 min a ~ 6 horas) del hormigonado y la compactación, pero antes de que el hormigón haya endurecido por completo. Suelen ocurrir como resultado de condiciones de ejecución y prácticas de construcción inadecuadas, y generalmente se pueden evitar con la adopción de buenos procedimientos de ejecución.



# Patologías estructurales

## Plastic shrinkage cracks (Grietas de retracción plástica)

Causado por un secado rápido de la superficie del hormigón, dentro de las primeras seis horas (incluso en minutos) después del hormigonado, como resultado de **grandes pérdidas de humedad de la superficie**. Vientos fuertes, altas temperaturas del aire o del hormigón y bajas humedades, solos o en combinación, pueden causar grietas porque promueven la evaporación del agua por encima de la tasa de exudación (sangrado). Las grietas de contracción plástica pueden formar grandes patrones de fisuración o pueden aparecer como grietas diagonales o paralelas a varias profundidades. Son comunes en elementos de grandes superficies como forjados de edificios, losas de pavimentación, recubrimientos de canales y túneles, y en cualquier elemento constructivo que presente una gran relación superficie/volumen.

- Grietas diagonales de aproximadamente 300 mm a 1 cm, más comunes en losas no reforzadas y ligeramente reforzadas.
- Un patrón de mapa de grietas muy grande, generalmente cuando las losas no están reforzadas.
- Un patrón que corresponde a una restricción o una condición de contorno, como el acero de refuerzo cerca de la superficie superior o un cambio de profundidad.

Cualquier grieta de secado que aparezca antes o durante las operaciones de acabado debe cerrarse inmediatamente con una espátula o llana de madera o acero, y el curado debe comenzar inmediatamente después de la finalización de las operaciones de acabado final.

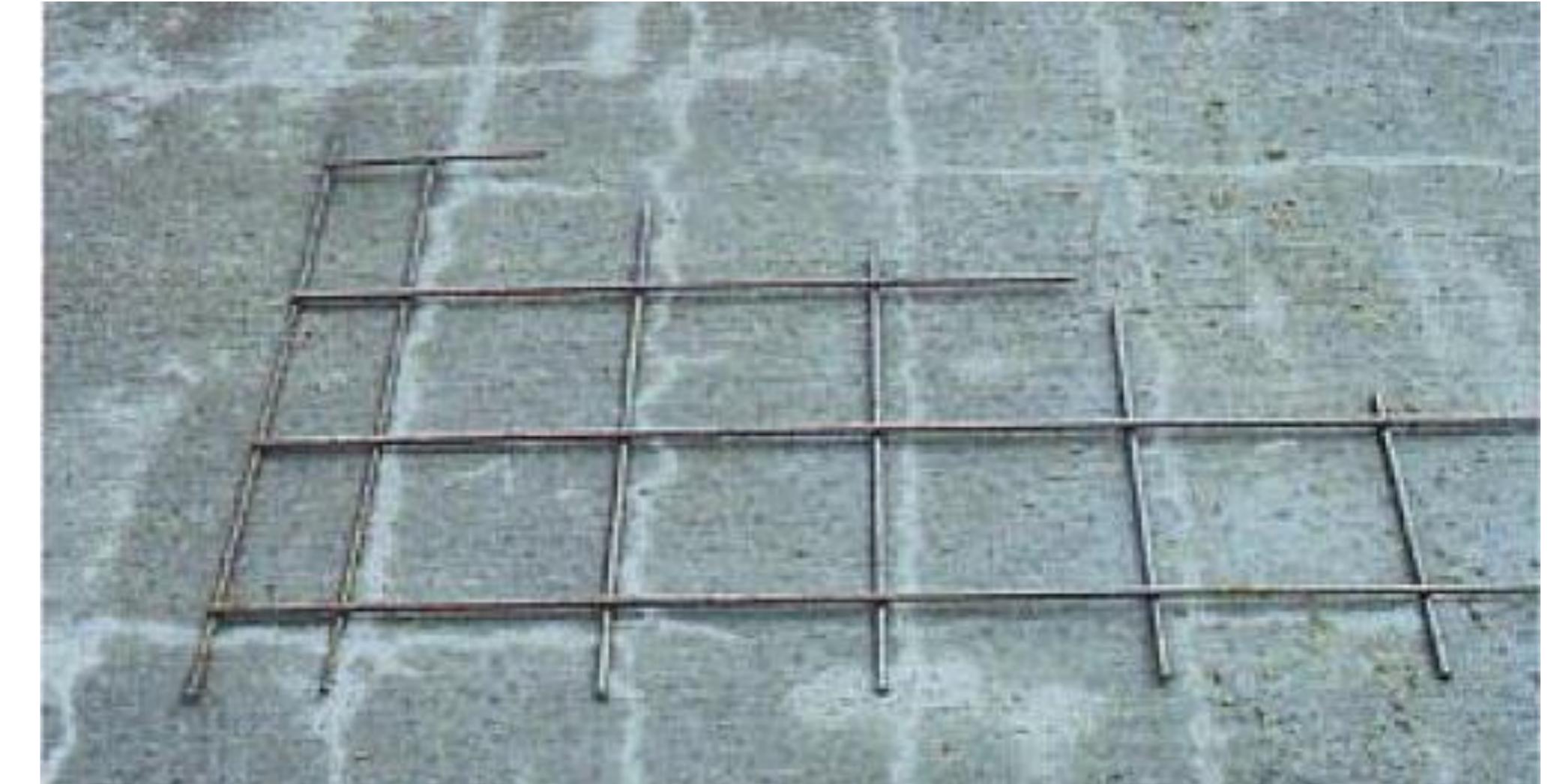
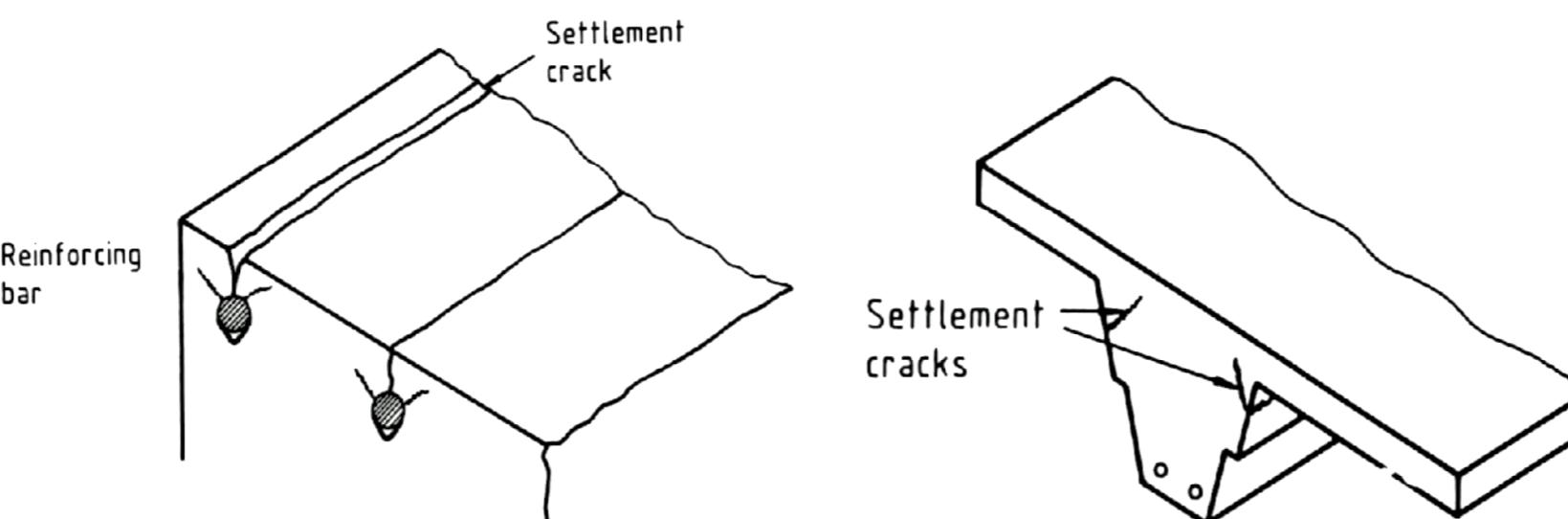


# Patologías estructurales

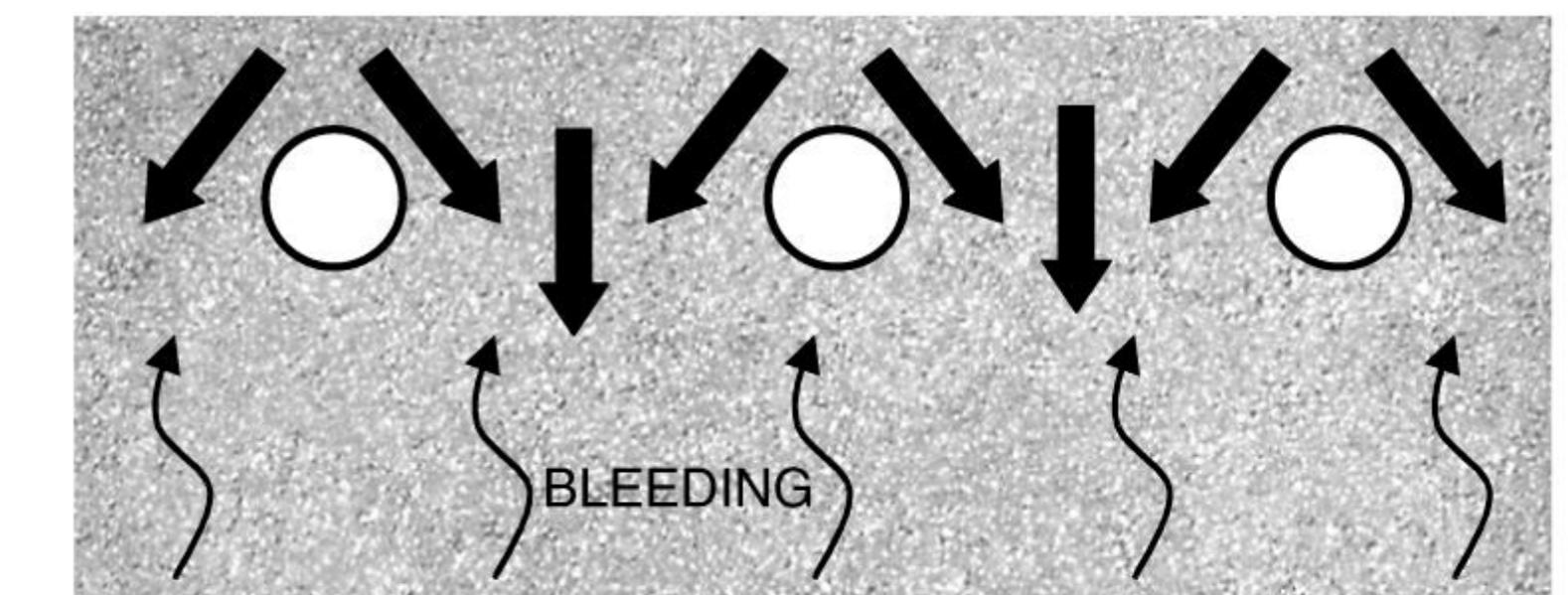
## Plastic settlement cracks (Fisuración por asentamiento plástico)

Causada por el asentamiento plástico del hormigón por su propio peso, especialmente cuando hay un sangrado excesivo y el asentamiento está impedido por una restricción local. Las grietas ocurren en la masa de endurecimiento sobre restricciones como el refuerzo de acero, secciones profundas y escalones en el encofrado. Estas grietas tienden a formarse longitudinalmente sobre el refuerzo de acero y pueden ser una causa de corrosión grave.

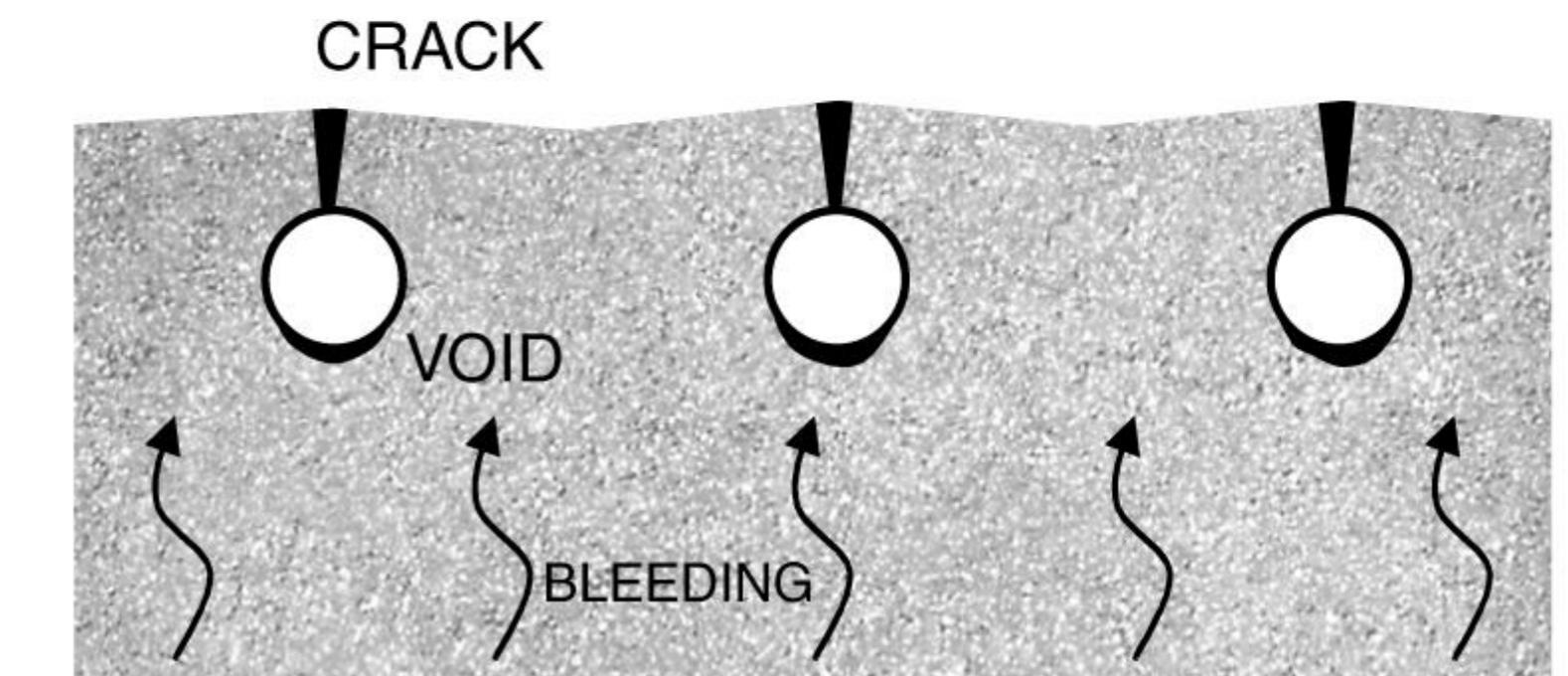
Las grietas de asentamiento plástico se pueden prevenir asegurándose de que el hormigón esté bien graduado, con el contenido de agua adecuado que permita una buena compactación, y que el encofrado sea rígido y no esté sujeto a movimiento.



(a) Initiation



(b) After a few hours



## Cracks in hardened concrete (Grietas en el hormigón endurecido)

El agrietamiento en el hormigón endurecido se puede atribuir a la **contracción por secado** (pérdida por humedad) (*drying shrinkage*), **contracción térmica temprana** (movimiento) (*early thermal contraction*) y a **efectos estructurales y químicos**.

- Craze cracking
- D-cracking
- Drying shrinkage cracks
- Thermal movement cracks

# Patologías estructurales

## Craze cracking (Pattern Map cracking)

Craze cracking describe las **grietas muy finas y de patrón irregular** que aparecen en la superficie del hormigón después de haber estado expuesto a la atmósfera durante algún tiempo. Suele ocurrir en la superficie de losas de hormigón allanadas o enlucidas. Se origina cuando la superficie del hormigón se expande y contrae durante **ciclos alternos de humectación/secado**, o cuando se **carbonata y contrae durante una exposición prolongada al aire**. Las grietas son bastante superficiales y afectan la apariencia más que la integridad estructural o durabilidad.

Son causadas principalmente por el uso de mezclas de hormigón húmedas, el trabajo del agua de exudación en la superficie durante el acabado y un curado inadecuado.

El agrietamiento se puede prevenir asegurándose de que el acabado final de las superficies de hormigón solo se lleve a cabo después de que se haya eliminado toda el agua de sangrado, no utilizando en exceso las paletas eléctricas, no utilizando secadores como arena seca, cemento o polvo de piedra para absorber el agua libre, y en general adoptando buenas prácticas de curado.

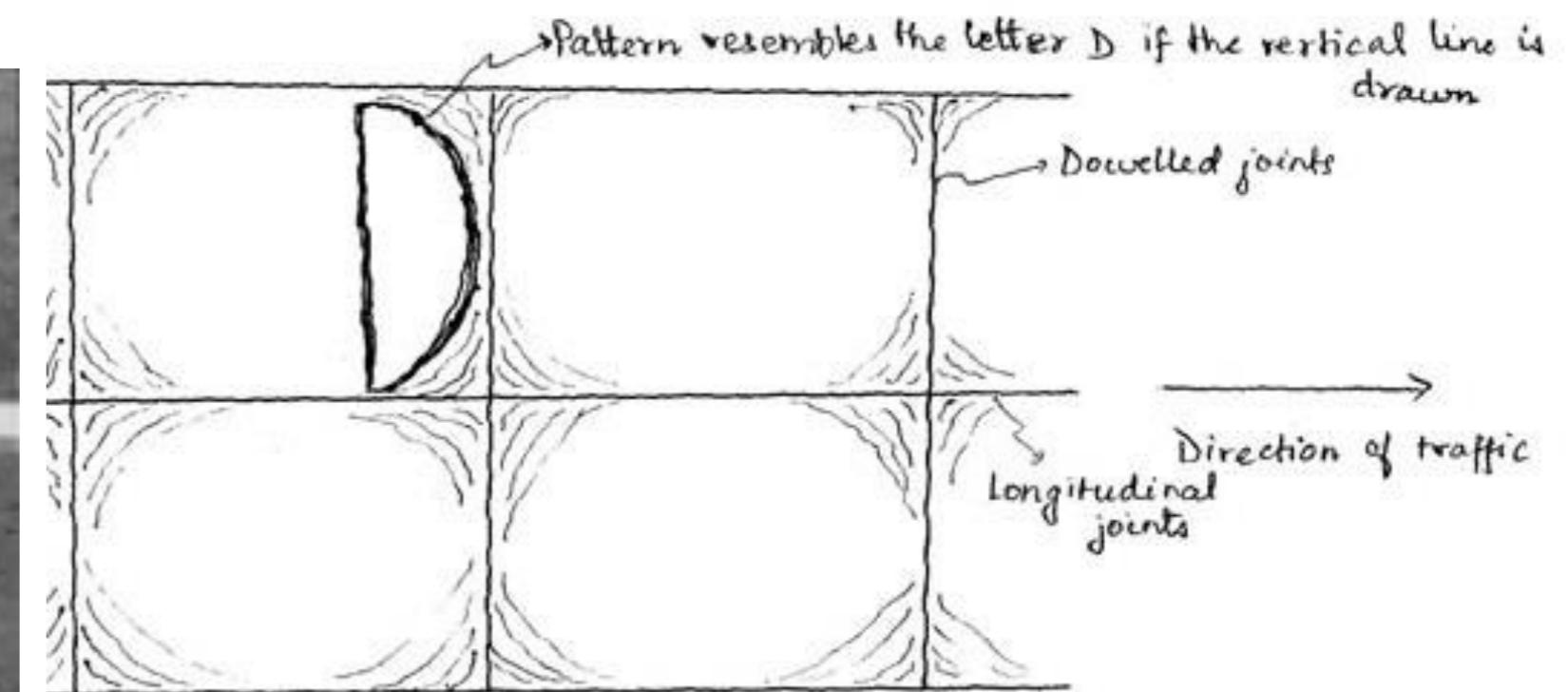


# Patologías estructurales

## D-cracks

Serie de grietas en forma de media luna visibles en la superficie y concentradas en las juntas y bordes de los pavimentos donde el hormigón está más expuesto.

El agrietamiento en D ocurre como resultado de ciclos de congelación y descongelación de agregados saturados de agua, que agrietan las partículas de agregados y avanzan a través de la losa. Junto con la acumulación natural de agua debajo de los pavimentos en las capas base y subbase, los agregados pueden eventualmente saturarse. Luego, con los ciclos de congelación y descongelación, el agrietamiento del hormigón comienza en el agregado saturado en la parte inferior de la losa y avanza hacia arriba hasta la superficie.

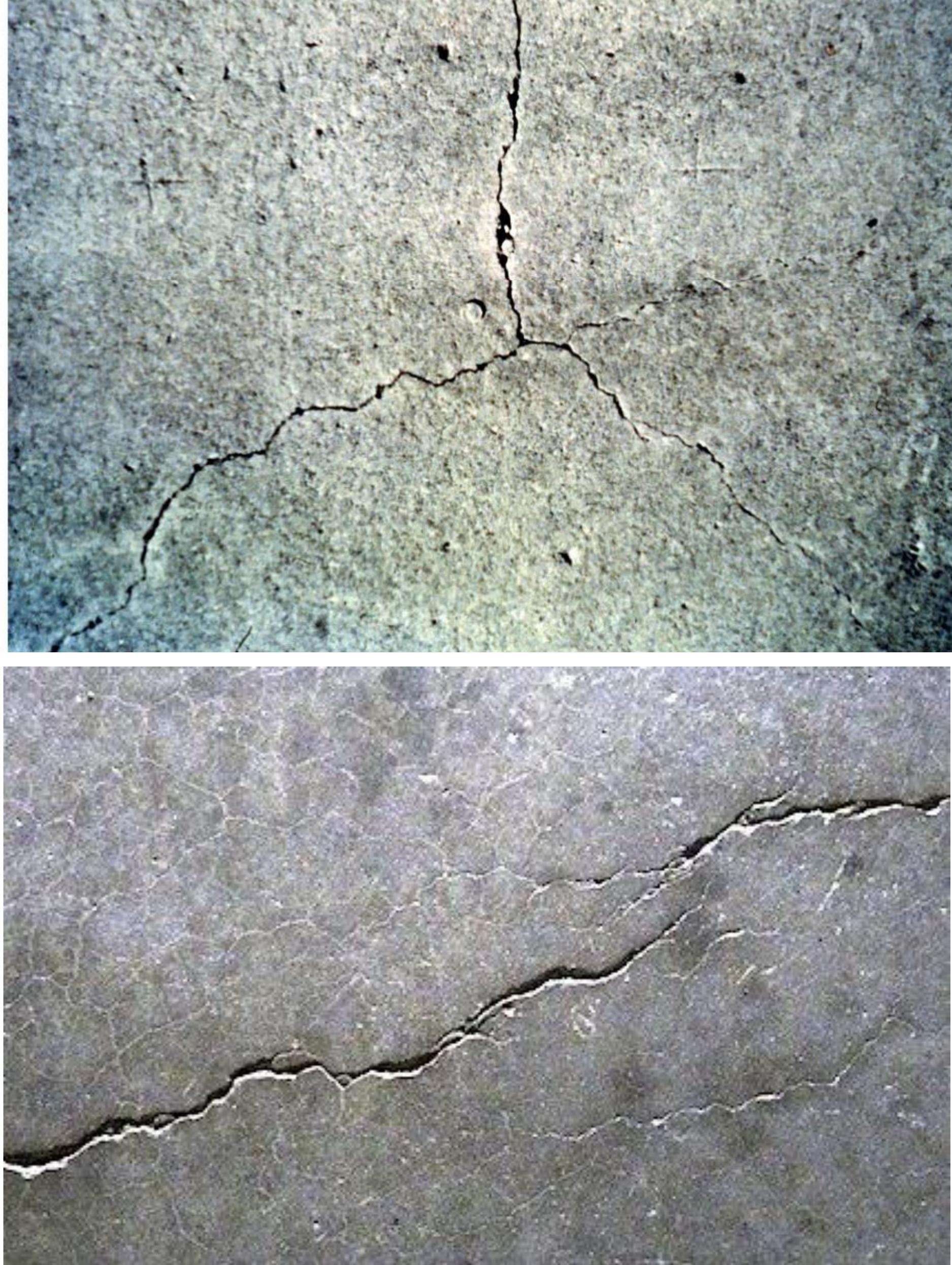
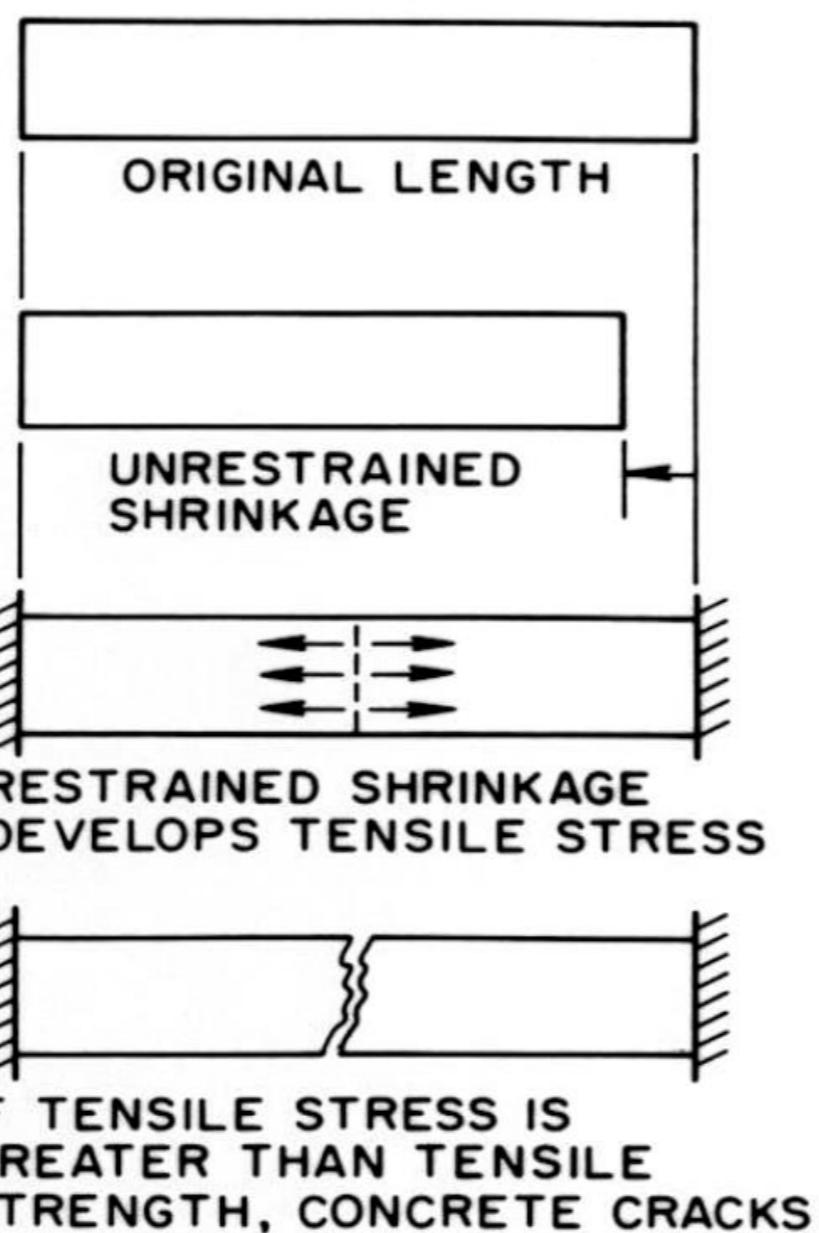


# Patologías estructurales

## Drying shrinkage cracks Fisuras de retracción por secado

Ocurre cuando el hormigón reduce su volumen como resultado de las pérdidas de humedad a la atmósfera en su estado endurecido. Si el hormigón puede moverse libremente y experimentar acortamiento sin que se acumulen tensiones de contracción, no se producirán grietas. Sin embargo, si el elemento se encuentra restringido y las tensiones superan la resistencia a la tracción del hormigón, se producirán grietas. Una proporción significativa de la retracción ocurre dentro de las primeras semanas o incluso meses tras el hormigonado, y el ambiente de secado tiene un efecto importante.

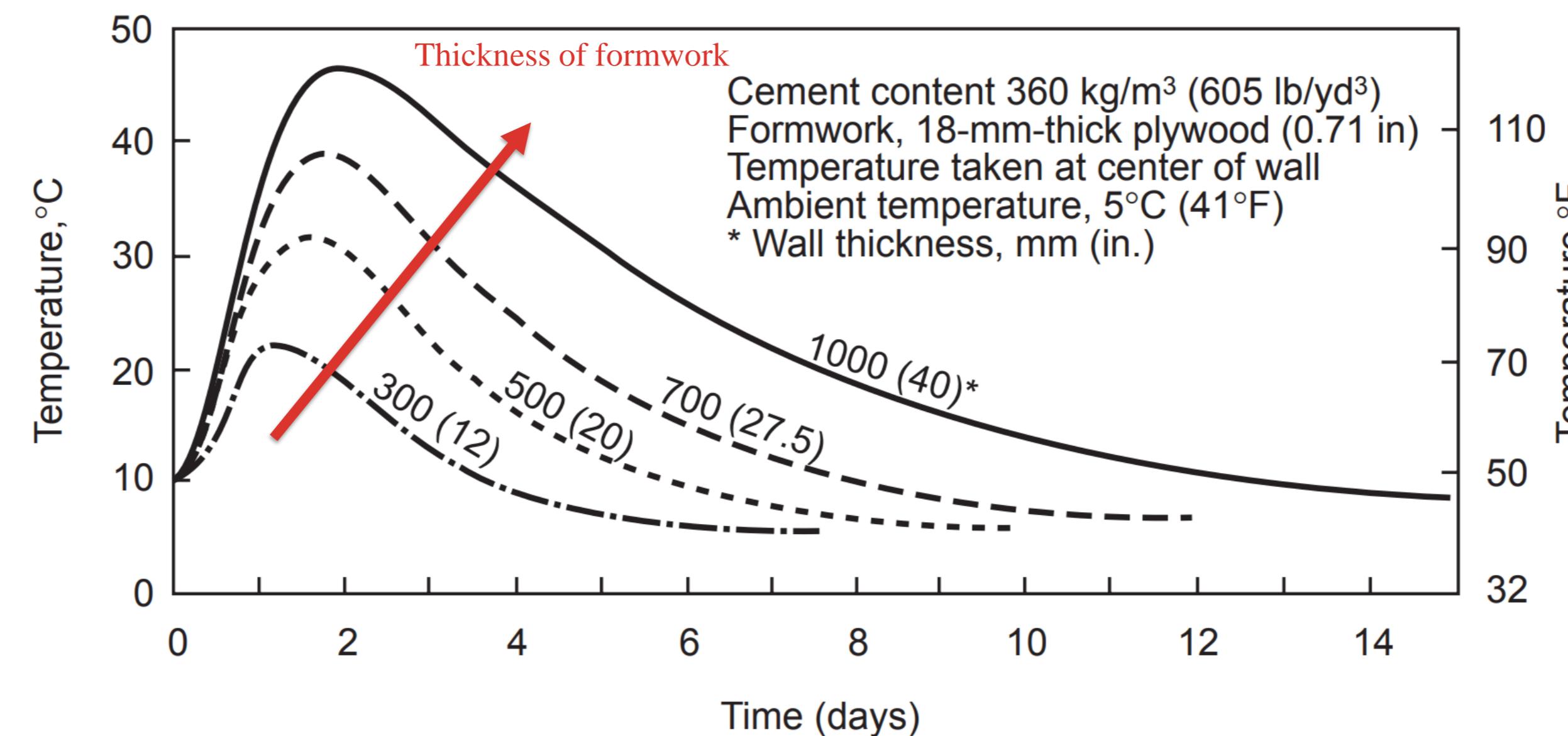
La contracción por secado se puede reducir aumentando la cantidad de agregado grueso y, lo que es más importante, reduciendo el contenido total de agua. Otros factores también influyen en la fisuración como las restricciones, la geometría y las prácticas de construcción. Una adecuada disposición de las armaduras puede distribuir de manera más uniforme las tensiones de contracción y así limitar el ancho de las grietas.



# Patologías estructurales

## Thermal movement cracks

La deformación inducida por efectos térmicos ocurre cuando la temperatura del hormigón cambia, ya sea debido a cambios ambientales o al calor durante el fraguado. A medida que el hormigón se calienta, éste se expande y luego se contrae al enfriarse de nuevo a temperatura ambiente. Si un elemento de hormigón es lo suficientemente grande (aprox.> 1,5 m) y está aislado por materiales adyacentes, incluido el encofrado, es probable que la tasa de calentamiento en las primeras 24 horas supere la tasa de pérdida de calor a la atmósfera. Despues de unos días, el calentamiento cae por debajo de las pérdidas de calor y el hormigón se enfria provocando la contracción del elemento. En este proceso, no aparecerán grietas si las expansiones/contracciones térmicas no están restringidas. En la práctica, sin embargo, los elementos estructurales suelen estar restringidos por lo que es posible la aparición de grietas.

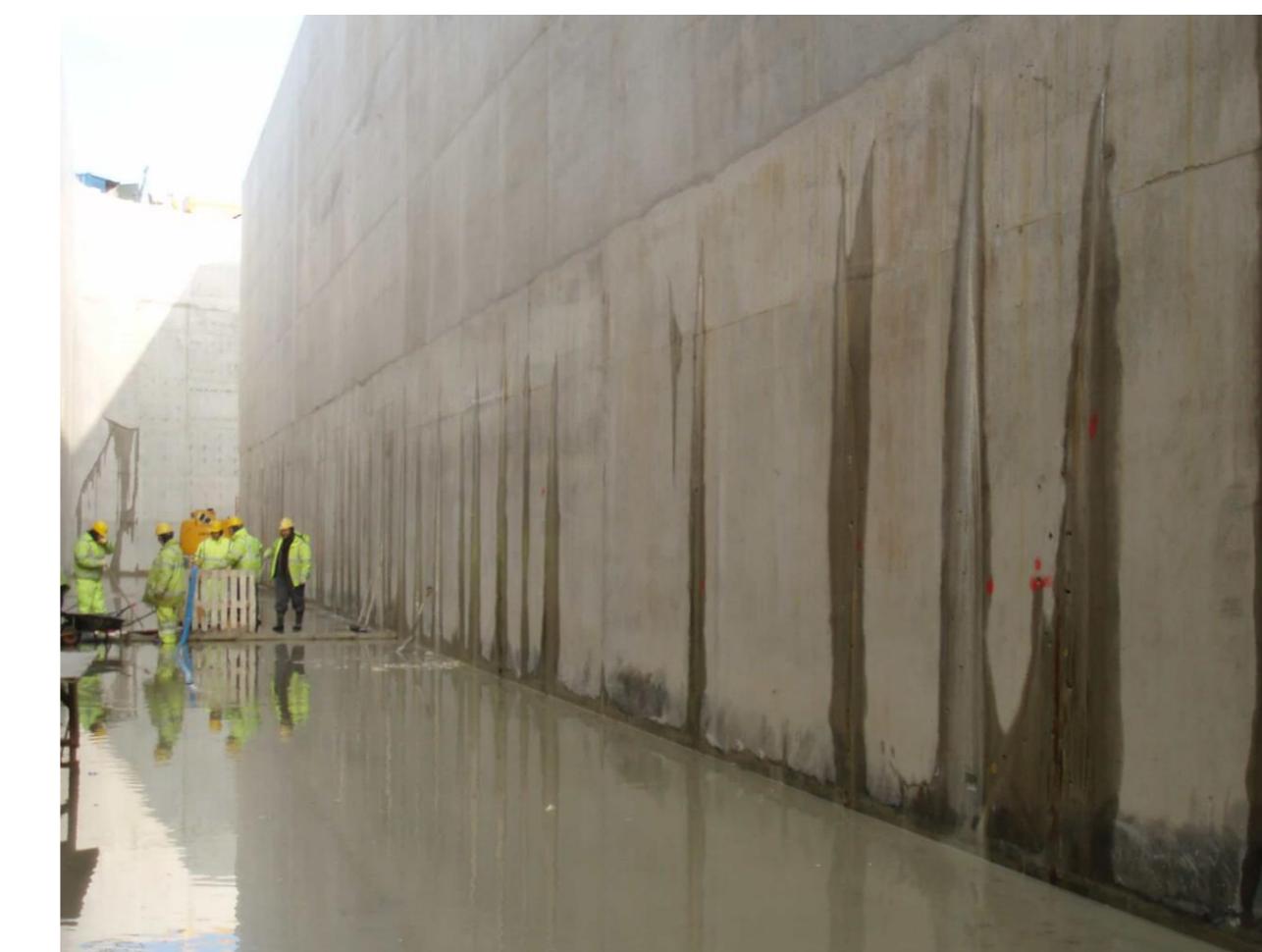
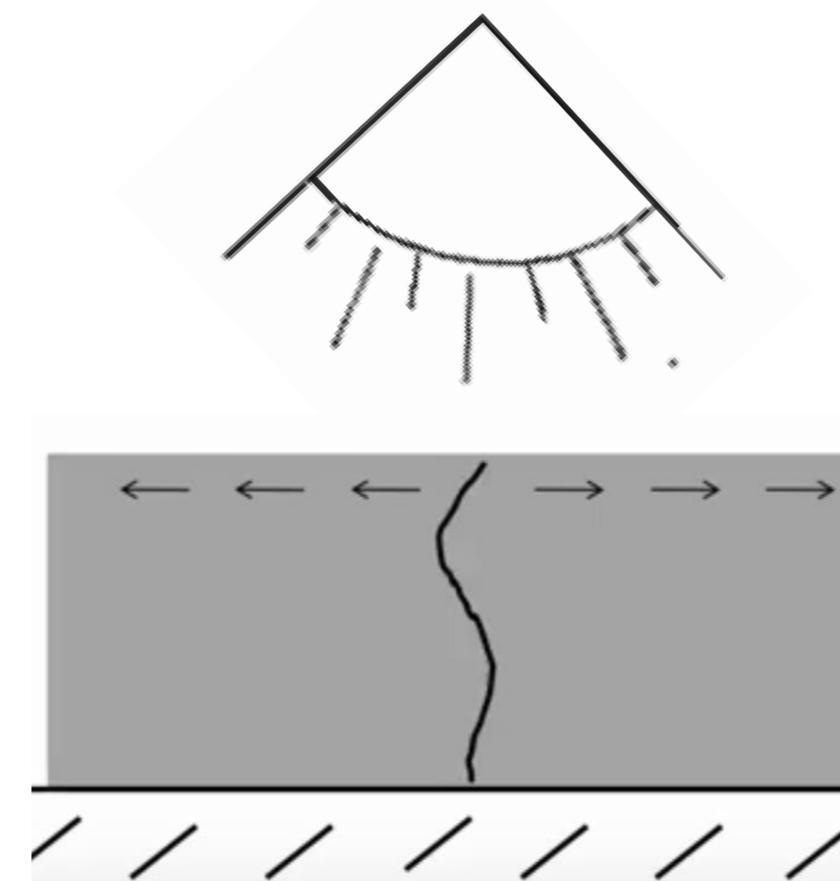


# Patologías estructurales

External restraint

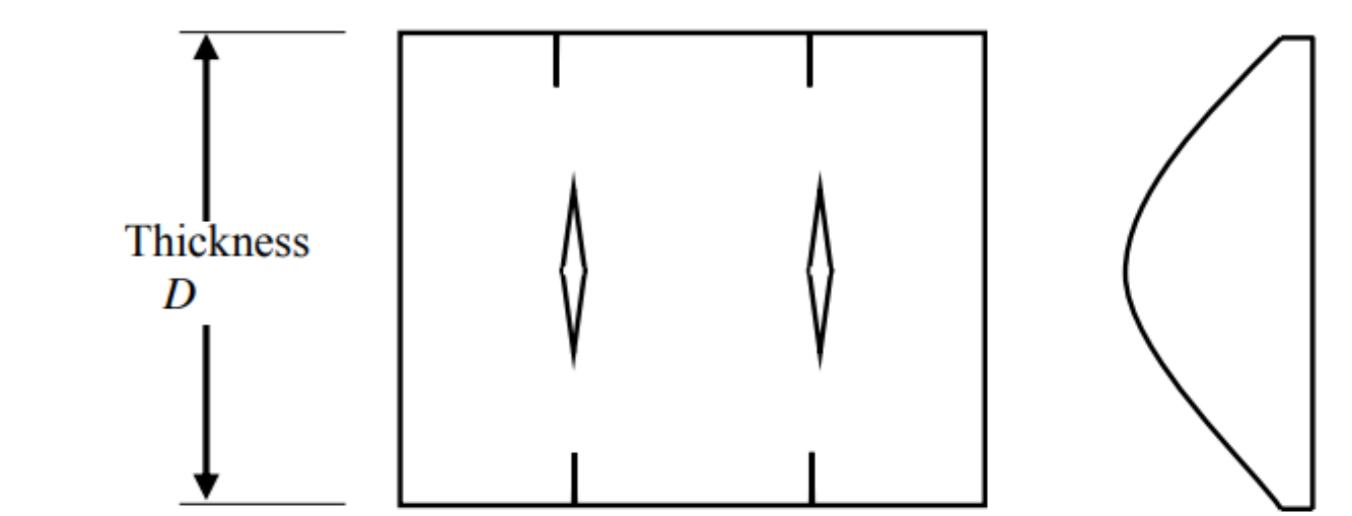
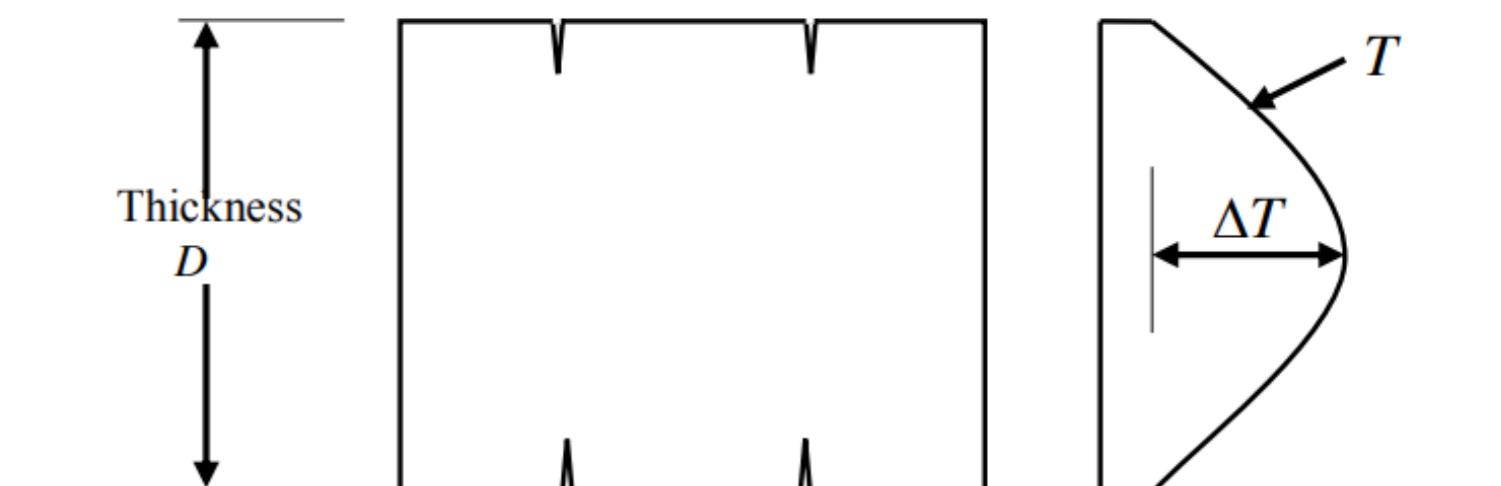


External edge restraint



Internal restraint

Heating



Cooling

Concrete element  
and possible interior  
cracks

Temperature drop  
 $\Delta T$  during cooling

## Grietas debidas a efectos químicos

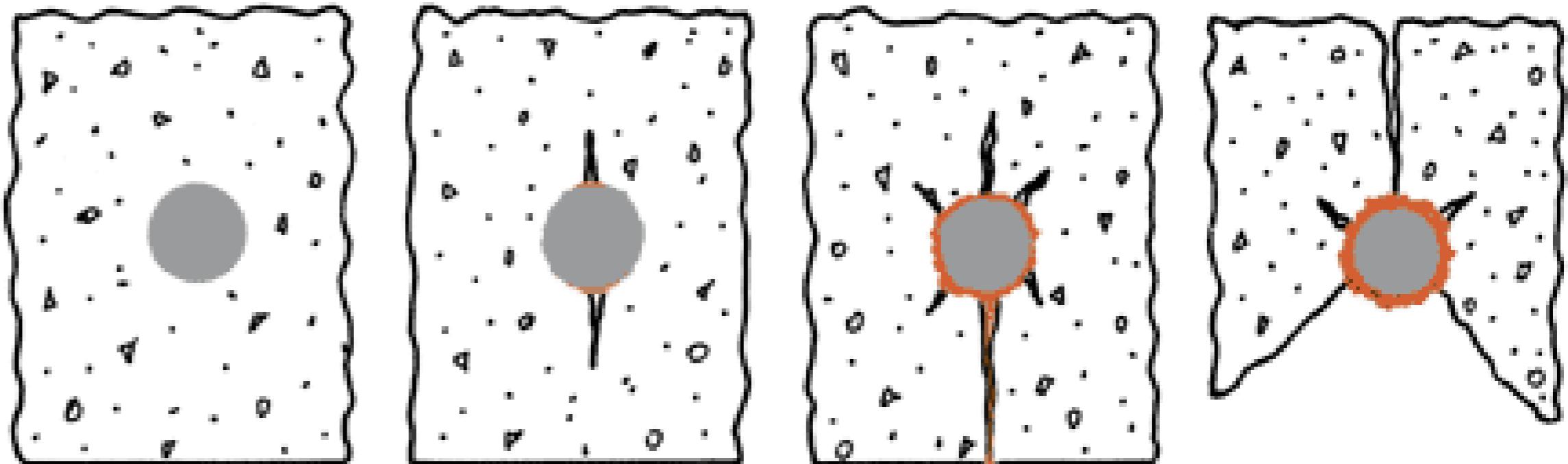
- Grietas por corrosión
- Grietas por reacciones álcali-sílice (Alkali-silica reactions)

# Patologías estructurales

## Corrosion of steel reinforcement

Cuando el acero se embebe en el hormigón, normalmente no se corroe porque el entorno alcalino del hormigón forma una capa pasiva protectora en la superficie del acero (pasivación). Sin embargo, si el recubrimiento es insuficiente o el hormigón es permeable, éste puede **carbonatarse** eliminando así la capa pasiva del acero. Esta capa también puede descomponerse en **presencia de cantidades excesivas de iones cloruro**.

Cuando la capa pasiva se rompe, el acero puede oxidarse o corroerse y, al tratarse de un proceso expansivo, puede provocar que el hormigón se fisure y se astille. El agrietamiento y el desconchado son particularmente notables en las esquinas de vigas y columnas sobre los redondos principales, aunque a menudo también se puede ver el patrón de cercos de cortante y estribos. Tales grietas generalmente mostrarán signos de manchas de óxido.



Before Corrosion

Build-up of Corrosion Products

Further Corrosion,  
Surface Cracks,  
Stains

Eventual Spalling,  
Corroded Bar  
Exposed



## Alkali-silica reaction cracks

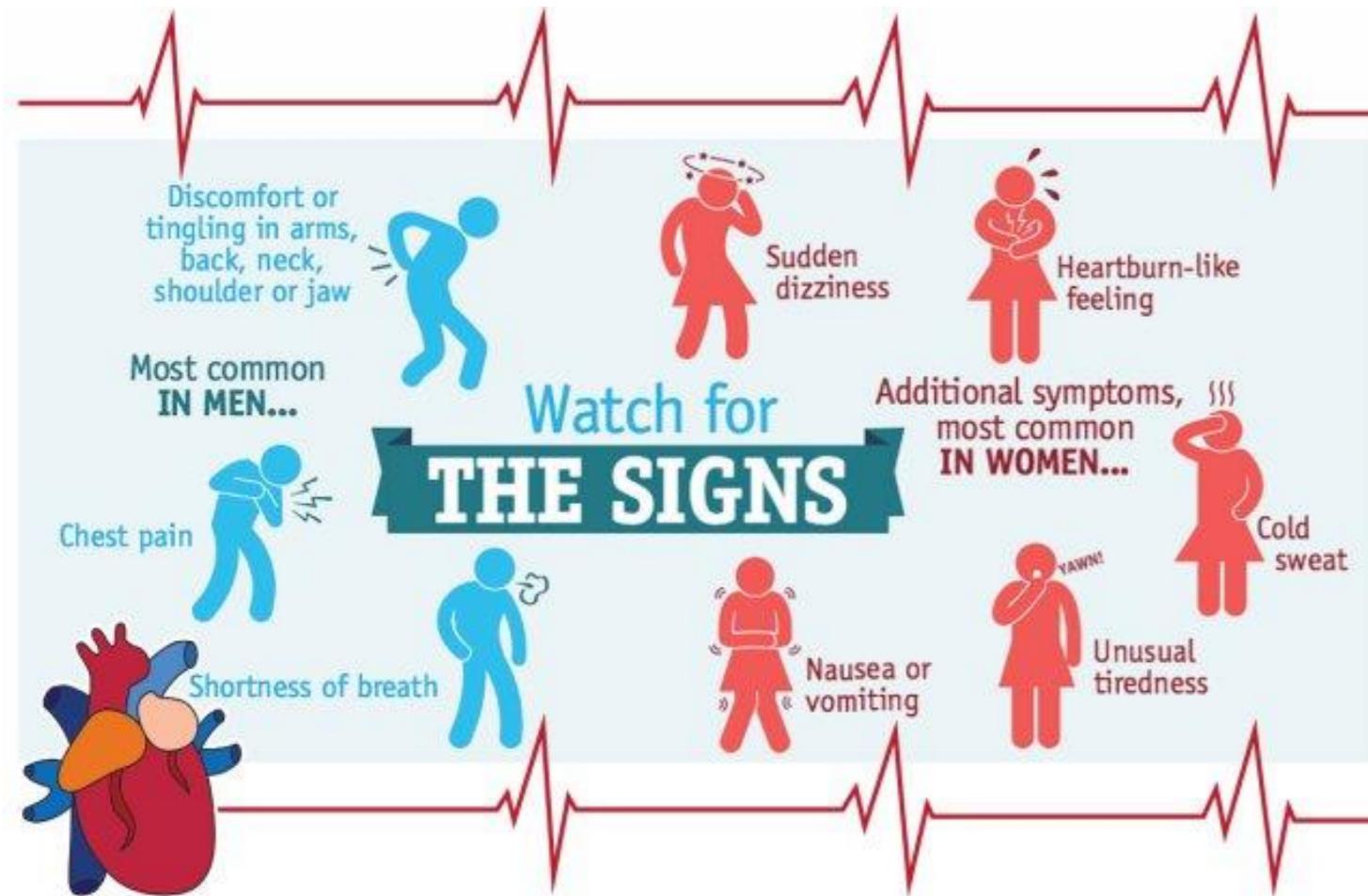
Las reacciones álcali-sílice (ASR) causan graves fisuraciones de tipo craze cracking o fisuración direccional (miembros pretensados), que pueden dar como resultado problemas estructurales críticos o incluso forzar la demolición de la estructura. Hormigones con alto contenido en álcali y en contacto con agua subterránea, lluvia o condensación intensa son particularmente vulnerables. Las exudaciones de gel a través de las grietas del hormigón tienen un **color amarillo característico** y un **pH elevado**. Otros signos visibles de daño pueden ser el la aparición de **popouts** y **decoloración**.

- Algunos agregados pueden presentar un riesgo elevado a reacciones ASR. Esto puede ser particularmente peligroso en grandes proyectos de infraestructuras como presas, carreteras o pistas de aeropuertos, que requieren enormes cantidades de áridos.
- La reacción da como resultado un aumento del volumen del hormigón, provocando grietas y popouts.
- La fisuración generalmente aparece en áreas con un suministro frecuente de humedad, como cerca de la línea de flotación en pilares, cerca del suelo detrás de muros de contención, cerca de juntas y bordes libres en pavimentos.



# Patologías estructurales

## SUMMARY

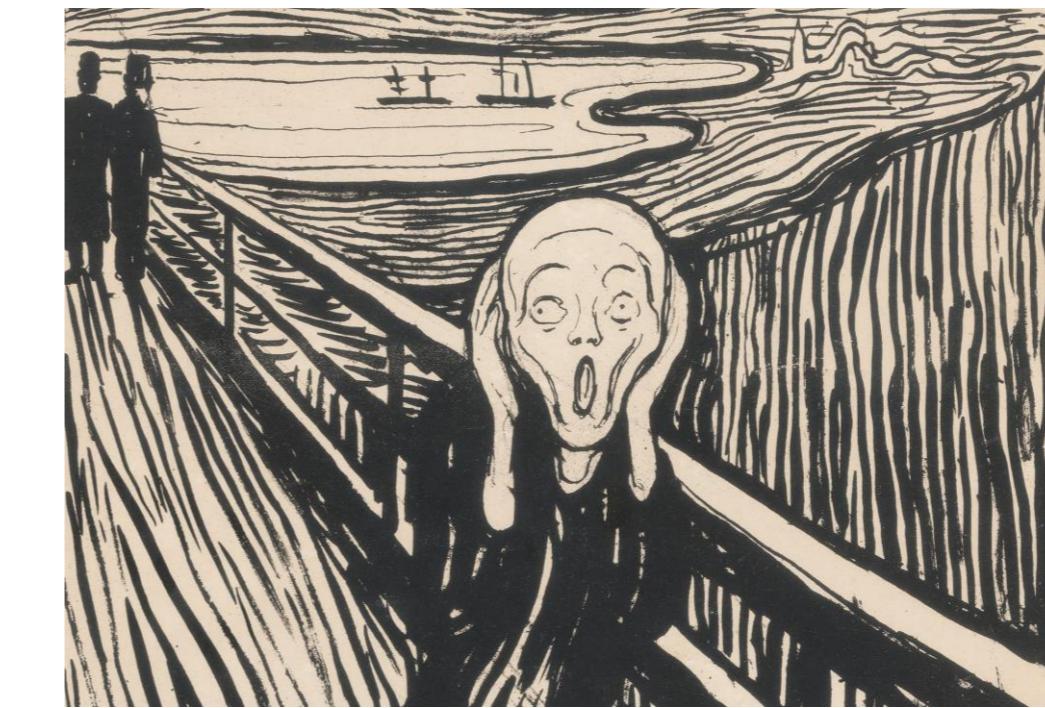


- Shoddy workmanship
  - Cold joints
  - Bug holes
  - Reinforcing steel that has become exposed
  - Honeycombing
- Spalling
- Scaling
- Popouts
- Curling
- Delamination
- Erosion
  - Abrasion
  - Cavitation
- Joint seals and seepage
- Efflorescence
- Dusting
- Cracking
  - Structural
  - Non-Structural
- ❖ Pre-hardening (plastic) cracks
  - Plastic shrinkage cracks
  - Plastic settlement cracks
  - Cracks caused by formwork movement
- ❖ Cracks in hardened concrete
  - Craze cracking
  - D-cracks
  - Drying shrinkage cracks
  - Thermal movement cracks
- ❖ Cracks due to Chemical Effects
  - Corrosion of steel reinforcement
  - Alkali-Silica reaction cracks



UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

# Agentes de degradación



## Agentes de degradación



Woodson, R. D. (2009). *Concrete structures: protection, repair and rehabilitation*. Butterworth-Heinemann.

- Accidental Loads
- Chemical reactions
  - Alkali-carbonate reaction
  - Alkali-silica reaction
  - Sulfate attack
    - Chemical attack
    - Physical attack
- Corrosion
  - Carbonation
  - Chlorides attack
- Freezing and thawing
- Shrinkage
- Temperature changes

# Agentes de degradación

## CARGAS ACCIDENTALES

Eventos excepcionales como terremotos, impactos, eventos climáticos extremos (inundaciones, tormentas, tornados, etc.). Los daños causados por tales eventos son generalmente de corta duración, escasos y espaciados entre ocurrencias. Desafortunadamente, este tipo de eventos son difícilmente predecibles.

Lorry crash into a footbridge on the M20 motorway (Kent, 2016)



<https://www.itv.com/news/meridian/update/2016-08-29/m20-re-opens-with-50mph-speed-limit-following-bridge-collapse/>

<https://www.youtube.com/watch?v=U2FxkgvyQPM>



Sunshine Skyway Bridge (Tampa, 1980)

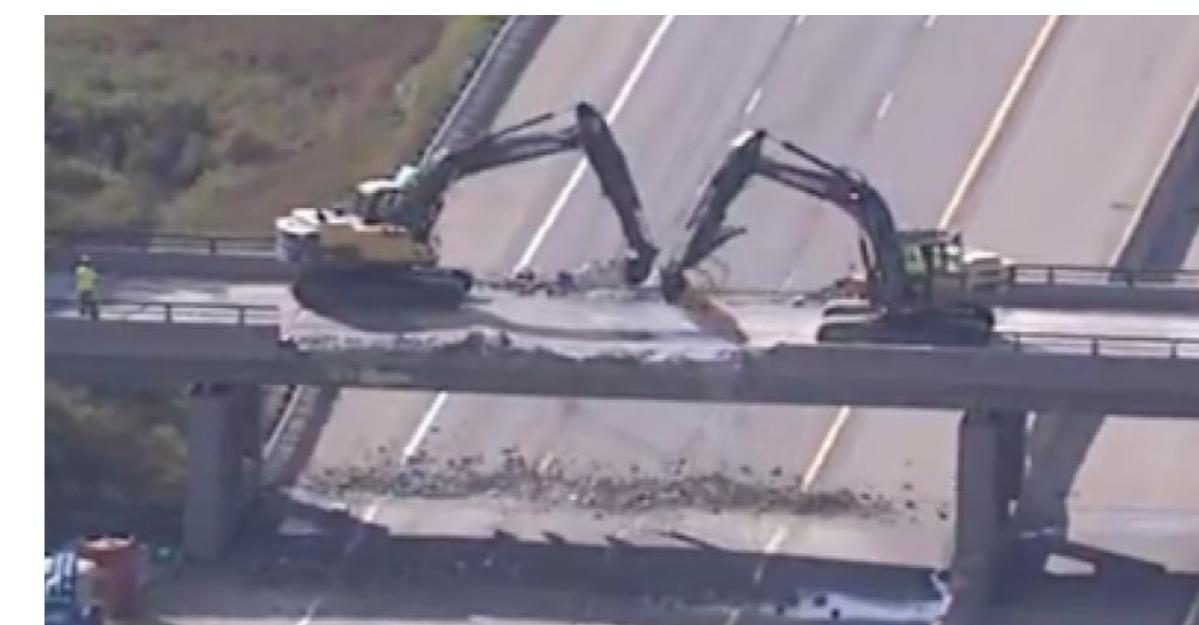


<https://www.tampabay.com/photos/2018/05/09/the-sunshine-skyway-bridge-plunged-into-tampa-bay-38-years-ago/>



# Agentes de degradación

2017. Pleasant Valley Road bridge over Interstate-96 (Livingston County, Michigan)

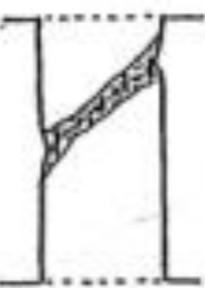
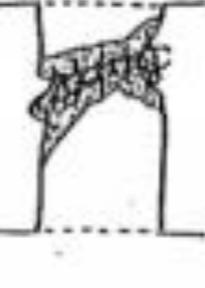


<https://www.youtube.com/watch?v=F7hB29yyd3s>



UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

# Agentes de degradación

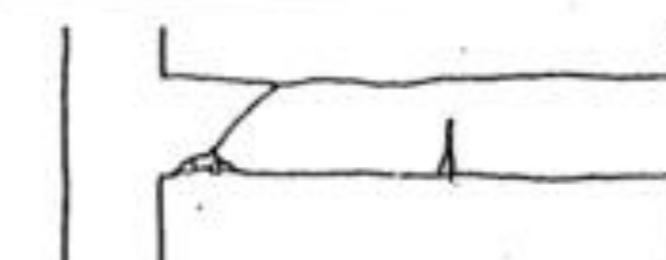
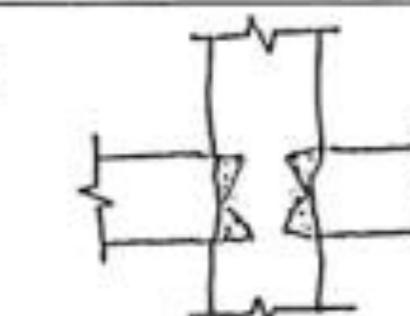
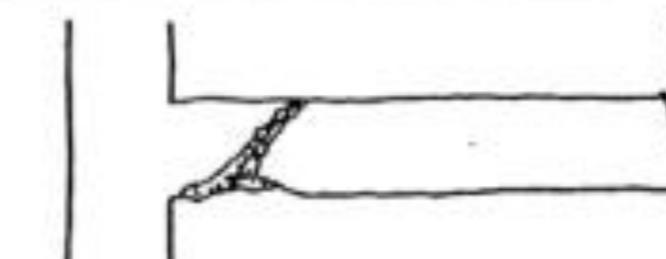
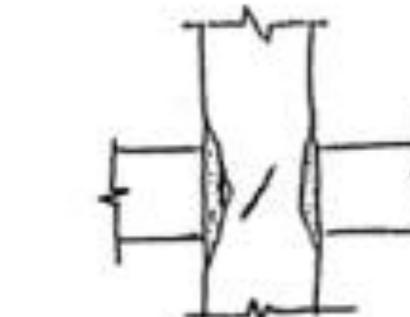
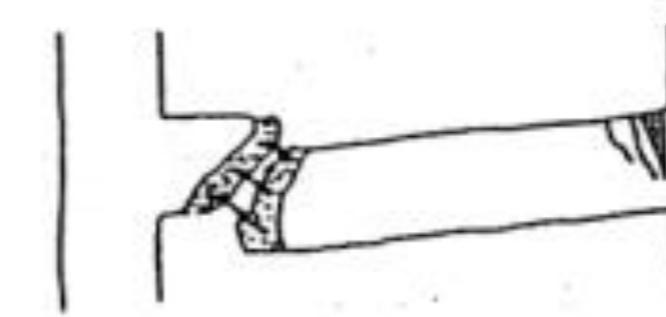
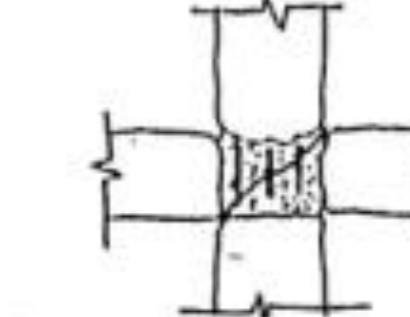
Damage Severity	R-C COLUMNS	R-C SHEAR WALLS
1 None	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fine cracks in mortar</li> <li>Light spalling of concrete</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No visible cracks</li> </ul>
2 Slight	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>d_{\text{horiz}} \leq 2.0 \text{ mm}</math></li> <li><math>d_{\text{diag}} \leq 0.5 \text{ mm}</math></li> <li>Spalling of concrete</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li><math>d_{\text{horiz}} &lt; 1.0 \text{ mm}</math></li> <li><math>d_{\text{diag}} &lt; 0.5 \text{ mm}</math></li> </ul>
3 Moderate- Heavy	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>d_{\text{horiz}} \leq 5.0 \text{ mm}</math></li> <li><math>d_{\text{diag}} \leq 2.0 \text{ mm}</math></li> <li>Partial disintegration of concrete</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li><math>d_{\text{horiz}} \leq 3.0 \text{ mm}</math></li> <li><math>d_{\text{diag}} \leq 1.0 \text{ mm}</math></li> <li>Spalling of concrete</li> </ul>
4 Severe- Total	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>5.0 \text{ mm} &lt; d_{\text{horiz}}</math></li> <li><math>2.0 \text{ mm} &lt; d_{\text{diag}}</math></li> <li>Extensive disintegration of concrete</li> <li>Buckling of longitudinal reinforce.</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li><math>3.0 \text{ mm} &lt; d_{\text{horiz}}</math></li> <li><math>1.0 \text{ mm} &lt; d_{\text{diag}}</math></li> <li>Disintegration of concrete</li> </ul> 

Notation:  $d_{\text{diag}}$  : diagonal cracks (inclined to the axis of the element)  
 $d_{\text{vert}}, d_{\text{horiz}}$  : vertical and horizontal cracks (to the axis of the element), respectively

Exhibit 2.5a: Damage Severity in Reinforced Concrete structural elements (R-C columns and R-C walls)



# Agentes de degradación

Damage Severity	R-C BEAMS	R-C JOINTS
1 None	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fine cracks in mortar</li> </ul>	
2 Slight	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>d_{vert} \leq 2.0 \text{ mm}</math></li> <li><math>d_{diag} \leq 0.5 \text{ mm}</math></li> <li>Spalling of concrete</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Spalling of concrete at the corners</li>  </ul>
3 Moderate-Heavy	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>d_{vert} \leq \sim 4.0 \text{ mm}</math></li> <li><math>d_{diag} \leq \sim 2.0 \text{ mm}</math></li> <li>Extensive spalling and crushing of concrete</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Spalling of concrete</li> <li>Inclined cracks <math>d \leq \sim 2.0 \text{ mm}</math></li>  </ul>
4 Severe-Total	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>4.0 \text{ mm} &lt; d_{vert}</math></li> <li><math>2.0 \text{ mm} &lt; d_{diag}</math></li> <li>Buckling of reinforcement</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diagonal cracks <math>2.0 \text{ mm} &lt; d_{diag}</math></li> <li>Disintegration of concrete</li>  </ul>

Notation:  
 $d_{diag}$  : diagonal cracks (inclined to the axis of the element)  
 $d_{vert}, d_{horiz}$  : vertical and horizontal cracks (to the axis of the element), respectively

**Exhibit 2.5b:** Damage Severity in Reinforced Concrete structural elements (R-C beams and R-C joints)



# Agentes de degradación



Damage severity 2



Damage severity 3



Damage severity 4



UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

Anagnostopoulos, S., Moretti, M., Panoutsopoulou, M., Panagiotopoulou, D., & Thoma, T. (2004). Post-earthquake damage and usability assessment of buildings: further development and applications. *Final report. Patras, Greece: European Commission-DG Environment, and Civil Protection EPPO.*

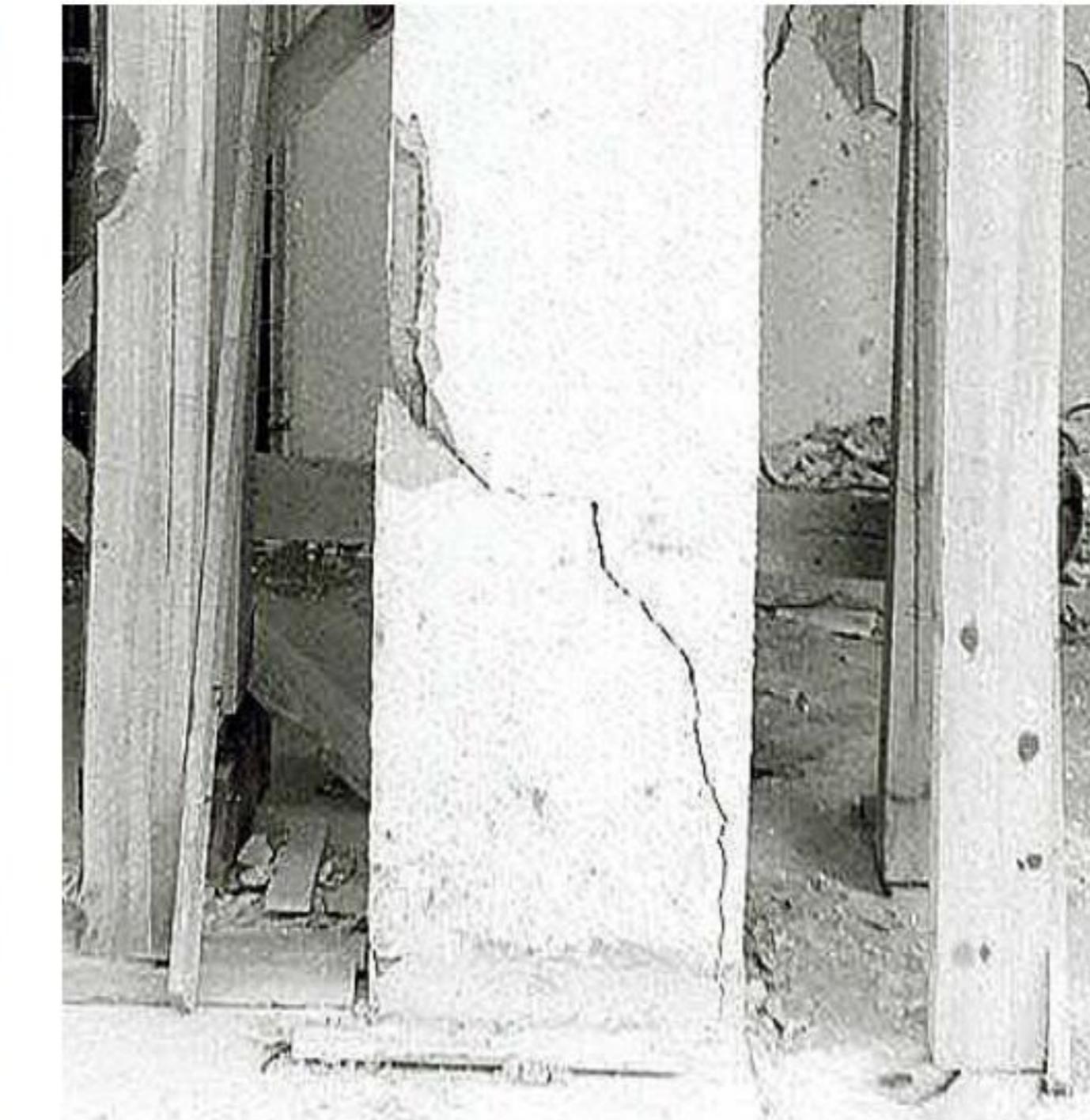
# Agentes de degradación



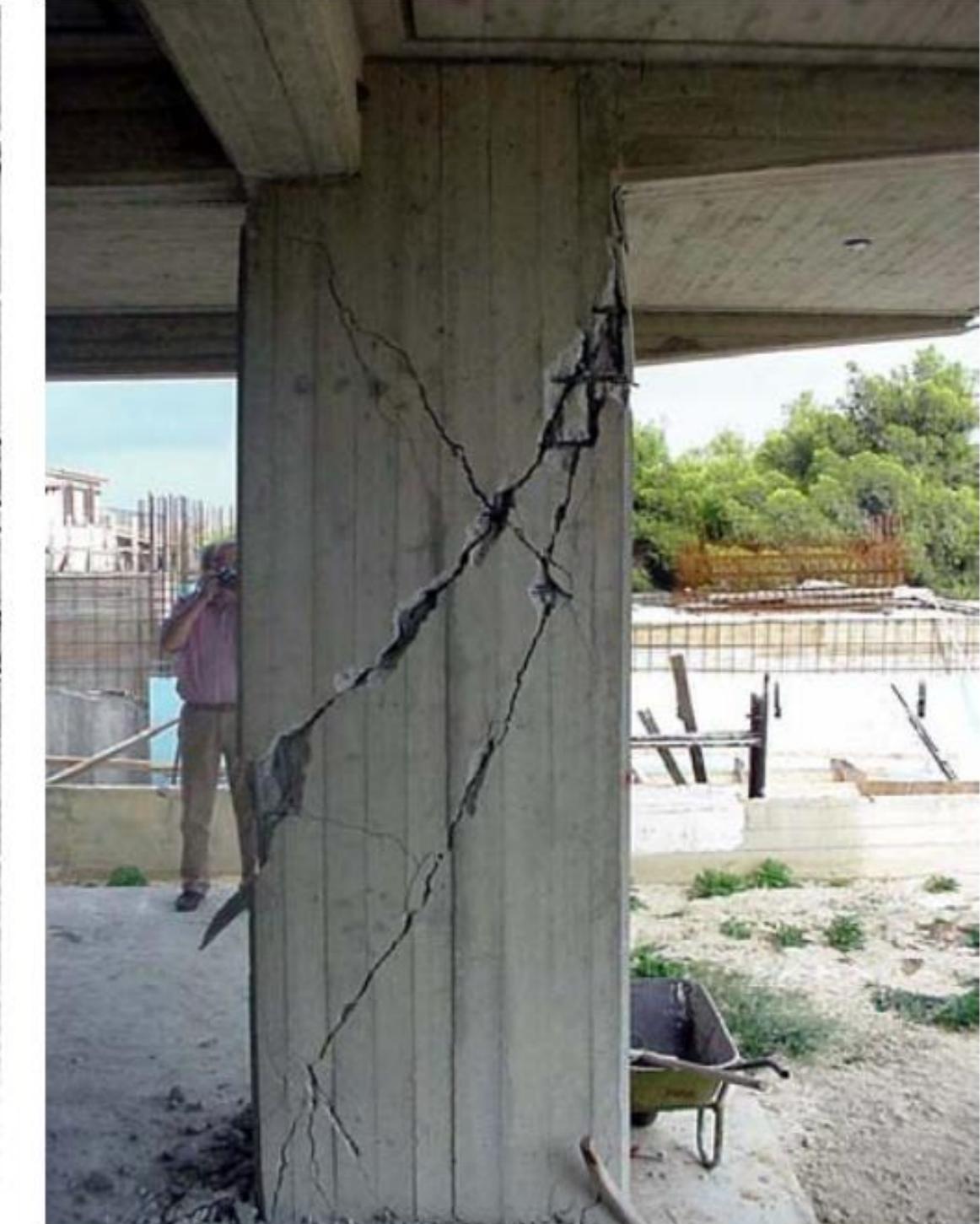
Damage severity 1



Damage severity 2



Damage severity 3



Damage severity 4



UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

Anagnostopoulos, S., Moretti, M., Panoutsopoulou, M., Panagiotopoulou, D., & Thoma, T. (2004). Post-earthquake damage and usability assessment of buildings: further development and applications. *Final report*. Patras, Greece: European Commission-DG Environment, and Civil Protection EPPO.

## Agentes de degradación



Damage severity 2-3



Damage severity 4



UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

Anagnostopoulos, S., Moretti, M., Panoutsopoulou, M., Panagiotopoulou, D., & Thoma, T. (2004). Post-earthquake damage and usability assessment of buildings: further development and applications. *Final report*. Patras, Greece: European Commission-DG Environment, and Civil Protection EPPO.

# Agentes de degradación

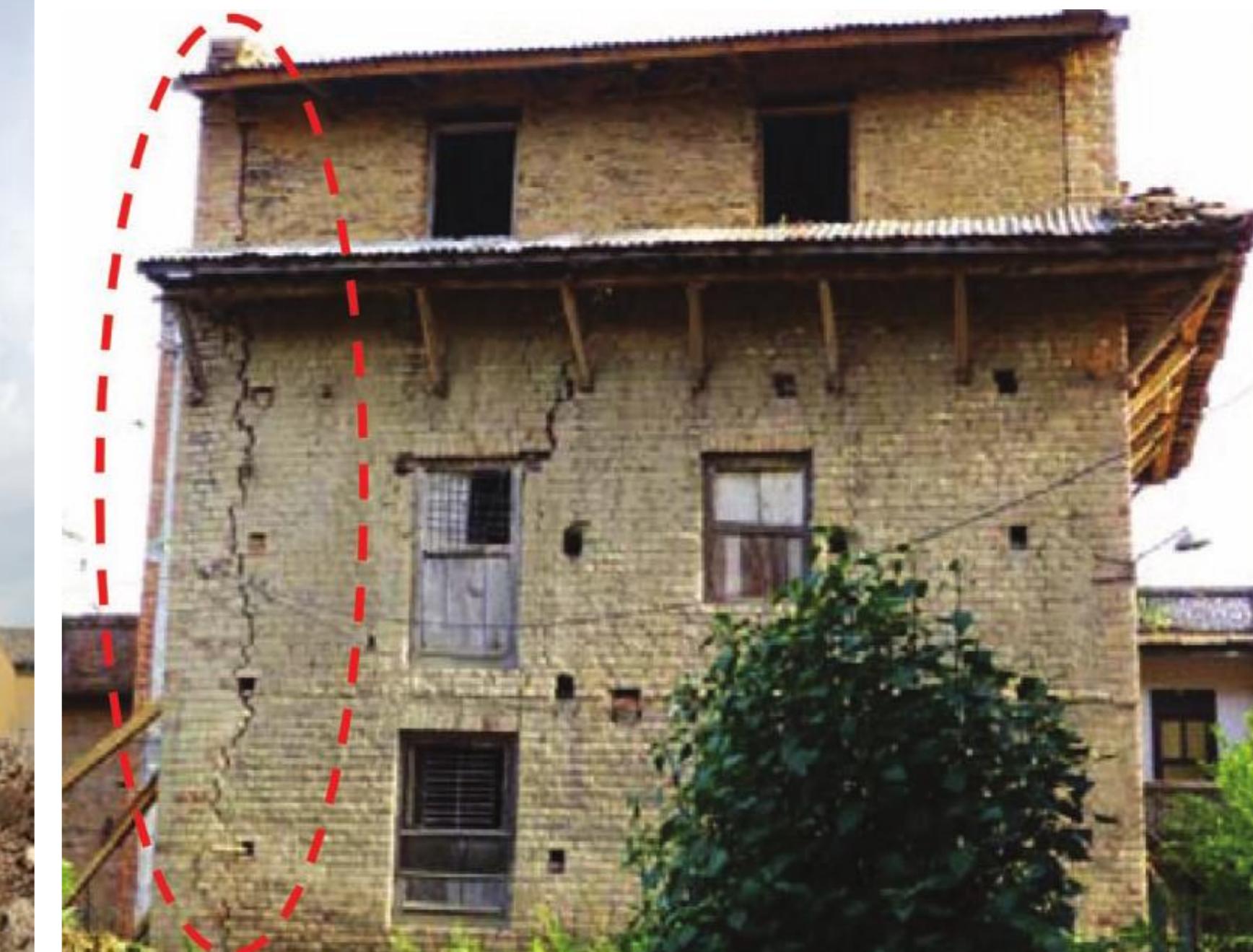


X-cracking

Vertical cracking



OVERTURNING OF A FAÇADE



UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

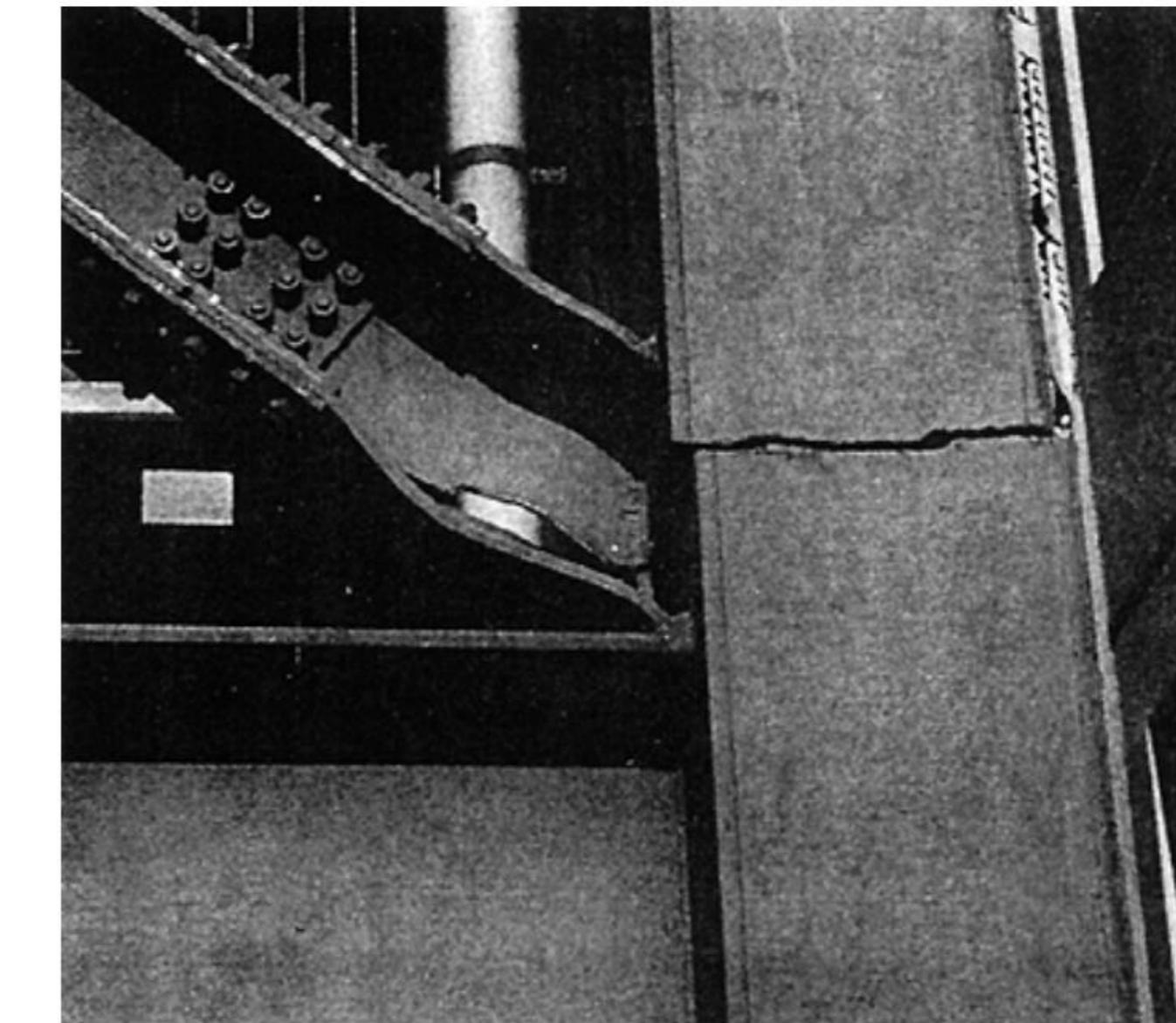
Anagnostopoulos, S., Moretti, M., Panoutsopoulou, M., Panagiotopoulou, D., & Thoma, T. (2004). Post-earthquake damage and usability assessment of buildings: further development and applications. *Final report*. Patras, Greece: European Commission-DG Environment, and Civil Protection EPPO.

# Agentes de degradación

## Pandeo



## Fractura



Fallo de soldaduras



UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

Anagnostopoulos, S., Moretti, M., Panoutsopoulou, M., Panagiotopoulou, D., & Thoma, T. (2004). Post-earthquake damage and usability assessment of buildings: further development and applications. *Final report*. Patras, Greece: European Commission-DG Environment, and Civil Protection EPPO.

## CHEMICAL REACTIONS

### □ Chemical reactions

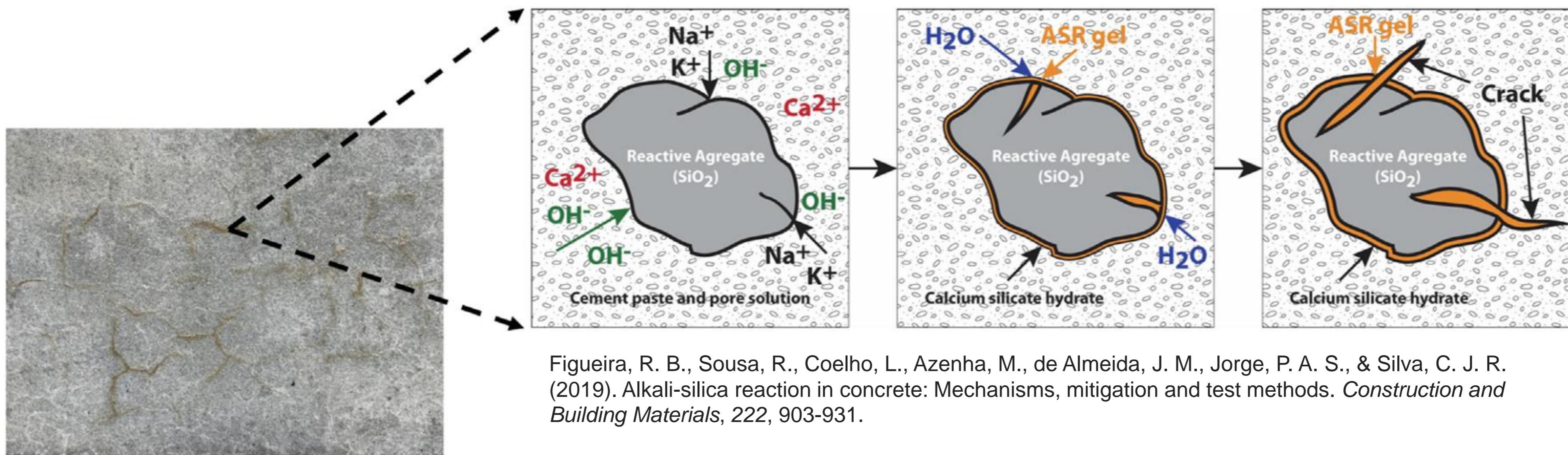
- Alkali-silica reaction (ASR) (*reacciones álcali-sílice*)
- Alkali-carbonate reaction (ACR) (*reacciones álcali-carbonato*)
- Sulfate attack (*Ataque de sulfatos*)

## Agentes de degradación

# Alkali-aggregate reaction: Alkali-silica reaction (ASR) and Alkali-carbonate reaction (ACR)

En la mayoría de los hormigones los áridos suelen ser más o menos químicamente inertes. Sin embargo, algunos agregados reaccionan con los hidróxidos alcalinos en el hormigón, causando expansión y fisuración. Estas reacciones pueden pasar desapercibidas durante un período de tiempo (10 a 20 años) antes de que se desarrolle un daño severo. Se pueden presentar en dos formas: **reacción álcali-sílice (ASR)** y **reacción álcali-carbonato (ACR)**.

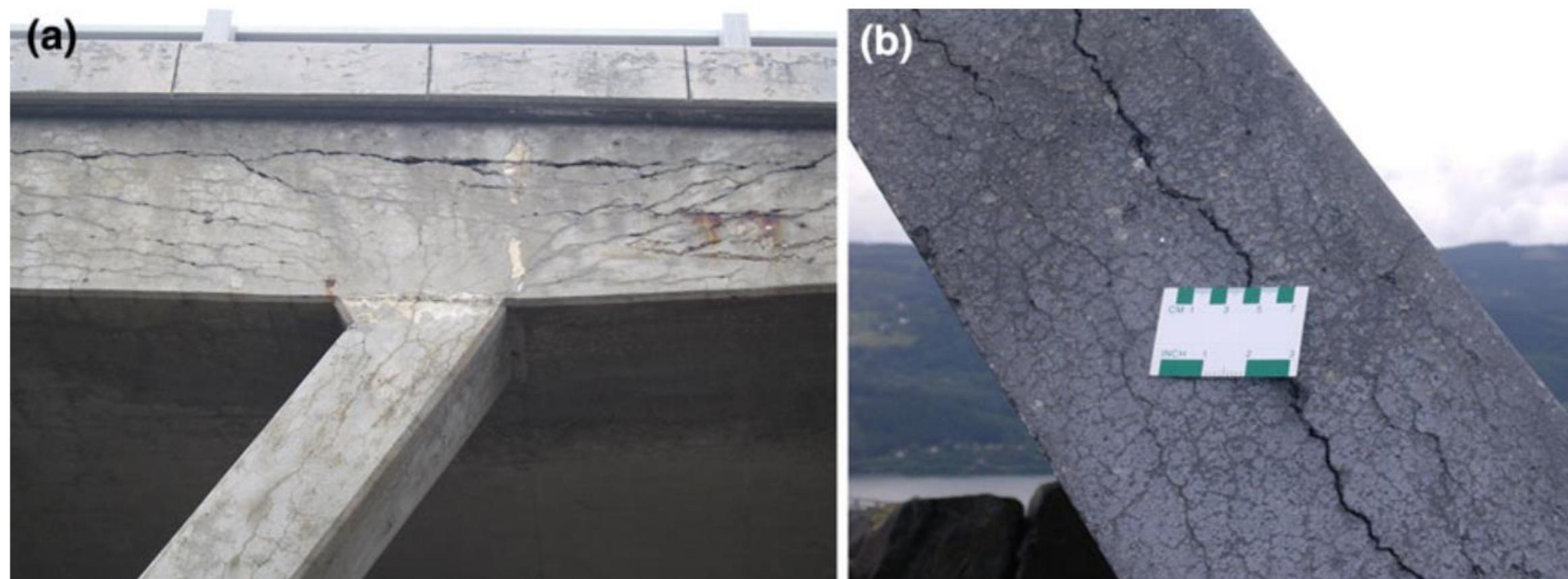
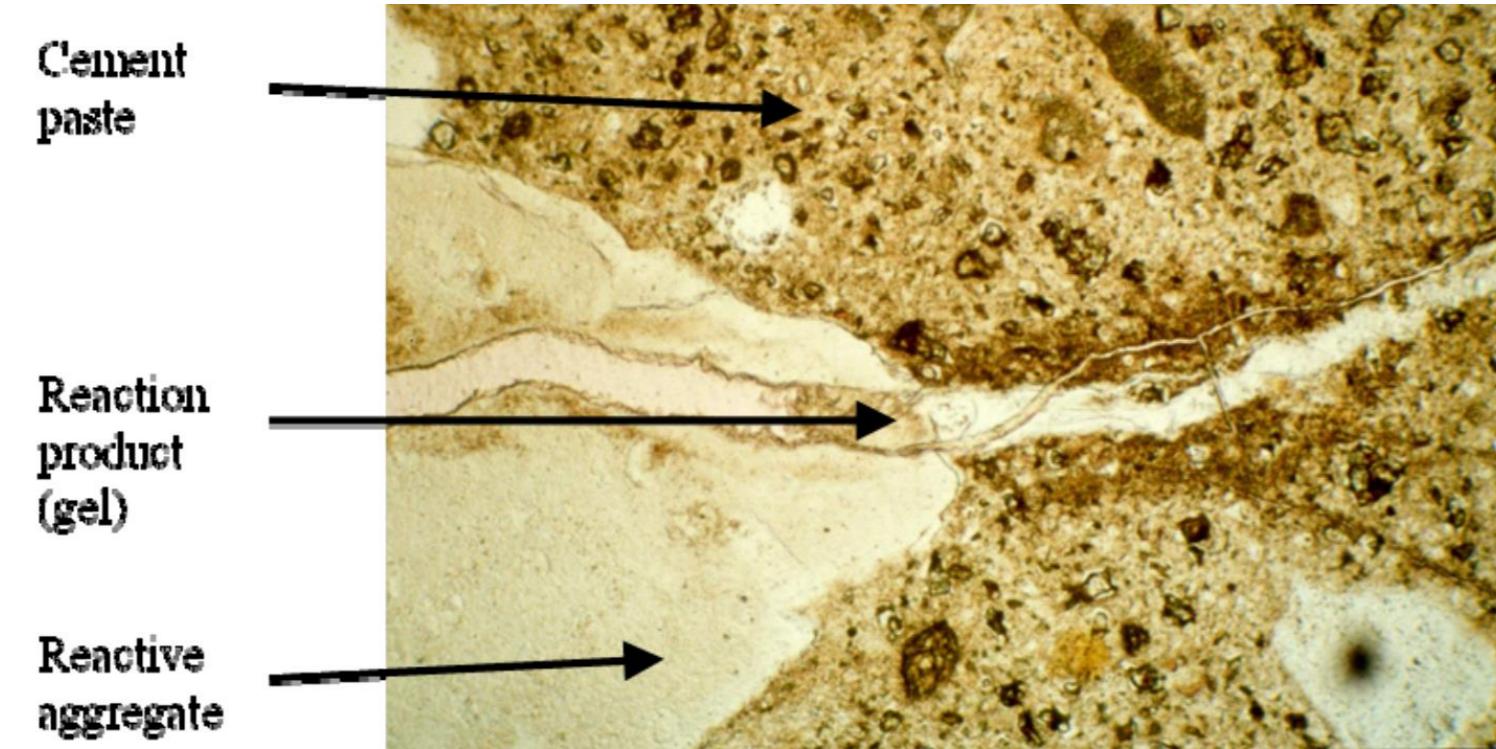
La reacción **álcali-sílice (ASR)**, más grave y común que la ACR, se desarrolla por agregados que contienen minerales de sílice reactivos. La ASR es causada por una reacción entre los iones de hidróxido ( $K^+$ ,  $Na^+$  y  $OH^-$ ) en la solución de poros de cemento alcalino en el hormigón y formas reactivas de minerales de sílice presentes en los agregados gruesos o finos (por ejemplo, chert, cuarcita, ópalo, cuarzo). Esta reacción inicialmente forma un gel de sílice-álcali higroscópico que se dentro de la partícula del agregado reactivo, terminando por inducir y propagar grietas.



Figueira, R. B., Sousa, R., Coelho, L., Azenha, M., de Almeida, J. M., Jorge, P. A. S., & Silva, C. J. R. (2019). Alkali-silica reaction in concrete: Mechanisms, mitigation and test methods. *Construction and Building Materials*, 222, 903-931.

# Agentes de degradación

## - Map cracking



Pattern of the cracks related to ASR. In both structures (a, b), the major cracks reflect the underlying steel reinforcement. Cracks tend to develop longitudinally parallel to the direction of dominant restraint



ASR-induced map-cracking on a dam in Norway.

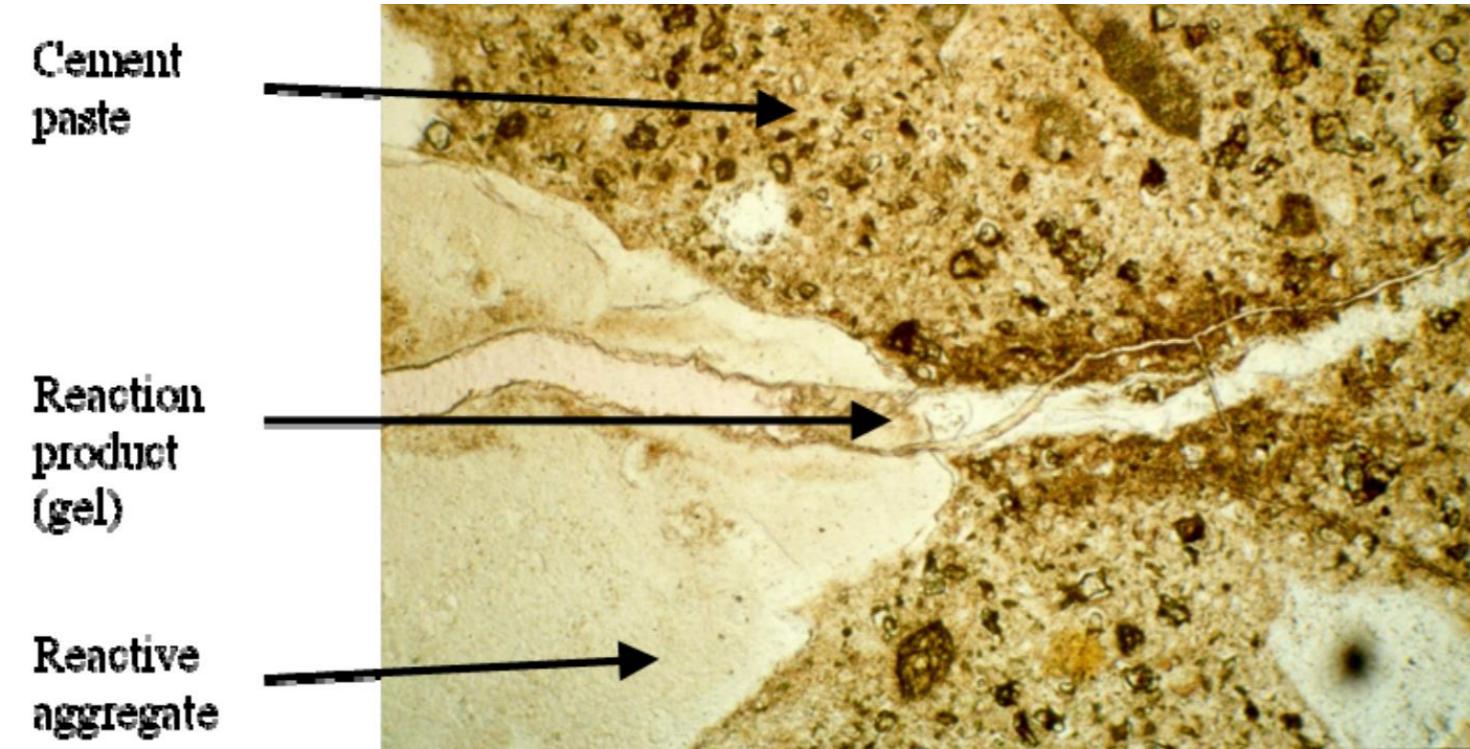


UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

Fernandes, I., & Broekmans, M. A. (2013). Alkali–silica reactions: an overview. Part I. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2(4), 257–267.

# Agentes de degradación

- Map cracking
- Movements and displacements



Misalignment in the crest of two different concrete dams

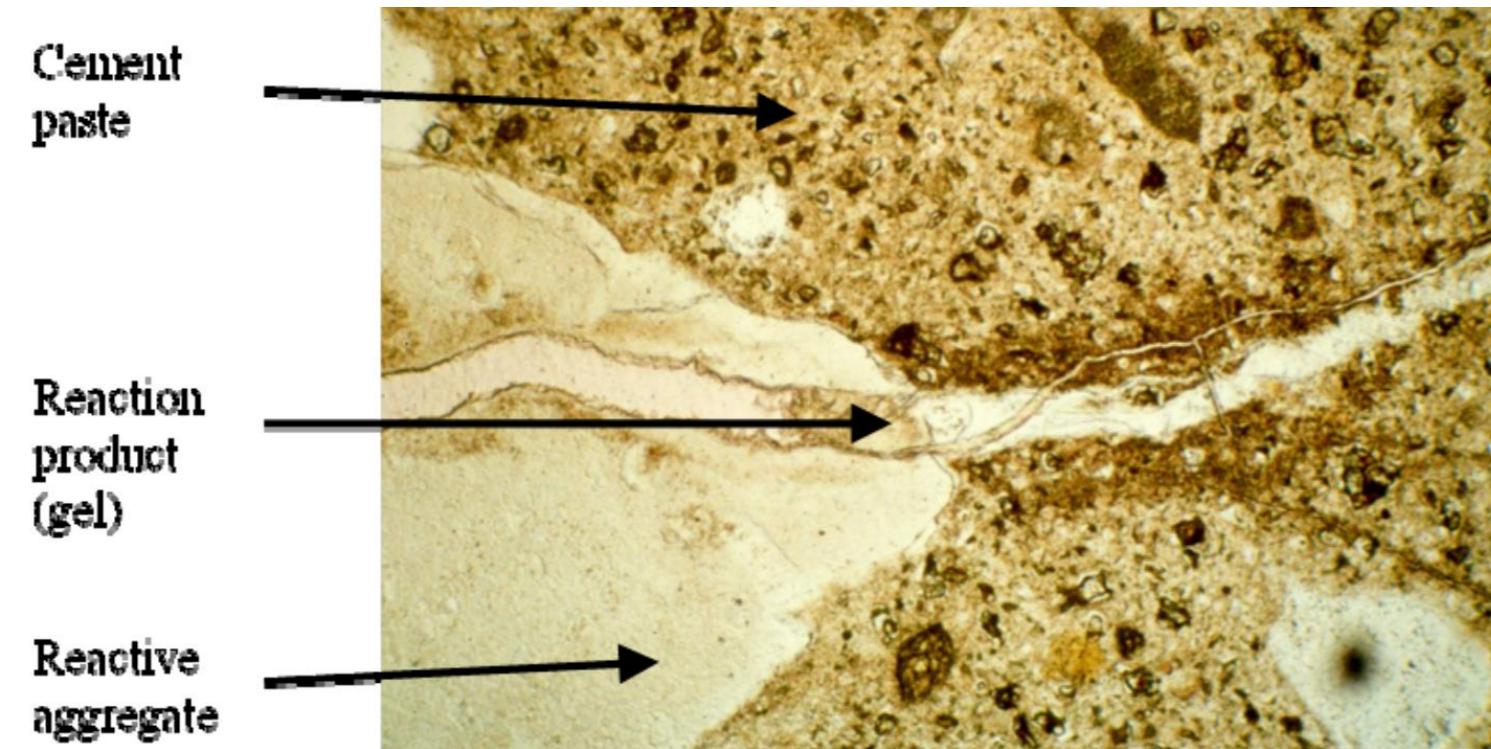


UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

Fernandes, I., & Broekmans, M. A. (2013). Alkali–silica reactions: an overview.  
Part I. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2(4), 257–267.

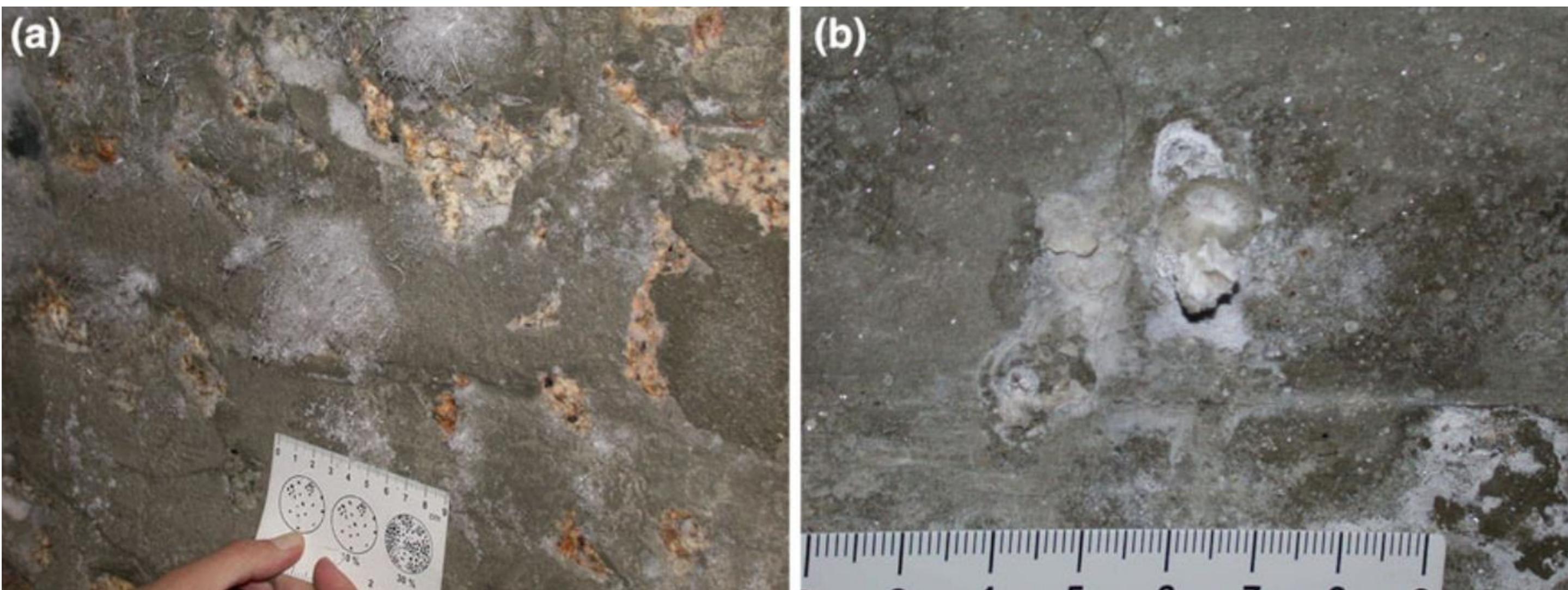
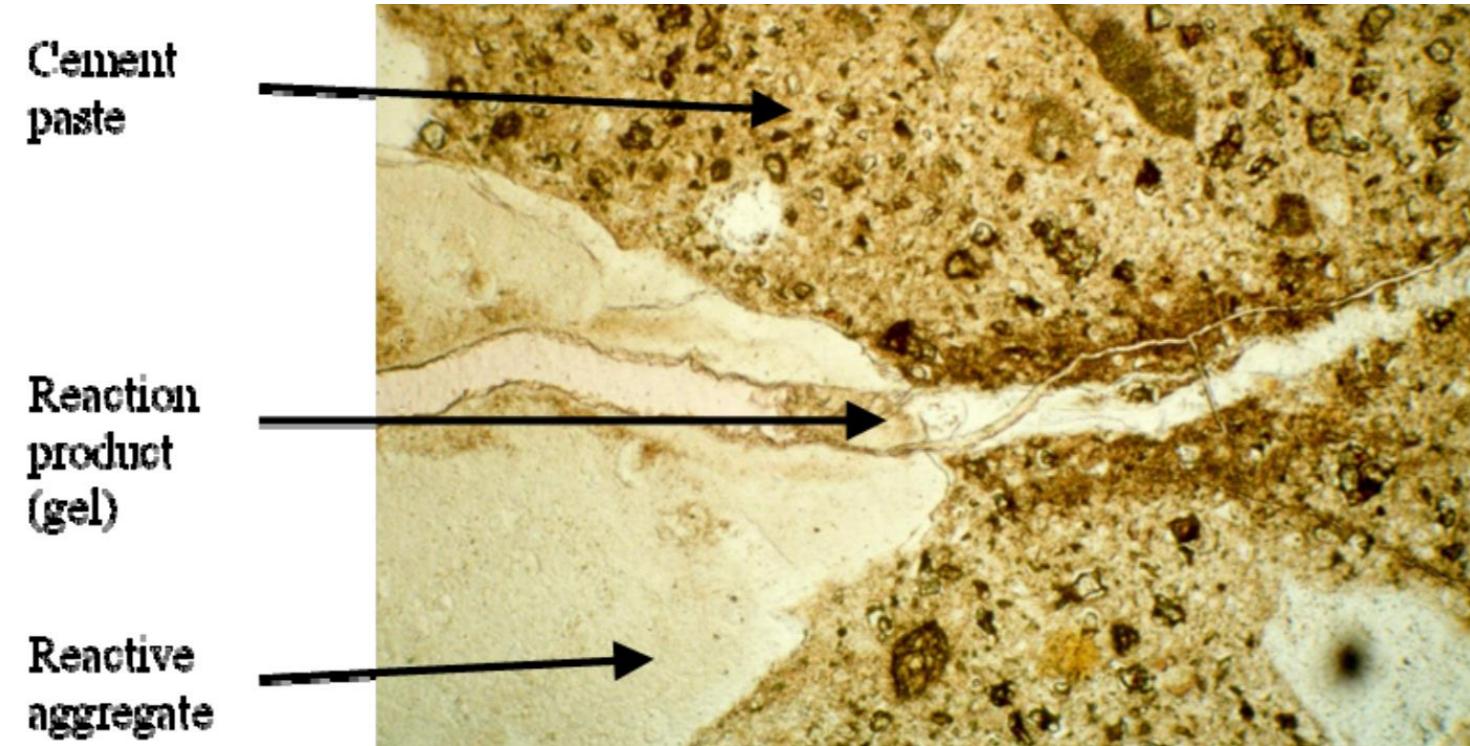
# Agentes de degradación

- Map cracking
- Movements and displacements
- **Discoloration and Dark Patches.**



# Agentes de degradación

- Map cracking
- Movements and displacements
- Discoloration and Dark Patches
- Efflorescence and Exudations.**



Interior wall in two different dams. (a) Needle crystals of trona forming efflorescence (white fluffy patches); (b) exudation of carbonated alkali–silica gel (white droplet)

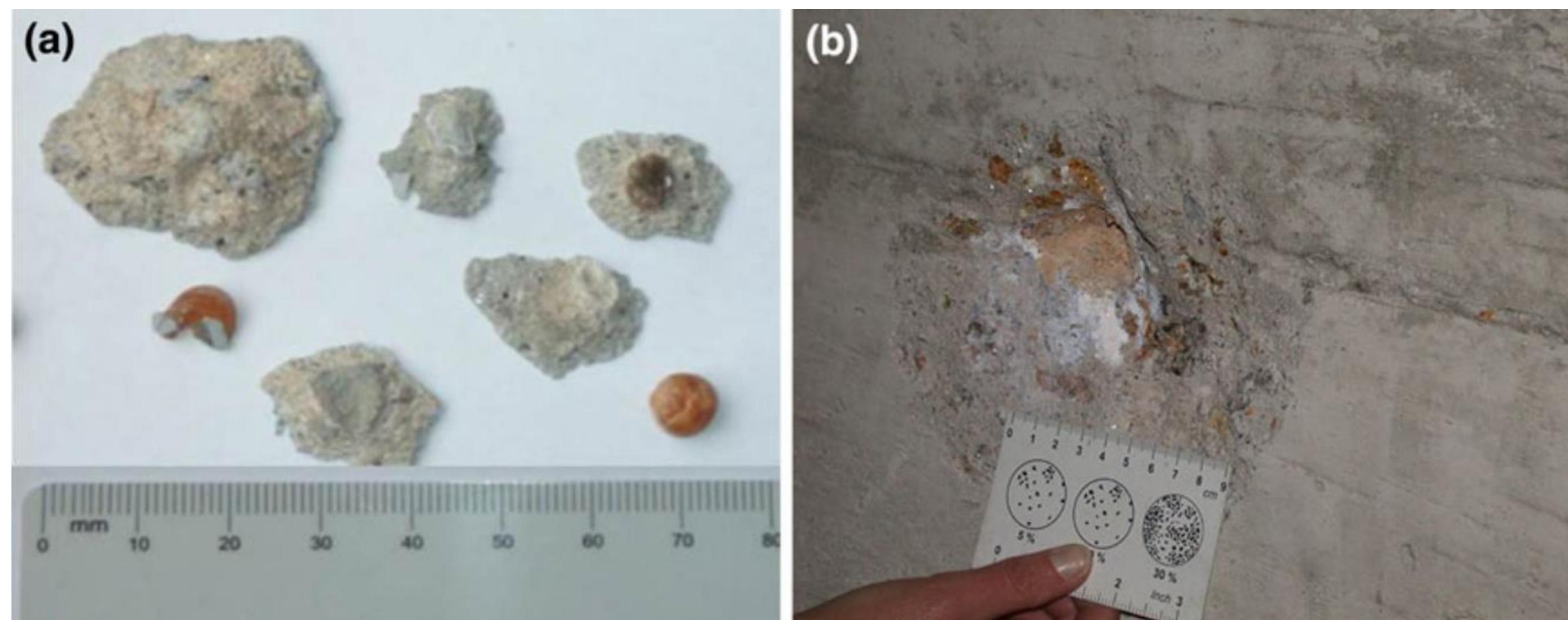
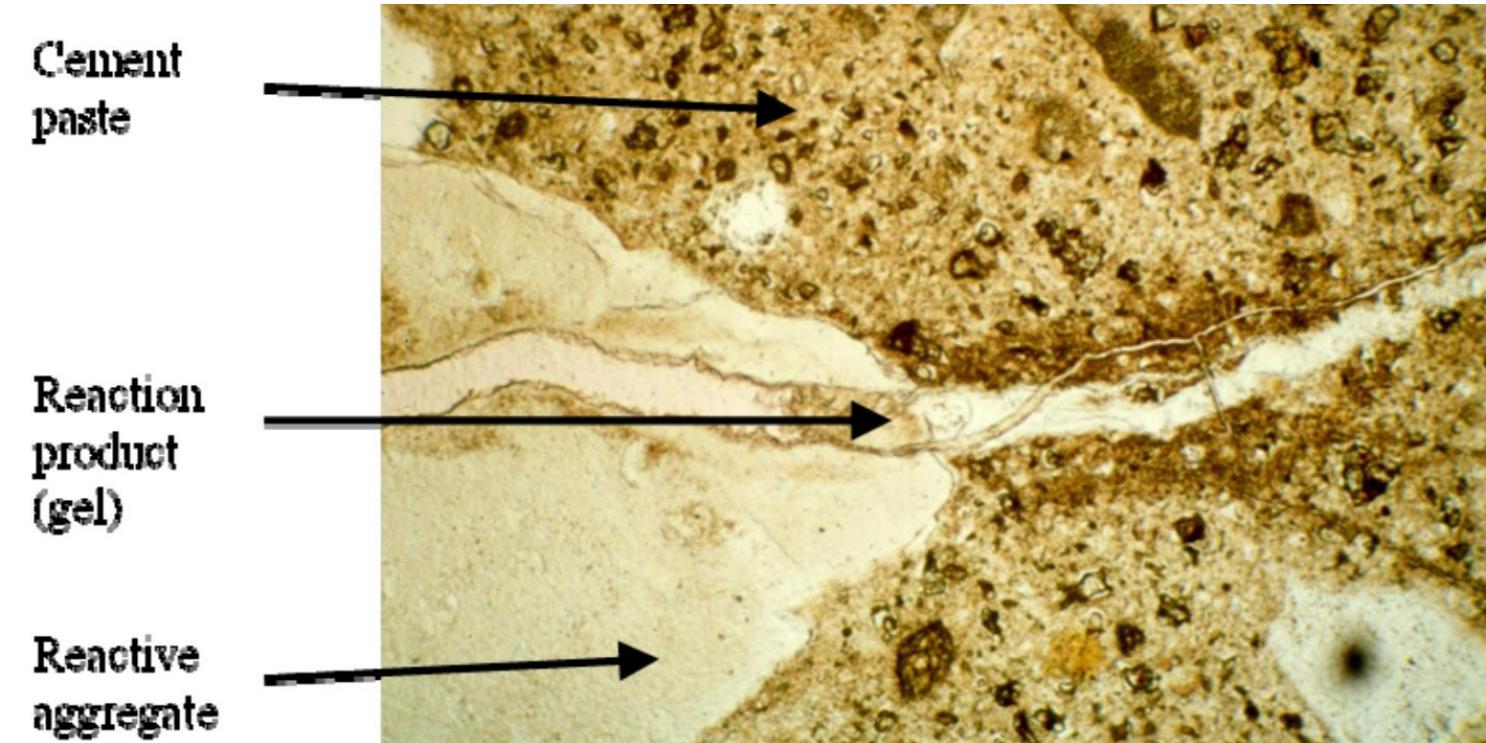


UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

Fernandes, I., & Broekmans, M. A. (2013). Alkali–silica reactions: an overview.  
Part I. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2(4), 257–267.

# Agentes de degradación

- Map cracking
- Movements and displacements
- Discoloration and Dark Patches
- Efflorescence and Exudations
- **Pop-outs.**



Examples of pop-outs: (a) conical fragments from a pavement; (b) depression left on the wall of a concrete dam after the detachment of a pop-out.



UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

Fernandes, I., & Broekmans, M. A. (2013). Alkali–silica reactions: an overview.  
Part I. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2(4), 257-267.

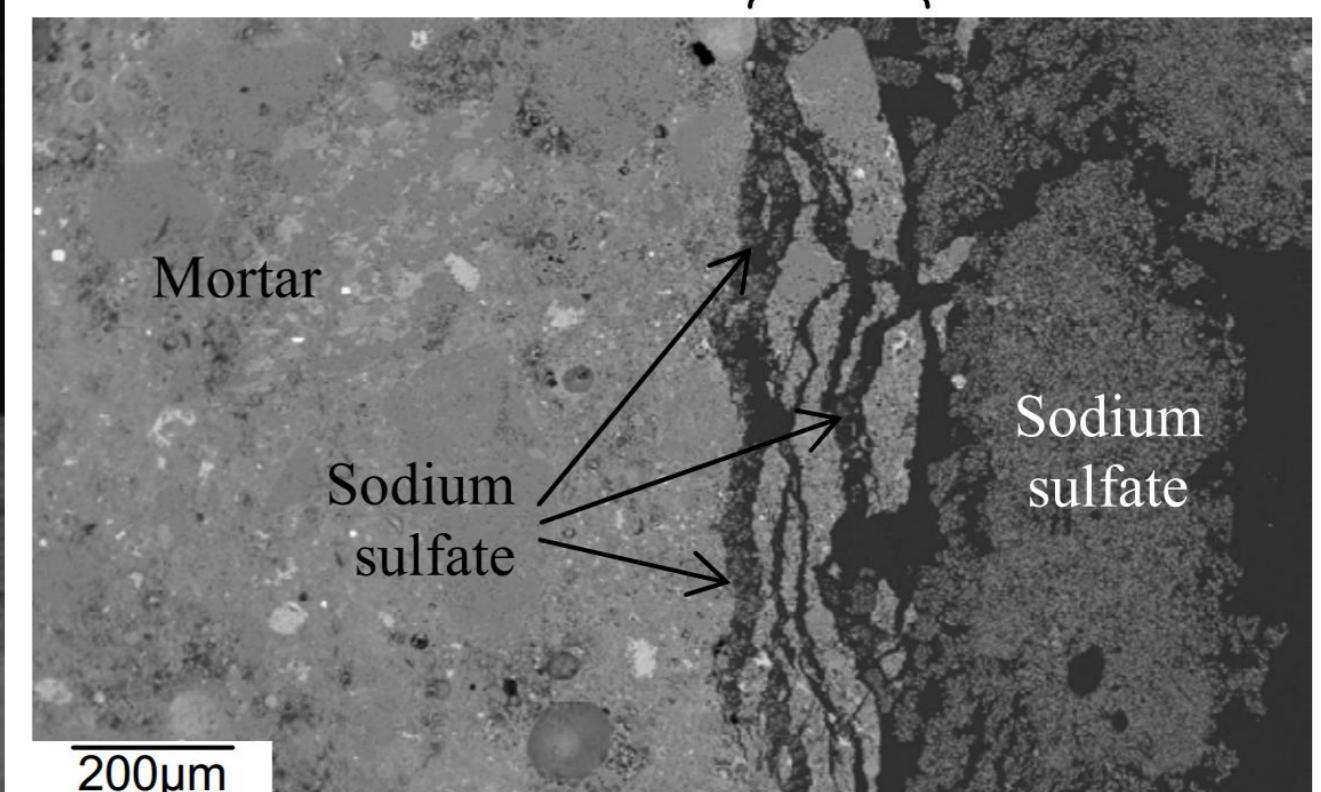
# Agentes de degradación

## Sulfate attack

Tipos de deterioro:

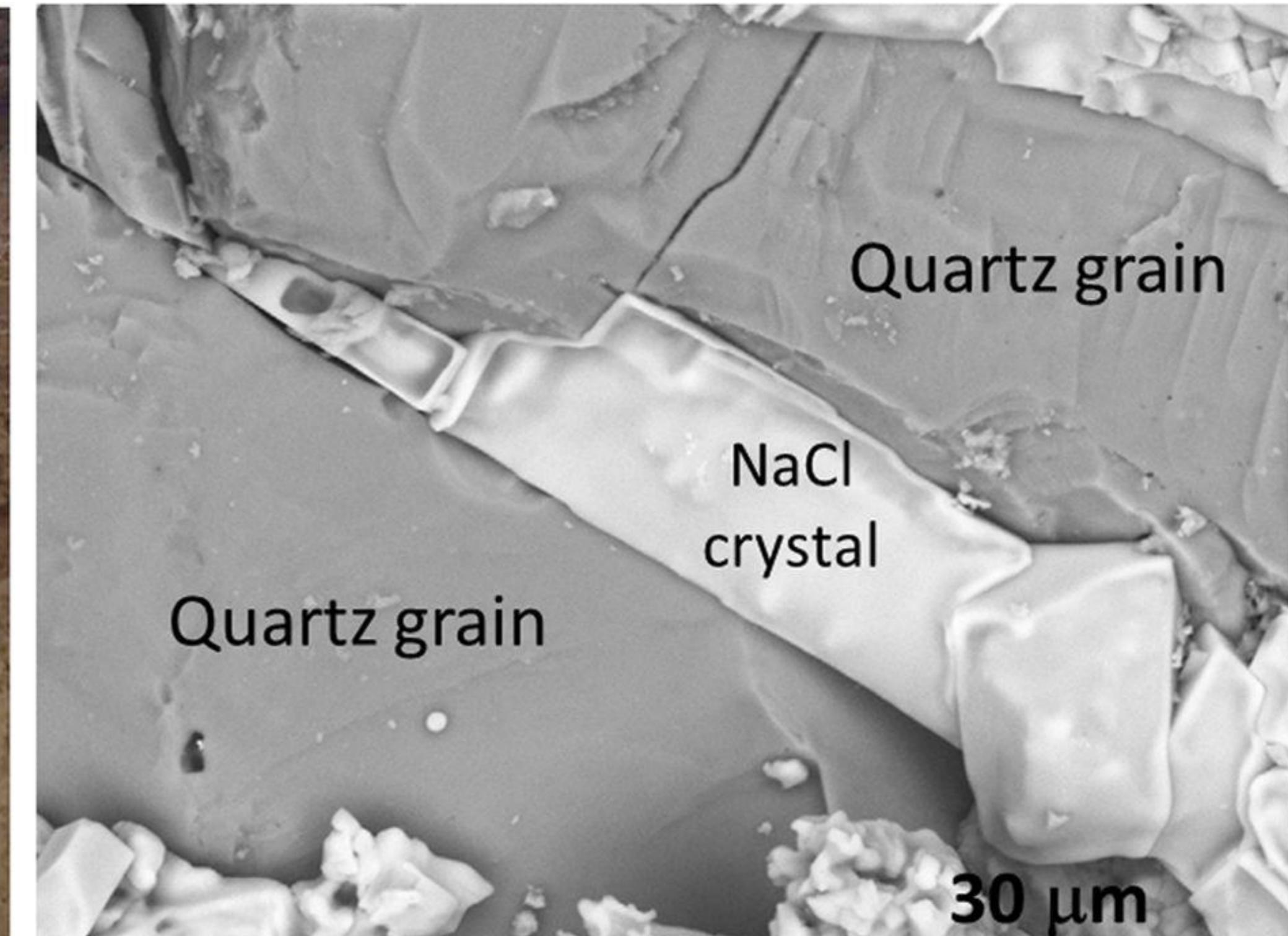
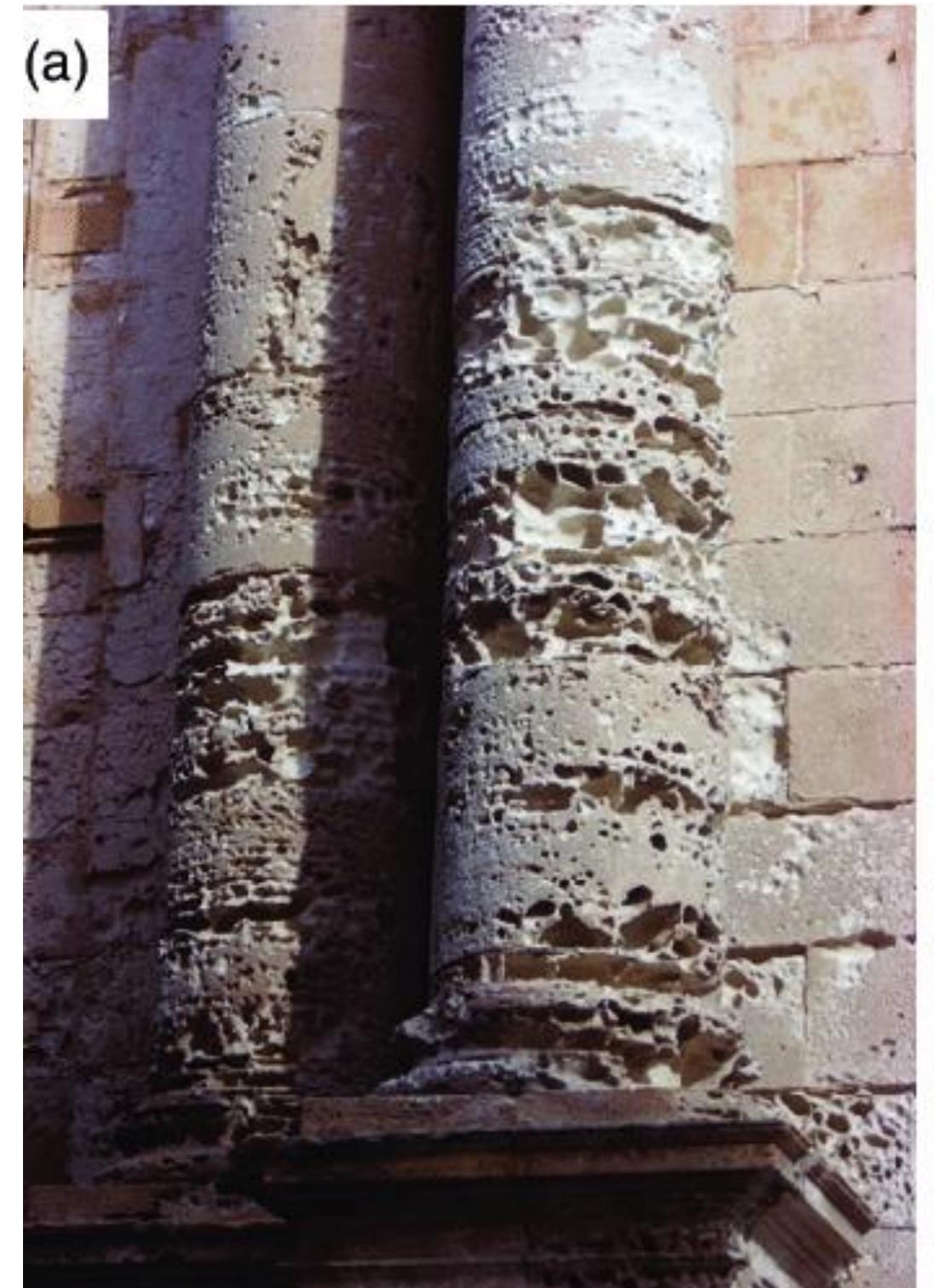
- **Ataque químico:** cuando las sales de sulfato destruyen el cemento pasando o crean nuevos compuestos que son expansivos y dañan el hormigón.
- **Ataque físico (sal):** cuando las sales se precipitan en la superficie del hormigón y provocan incrustaciones.

La presencia de sulfatos solubles (principalmente los de sodio, calcio y magnesio) es común en áreas de operaciones mineras, industrias químicas y papeleras. Los suelos o aguas que contienen estos sulfatos a menudo se denominan suelos o aguas "alcalinos".



Yoshida, N., Matsunami, Y., Nagayama, M., & Sakai, E. (2010). Salt weathering in residential concrete foundations exposed to sulfate-bearing ground. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 8(2), 121-134.

# Agentes de degradación



Sierra-Fernandez, A., Gomez-Villalba, L. S., Rabanal, M. E., & Fort, R. (2017). New nanomaterials for applications in conservation and restoration of stony materials: A review. *Materiales de Construcción*, 67(325), 107.

Desarnaud, J., Bonn, D., & Shahidzadeh, N. (2016). The pressure induced by salt crystallization in confinement. *Scientific reports*, 6, 30856.

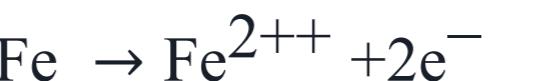


UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

# Agentes de degradación

## Corrosión

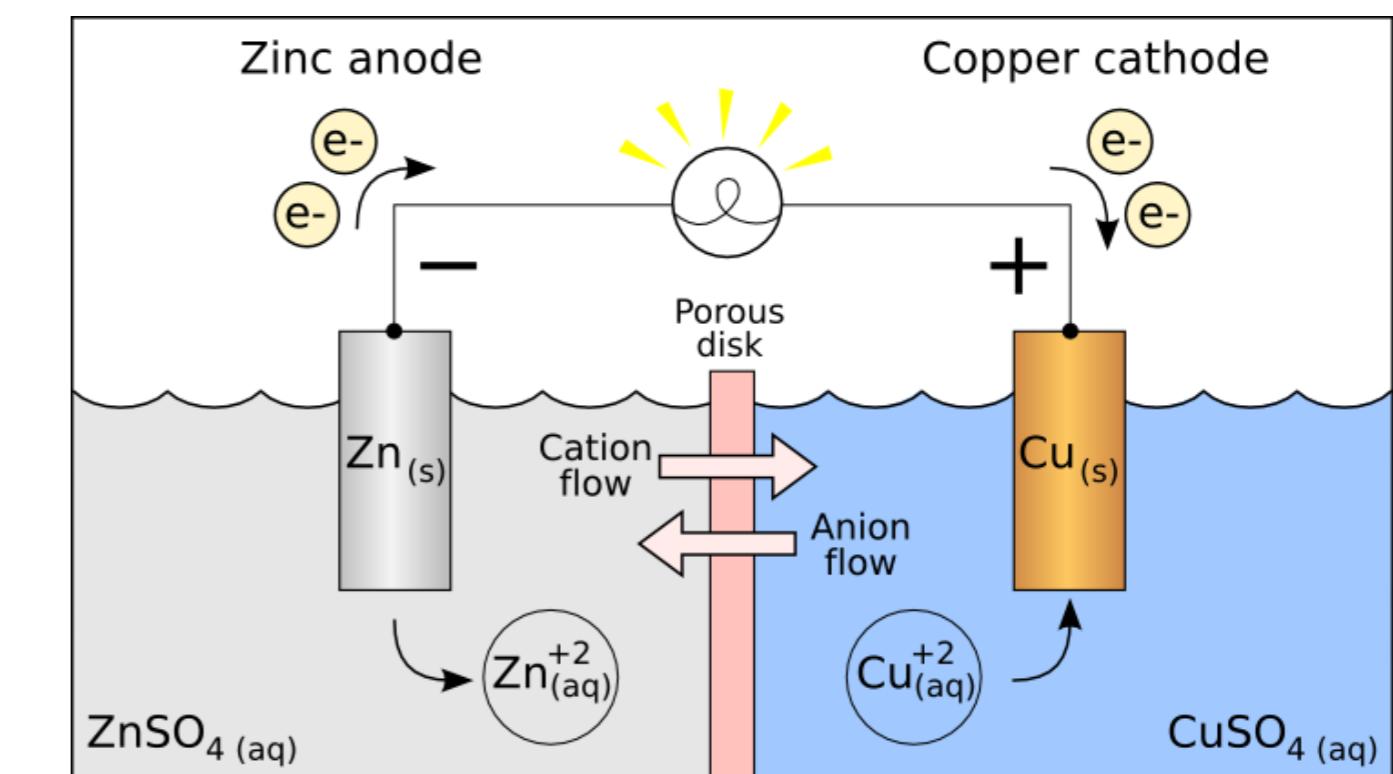
La corrosión es el proceso por el cual los metales pasan de su estado metálico en valencia “cero” a un estado oxidado liberando electrones:



Los electrones se transfieren a otras sustancias (oxígeno, carbonato, sulfato, etc) con el fin de convertirse en una sustancia neutra. Típicamente, estos mecanismos se produce a través de una solución acuosa (a temperaturas normales). La corrosión en presencia de agua líquida se produce por un **mecanismo electroquímico**. Las reacciones químicas y procesos redox ocurren simultáneamente. Por lo tanto, las zonas metálicas con diferente potencial eléctrico debido a que el metal que está en contacto con un electrolito heterogénea (en concentración) o debido a heterogeneidades en el propio metal son la fuerza motriz de las reacciones químicas involucradas en el intercambio de electrones. El proceso se produce como en una batería, donde la oxidación del metal tiene lugar en la zona anódica y una reducción tiene lugar en la zona catódica. Para el caso de electrolitos neutros y alcalinos, la reacción catódica más común es:



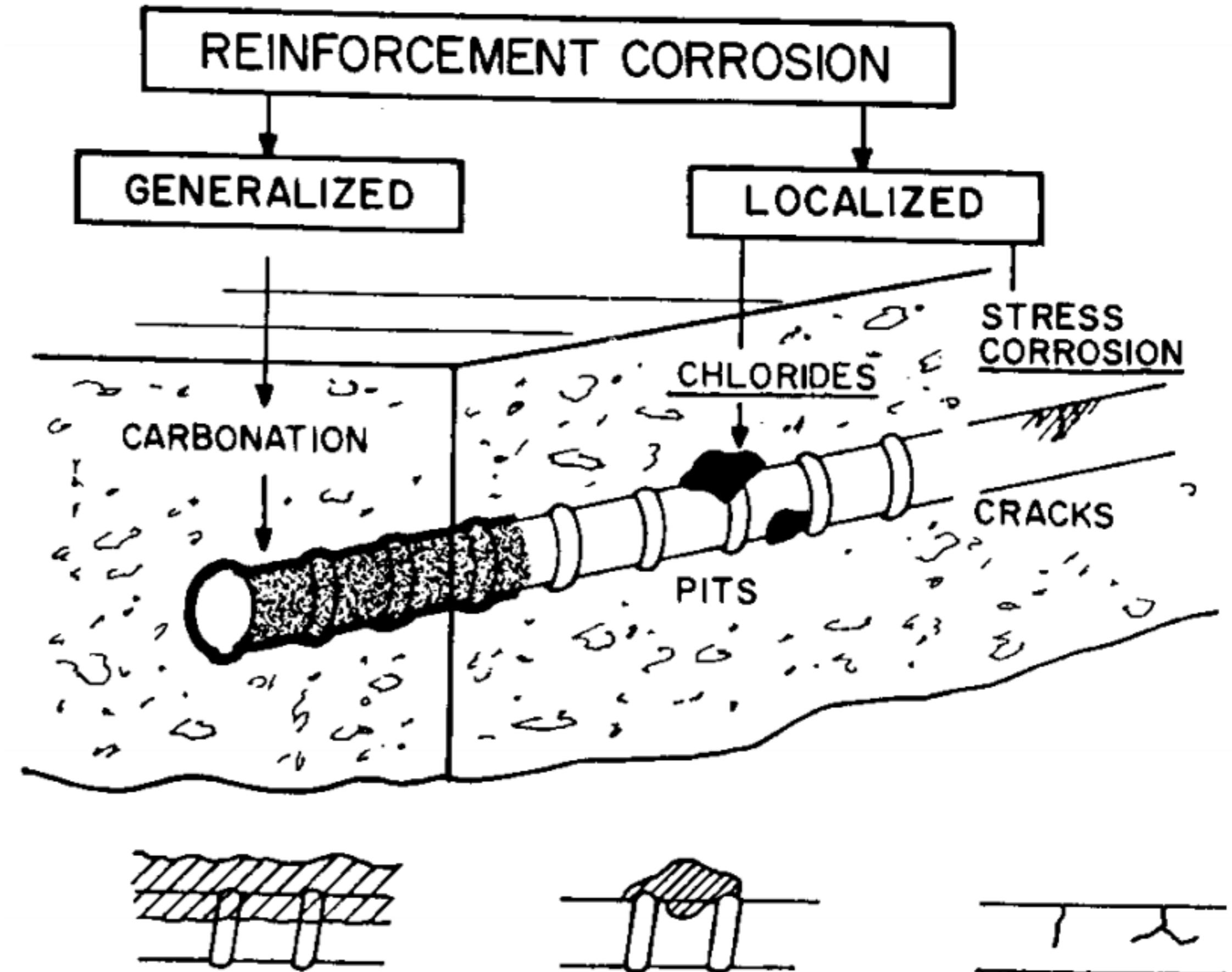
Por lo tanto, los electrones liberados en el ánodo circular a través del metal a las zonas catódicas en donde se consumen inducir la reducción de una sustancia (por ejemplo, oxígeno en la segunda reacción). El producto de corrosión final sería  $\text{Fe(OH)}_2$ ,  $\text{Fe(OH)}_3$  or algunos oxihidróxidos derivados de ellos.



## Agentes de degradación

Las dos causas principales de la corrosión son la **carbonatación** y la presencia de **cloruros**.

La **carbonatación** generalmente induce una corrosión generalizada mientras que los **cloruros** inducen "pitting corrosion" o una corrosión localizada y acelerada. Un estado avanzado de corrosión se puede reconocer por la presencia de óxido en las barras de refuerzo así como la aparición de grietas paralelas a éstas.

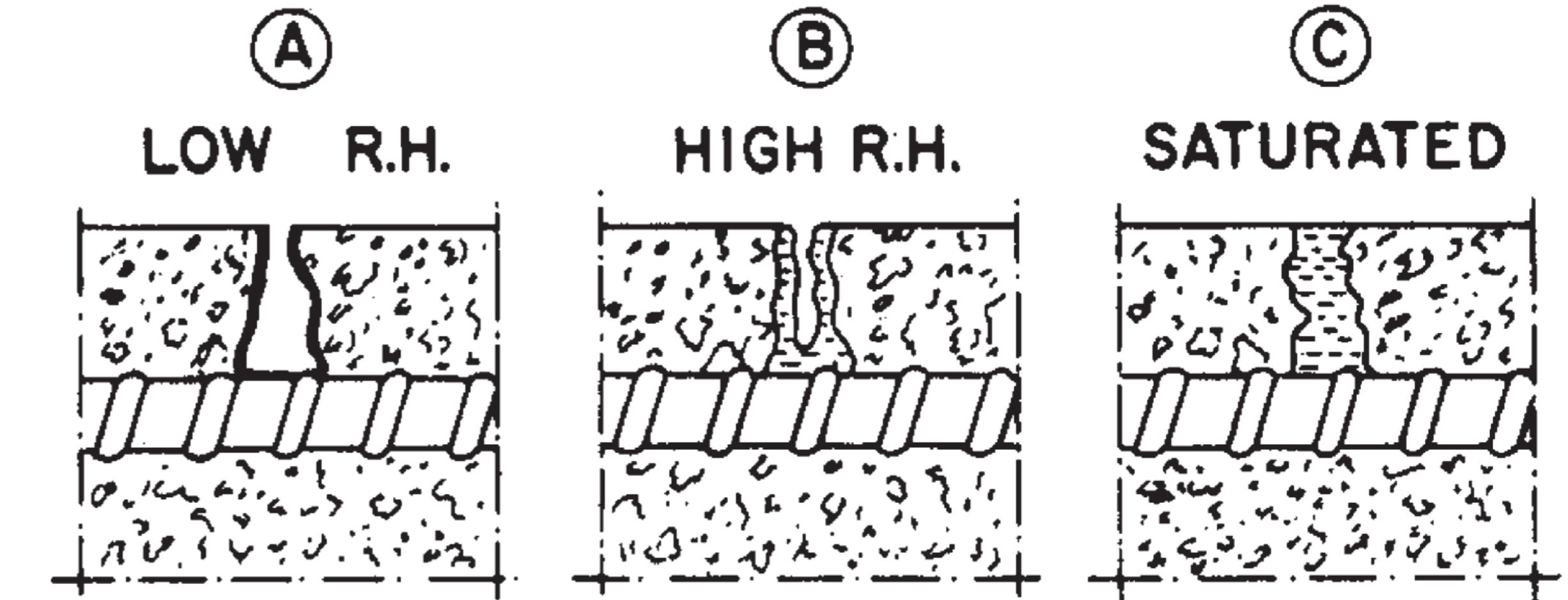


## Carbonation

El carbono conduce a una disminución del valor de pH de la solución de poros de  $\text{pH} > 13$  a  $\text{pH} < 8$ . Con este valor de pH, la capa pasiva de acero desaparece y comienza una corrosión general y uniforme. El CO<sub>2</sub>, al ser un gas, penetra a través de la red de poros del hormigón. Si los poros están llenos de agua, el gas se disuelve en el agua líquida y la penetración es muy lenta. Si los poros no están saturados de agua (RH 50-70%), entonces el CO<sub>2</sub> puede penetrar fácilmente por difusión y alcanzar las partes internas de la cubierta de hormigón.

Para reducir la carbonatación, es importante:

- Usar bajas relaciones w/c
- Buena compactación
- Buen curado



Simplified representation of the degree of saturation of concrete pores (RH, relative humidity). (A) CO<sub>2</sub> can easily penetrate, but the lack of moisture avoids carbonation. (B) Optimum moisture content for carbonation. (c) CO<sub>2</sub> penetrates very slowly when dissolving in water.



# Agentes de degradación

## Chlorides attack

Los iones de cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) destruyen la capa pasiva protectora de la superficie de las barras de refuerzo, aumentando su susceptibilidad a la corrosión. Los cloruros pueden aparecer en el propio hormigón durante su puesta en obra debido a:

- Uso de agua marina en la mezcla.
- Procedente de los agregados del hormigón.

Los cloruros pueden también entrar en el hormigón desde el ambiente externo debido a:

- Exposición a ambientes marinos.
- Empleo de sales para derretir el hielo.
- Suelos.

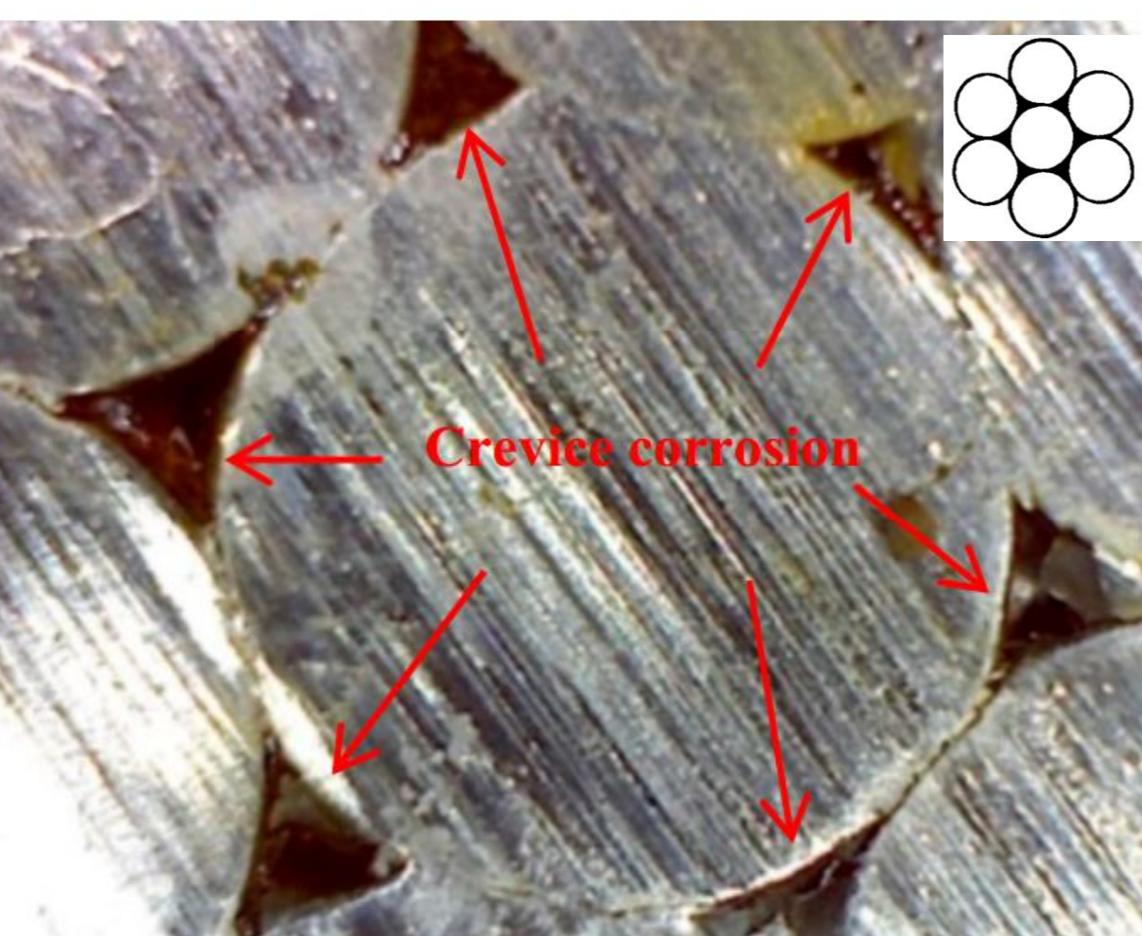
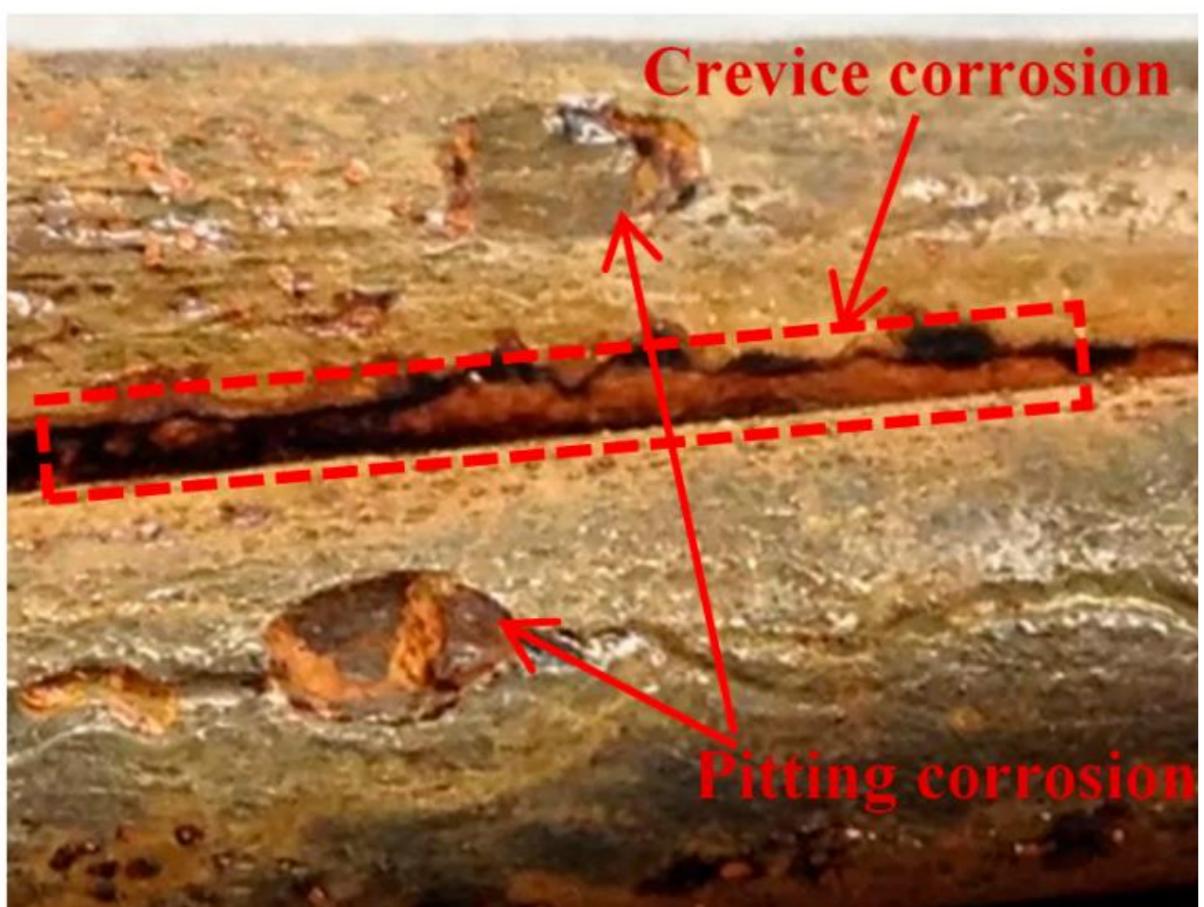


# Agentes de degradación

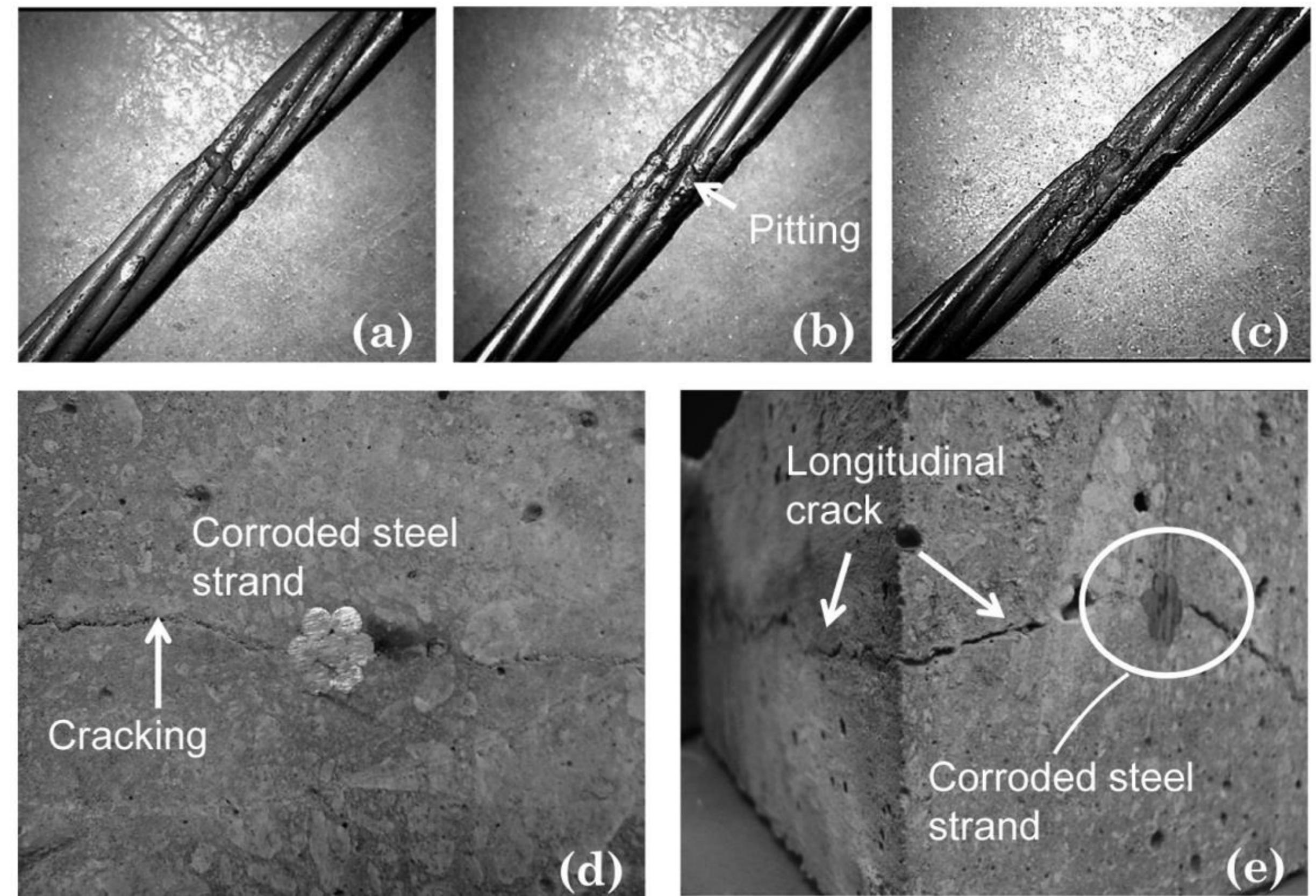
## Strand corrosion

La localización de rotura de tendones de refuerzo puede resultar difícil si éstos no salen de la estructura. El agrietamiento longitudinal puede ser una indicación de fallo en los tendones.

Wang, L., Dai, L., Zhang, X., & Zhang, J. (2017). Concrete cracking prediction including the filling proportion of strand corrosion products. *Materials*, 10(1), 6.



Mangual, J., ElBatanouny, M. K., Ziehl, P., & Matta, F. (2013). Acoustic-Emission-Based Characterization of Corrosion Damage in Cracked Concrete with Prestressing Strand. *ACI Materials Journal*, 110(1).



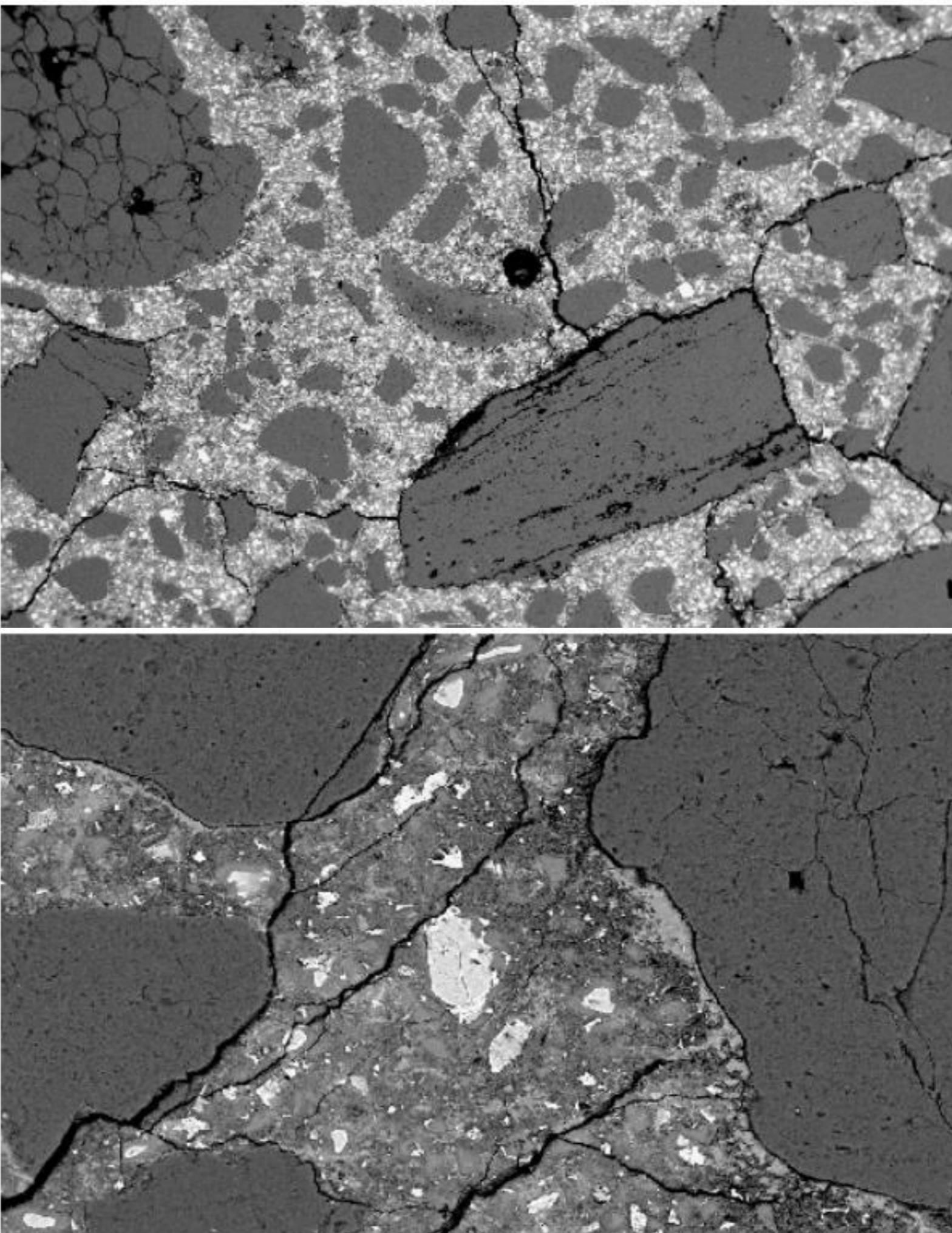
# Agentes de degradación

## Freezing and thawing

La desintegración o deterioro por ciclos repetidos de congelación-deshielo se produce cuando se dan las siguientes condiciones:

- Ciclos de temperatura de congelación y descongelación dentro del hormigón.
- Hormigón poroso que absorbe agua.

El deterioro por congelación-descongelación generalmente ocurre en superficies horizontales que están expuestas al agua, o en superficies verticales que están en la línea de flotación en porciones sumergidas de estructuras. El agua helada contenida en la estructura de los poros se expande a medida que se convierte en hielo. La expansión provoca fuerzas de tensión localizadas que fracturan la matriz de hormigón circundante.



# Agentes de degradación

Causes	Symptoms							
	Construction Faults	Cracking	Disintegration	Distortion/Movement	Erosion	Joint Failures	Seepage	Spalling
Accidental Loadings		X						X
Chemical Reactions		X	X				X	
Construction Errors	X	X				X	X	X
Corrosion		X				X	X	X
Design Errors		X						X
Erosion			X		X			
Freezing and Thawing		X	X					X
Settlement and Movement		X		X			X	X
Shrinkage	X	X		X				
Temperature Changes		X				X		X

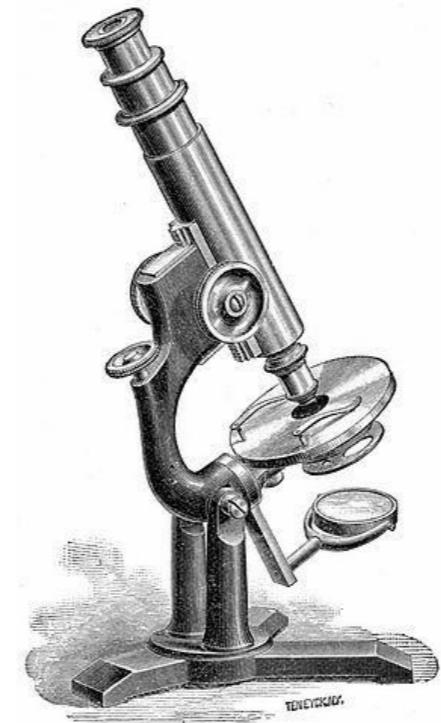
Courtesy of United States Army Corps of Engineers



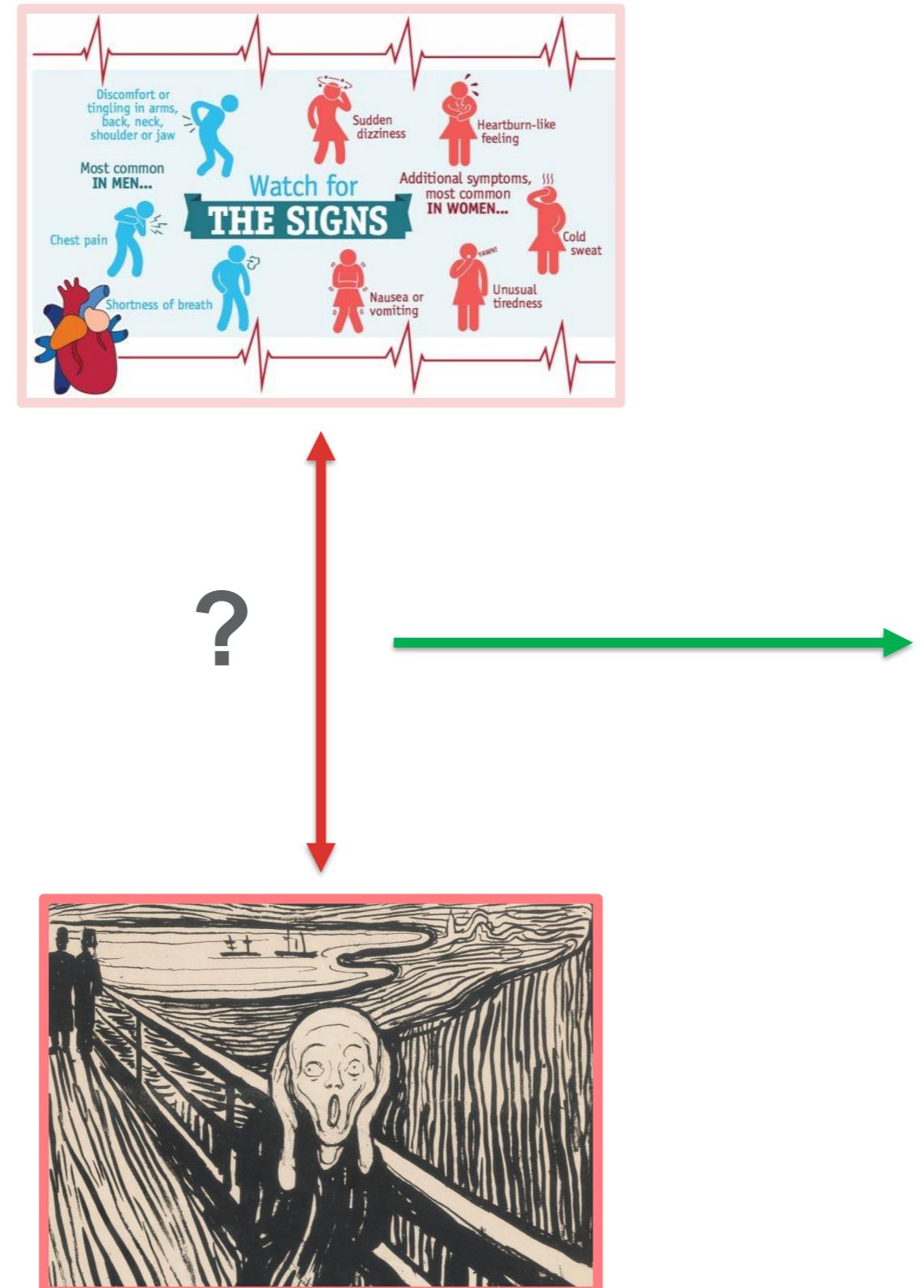


UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

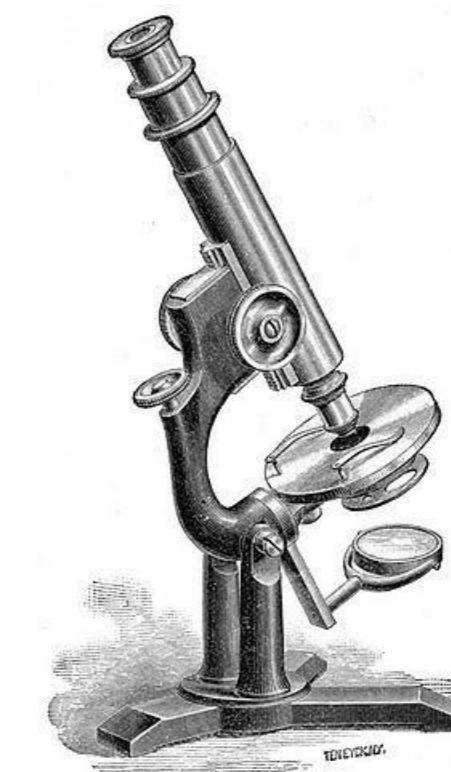
# Tecnologías de monitorización.



# Tecnologías de monitorización



Testing and inspection  
techniques



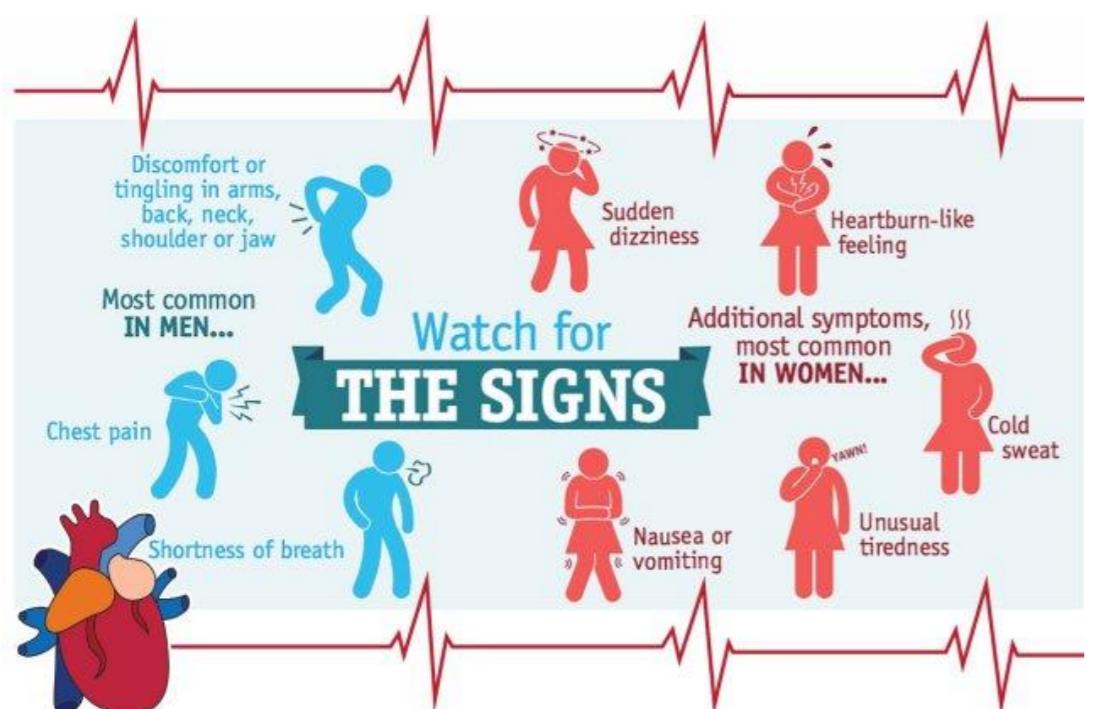
# Tecnologías de monitorización

Clasificación de técnicas de ensayo e inspección en estructuras de hormigón:

1. Integridad estructural.
2. Calidad y composición del hormigón.
3. Capacidad de servicio y condición del acero de pretensado o de refuerzo.

1. In situ.
2. Análisis de laboratorio.

1. Destructivo.
2. No-Destructivo.



## IN-SITU SAMPLING AND TESTING

- ❖ Visual surveys
- ❖ Tapping surveys
- ❖ Covermeter surveys
- ❖ Thermography
- ❖ Acoustic emission
- ❖ Dynamic testing
- ❖ Ground Penetrating Radar
- ❖ Flat jacks
- ❖ Digital Image Correlation
- ❖ Interferometric radar
- ❖ Load testing

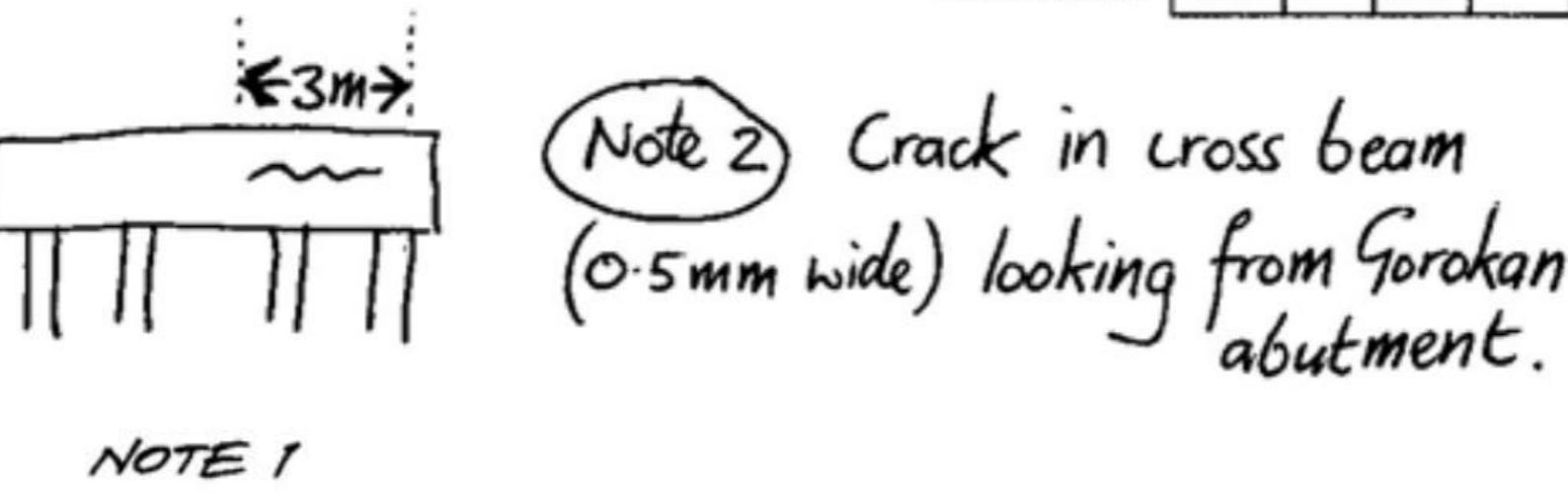


# Visual surveys

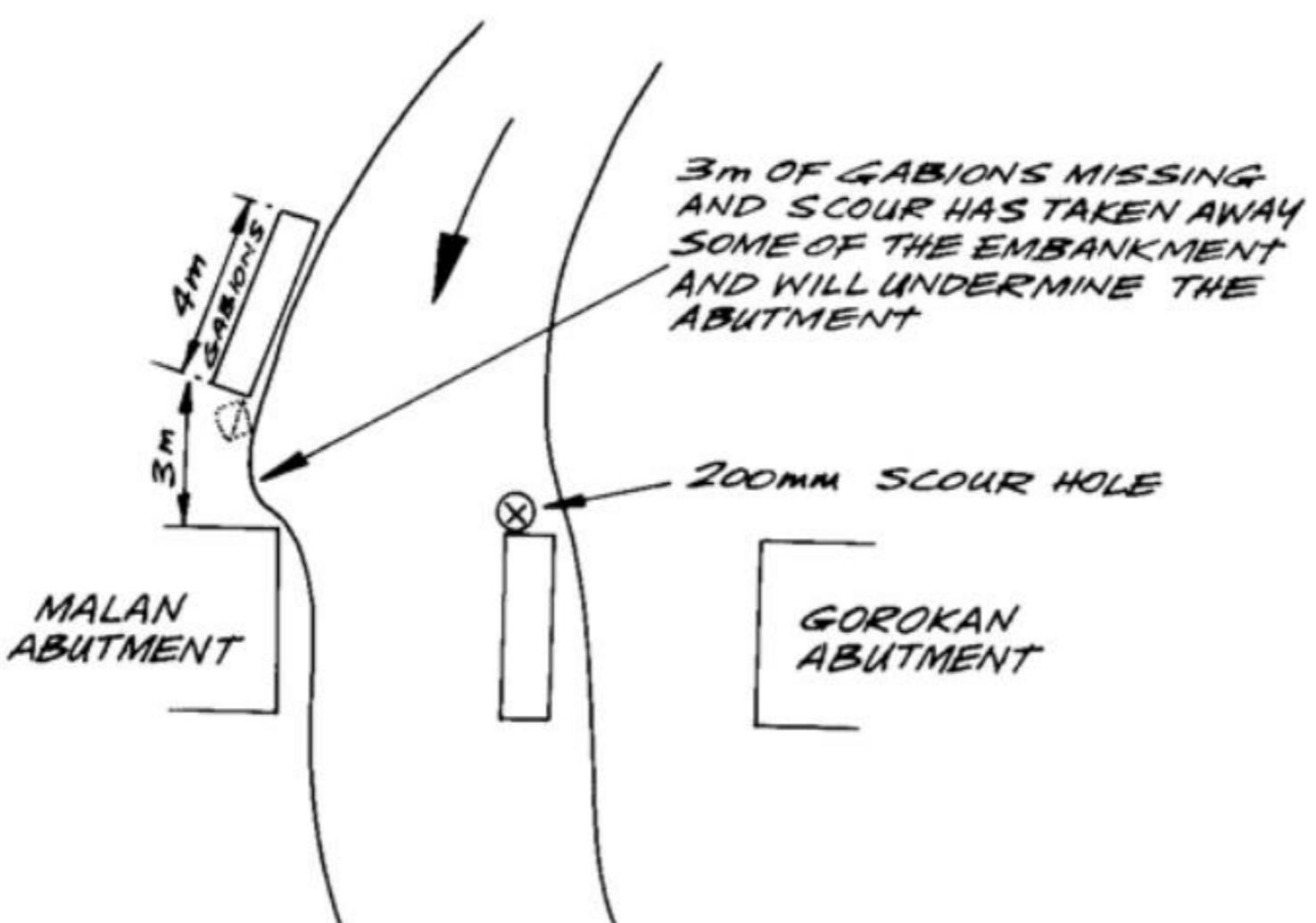
Handbook page (2)	ROAD APPROACHES AND DECK	POSSIBLE PROBLEM	Problem					How bad ?	How much ?	Note or sketch reference	
			No	Yes	Not very bad	Bad	Very serious				
15	ROAD SURFACE NEAR BRIDGE										
	Bumpy road surface ?	<input checked="" type="checkbox"/>					All checked Yes <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>				
16	DRAINAGE										
	Badly built road drainage near bridge ?	<input checked="" type="checkbox"/>									
	Blocked or damaged road drains ?	<input checked="" type="checkbox"/>									
	Water on the deck ?	<input checked="" type="checkbox"/>									
	Blocked or damaged deck drains ?	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	2 drains unblocked while inspecting			
	All checked Yes <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>										
19	BITUMEN SURFACE		BRIDGE SURFACE AND FOOTPATHS								
	Surface breaking up or lifting off ?	<input type="checkbox"/>									
	Cracking above joints ?	<input type="checkbox"/>									
20	CONCRETE SURFACE										
	Cracking ?	<input checked="" type="checkbox"/>									
	Spalling ?	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>									
	Reinforcement exposed ?	<input checked="" type="checkbox"/>									
	Poor concrete ?	<input checked="" type="checkbox"/>									
	Wear of surface due to small stones ?	<input checked="" type="checkbox"/>									
22	STEEL SURFACE										
	Fixings loose or damaged ?	<input type="checkbox"/>									
	Bends in panels ?	<input type="checkbox"/>									
	Corrosion ?	<input type="checkbox"/>									
	All checked Yes <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>										

Bridge inspector's handbook. Transport Research Laboratory (UK).

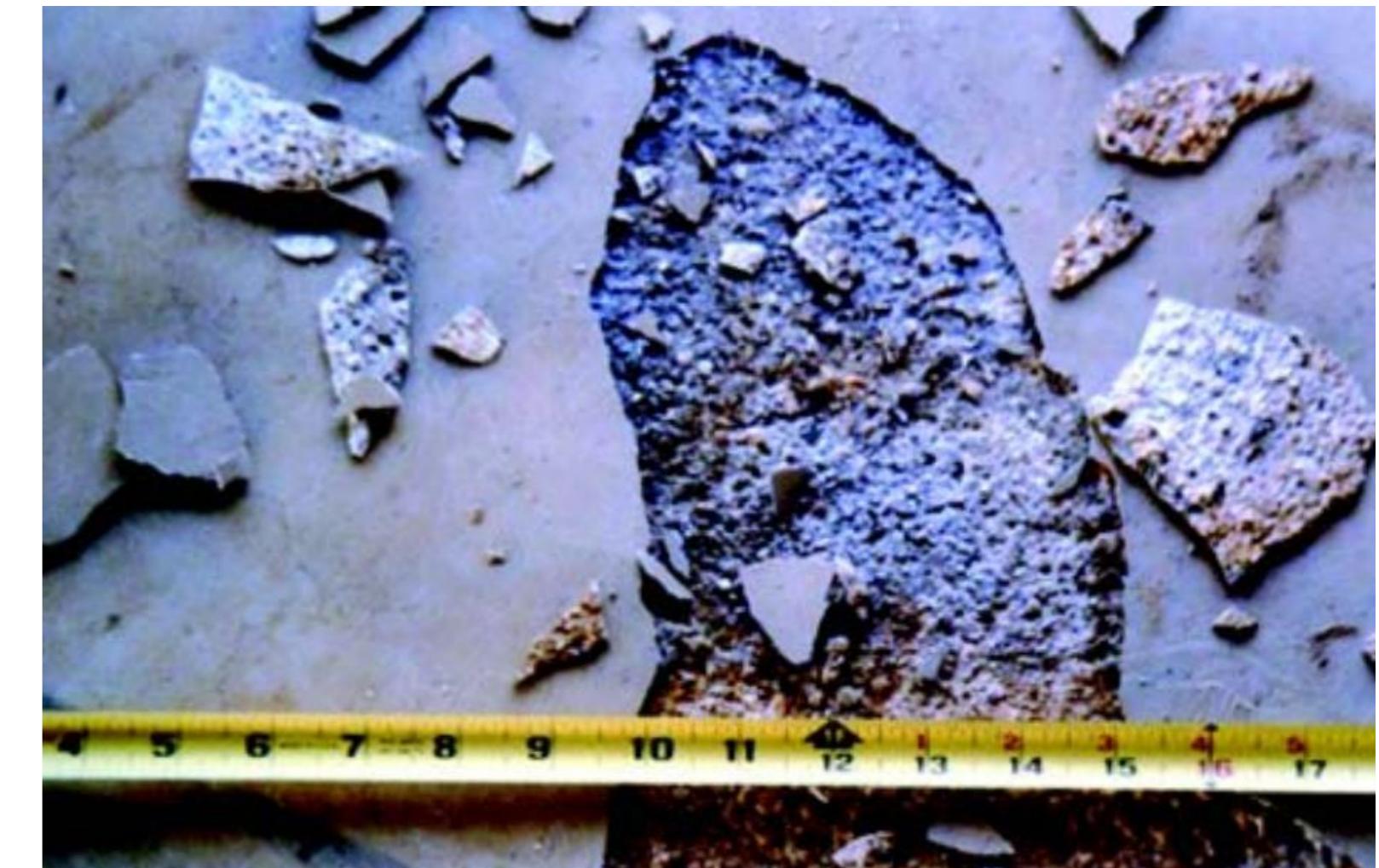
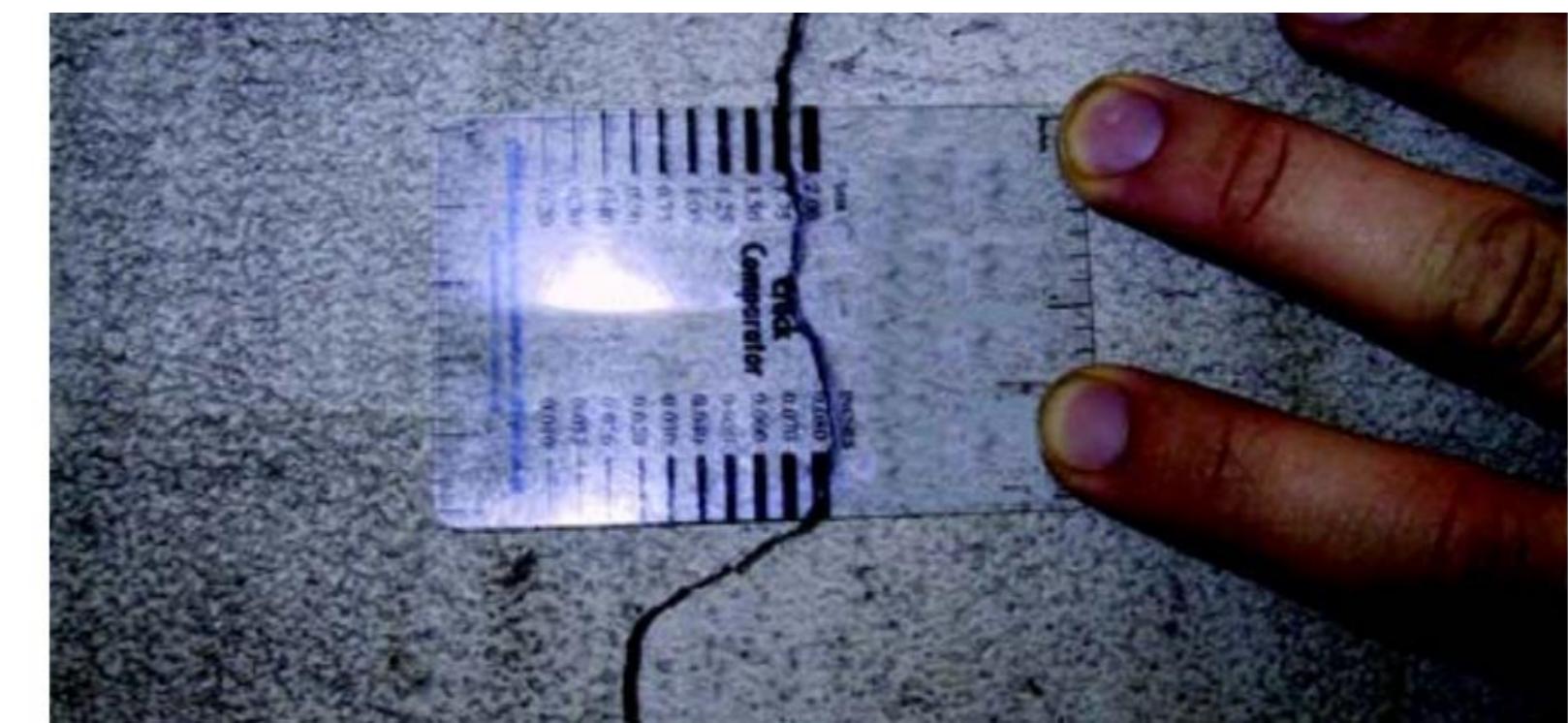
Split timbers ?						
Loose or corroded bolts or pins ?						
63 MASONRY JACK ARCH DECKS						
Change of shape of arch ?						
Cracking or spalling ?						
Poor pointing ?						
All checked Yes <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>						



NOTE 1



Guide for making a condition survey of concrete in service. American Concrete Institute

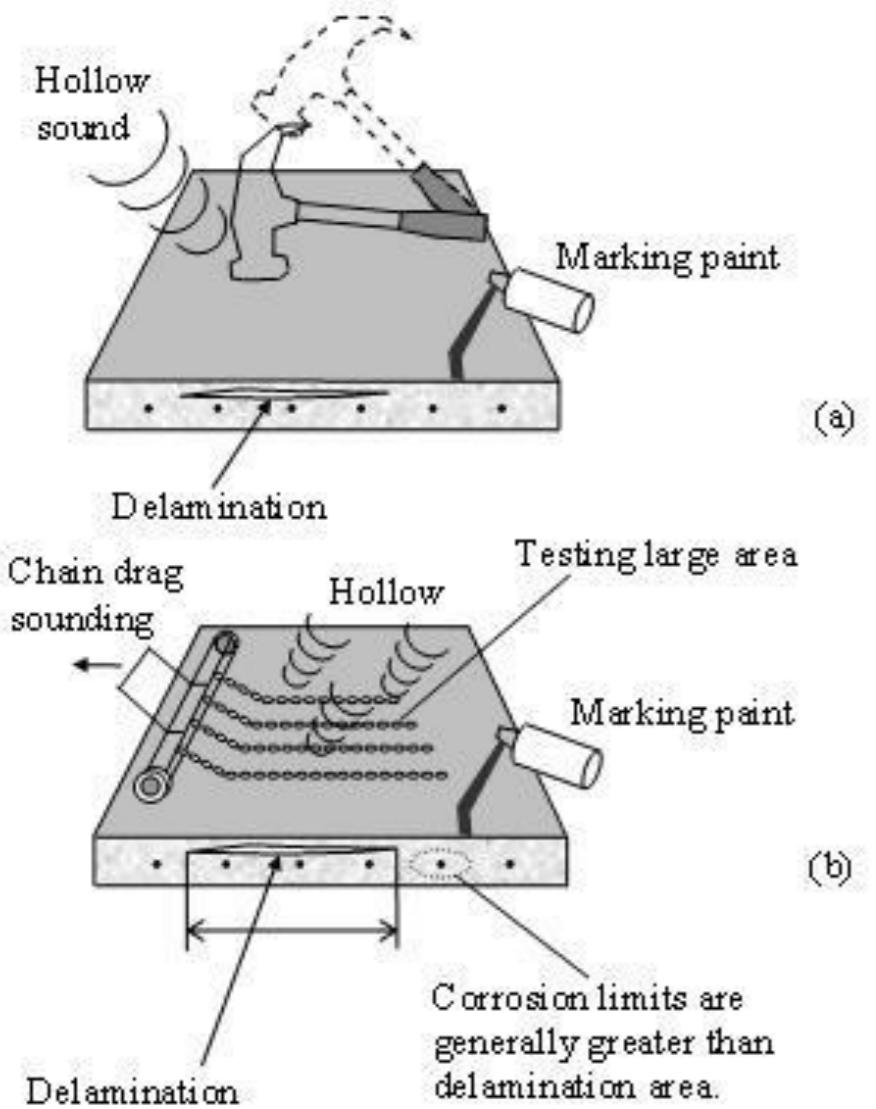


UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

# Tapping surveys



[https://www.youtube.com/watch?v=\\_n2z](https://www.youtube.com/watch?v=_n2z)



Chain drag  
Sounding rod



Sounding  
hammer



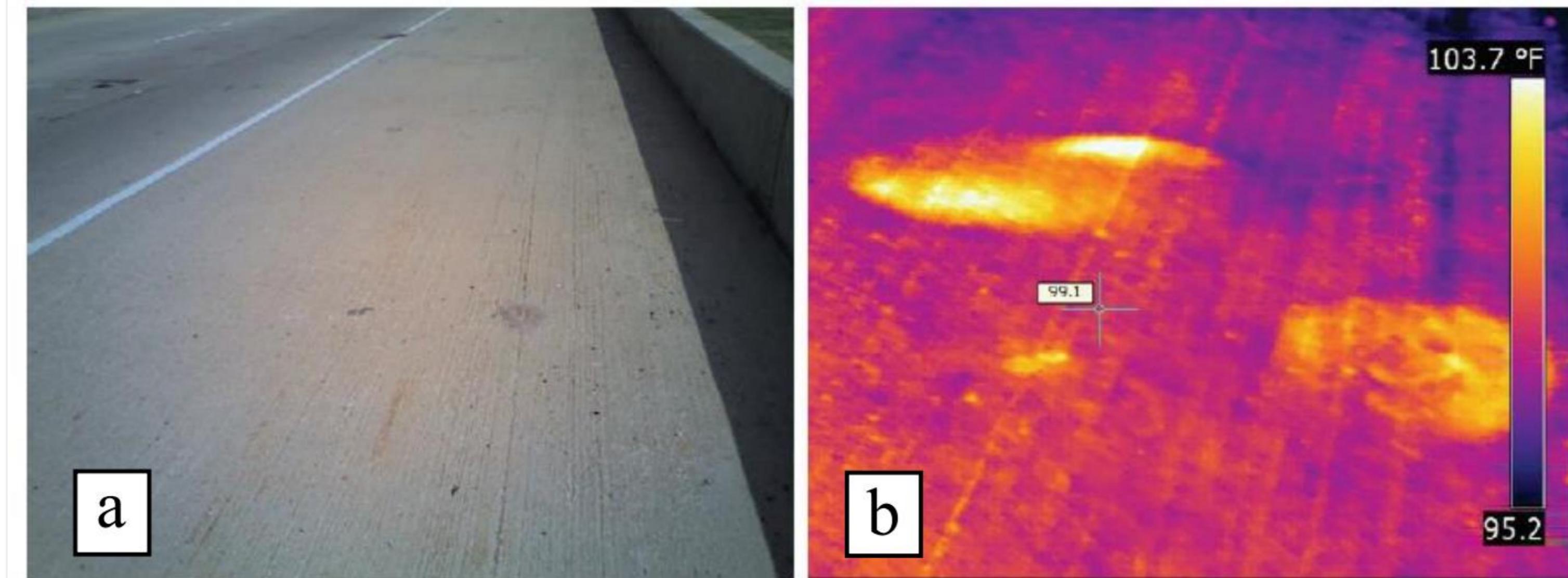
<https://www.youtube.com/watch?v=eQAg9AkQ0qw&t=164s>



## Covermeter surveys

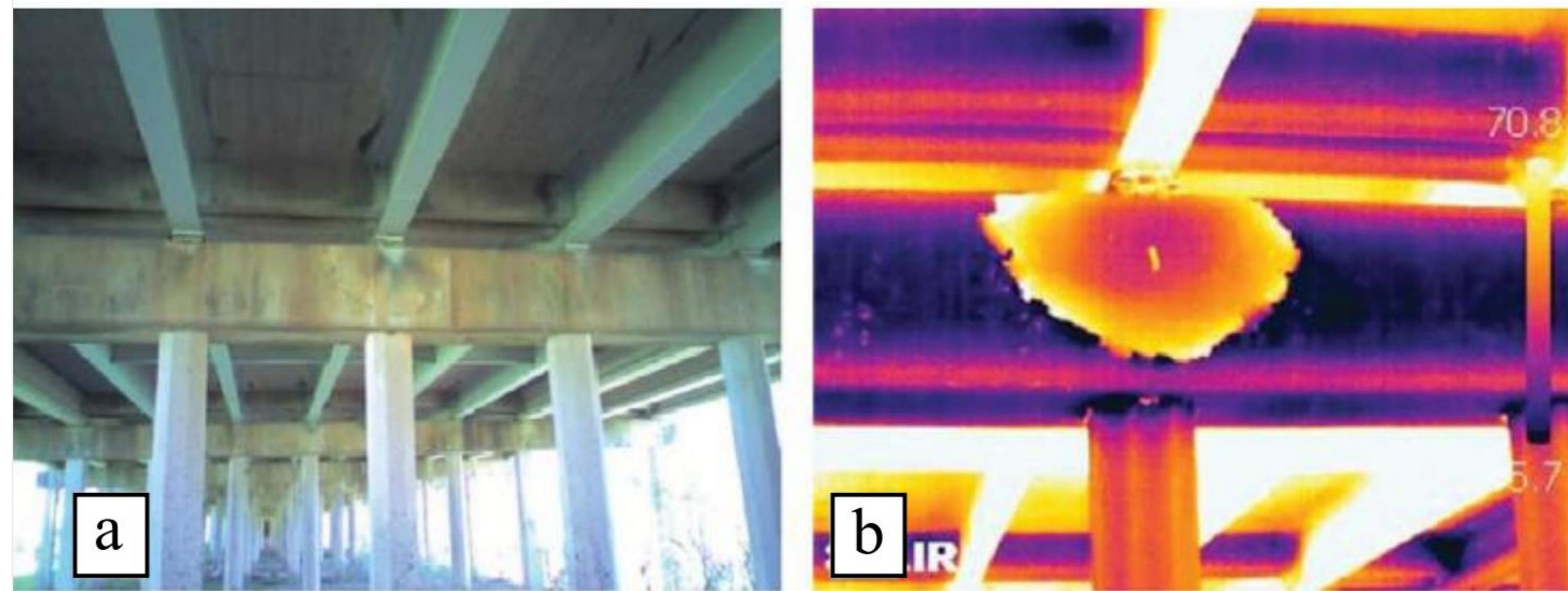


# Thermography



Detection of delaminations: a) Digital photography and b) Thermogram

Washer, G., Fenwick, R., Bolleni, N. (2009), "Development of Hand-held Thermographic Inspection Technologies" (Jefferson City, United States: MODOT), p. 120



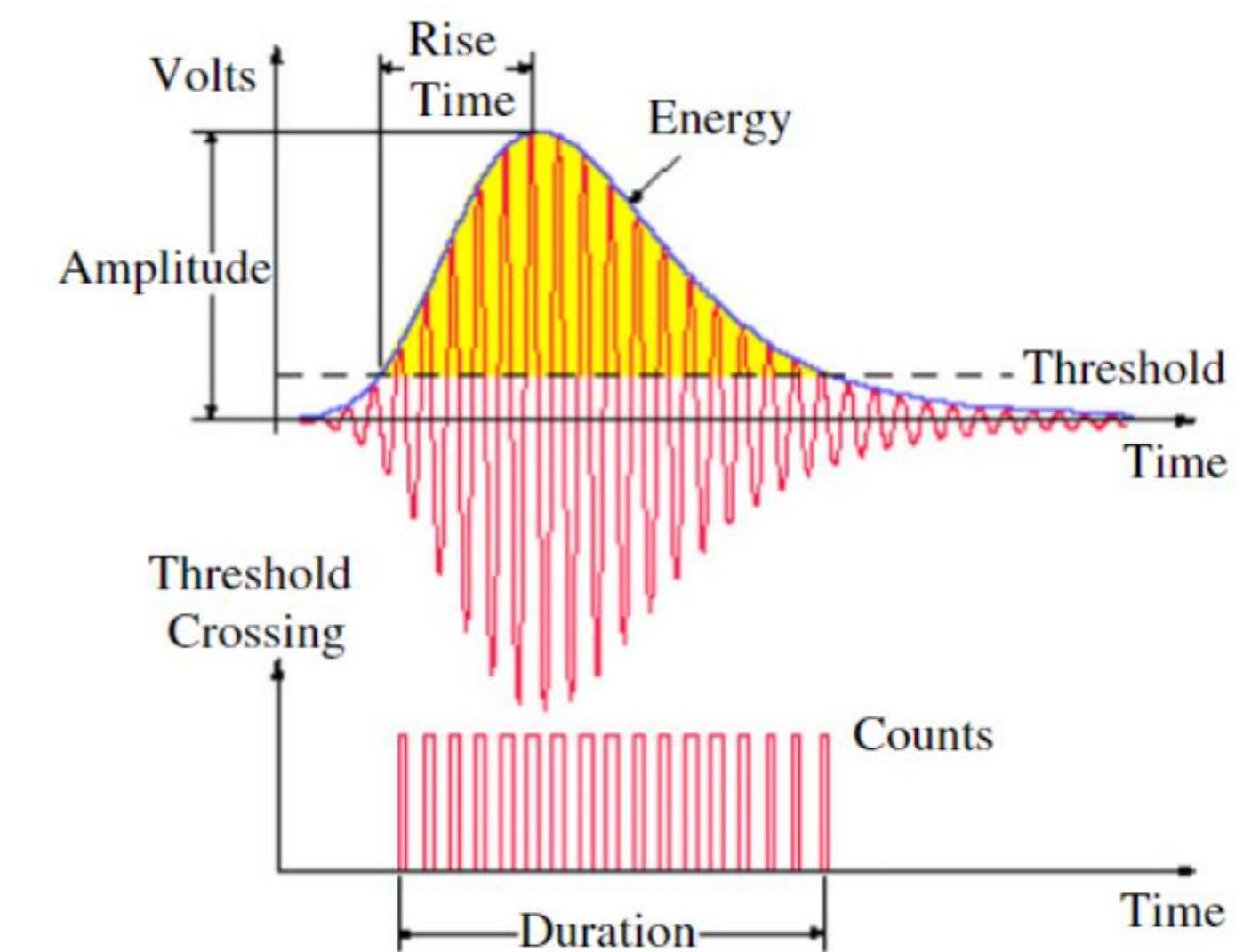
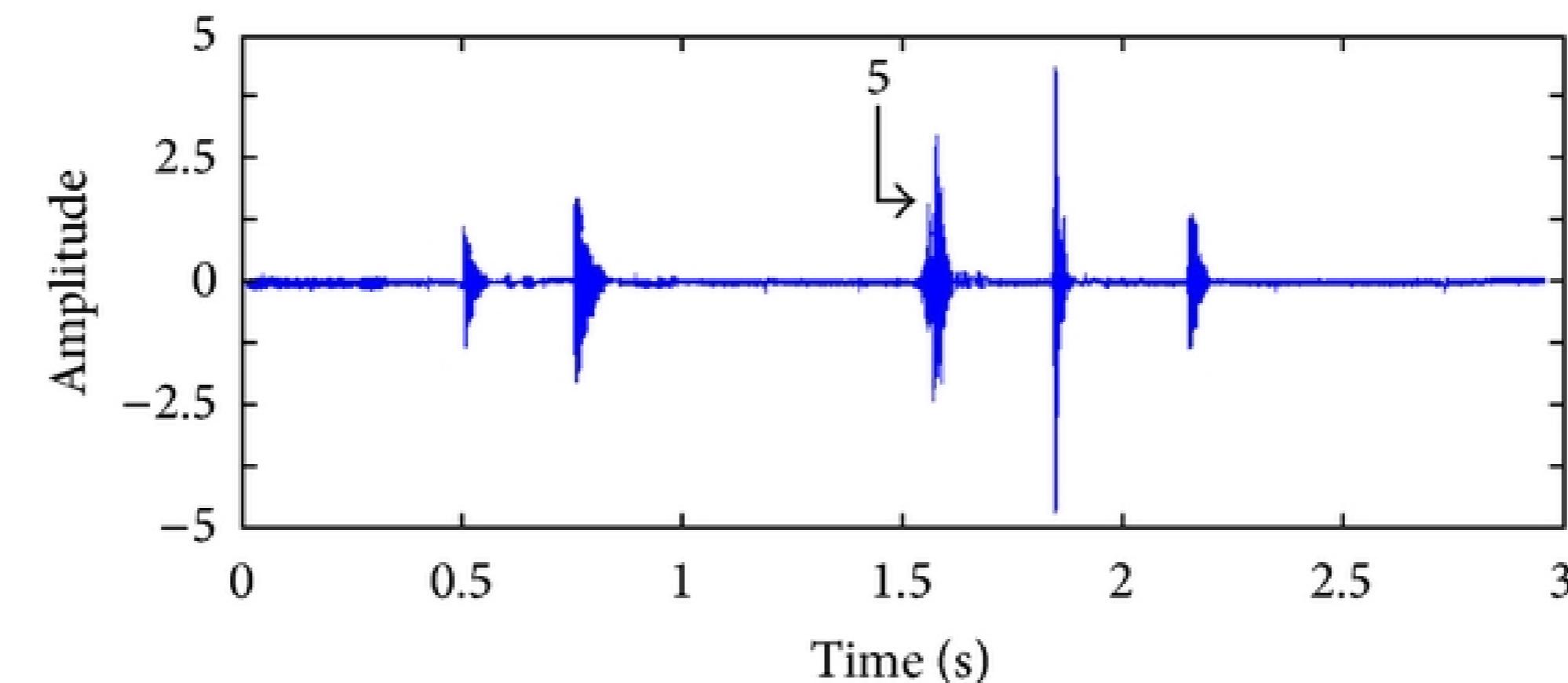
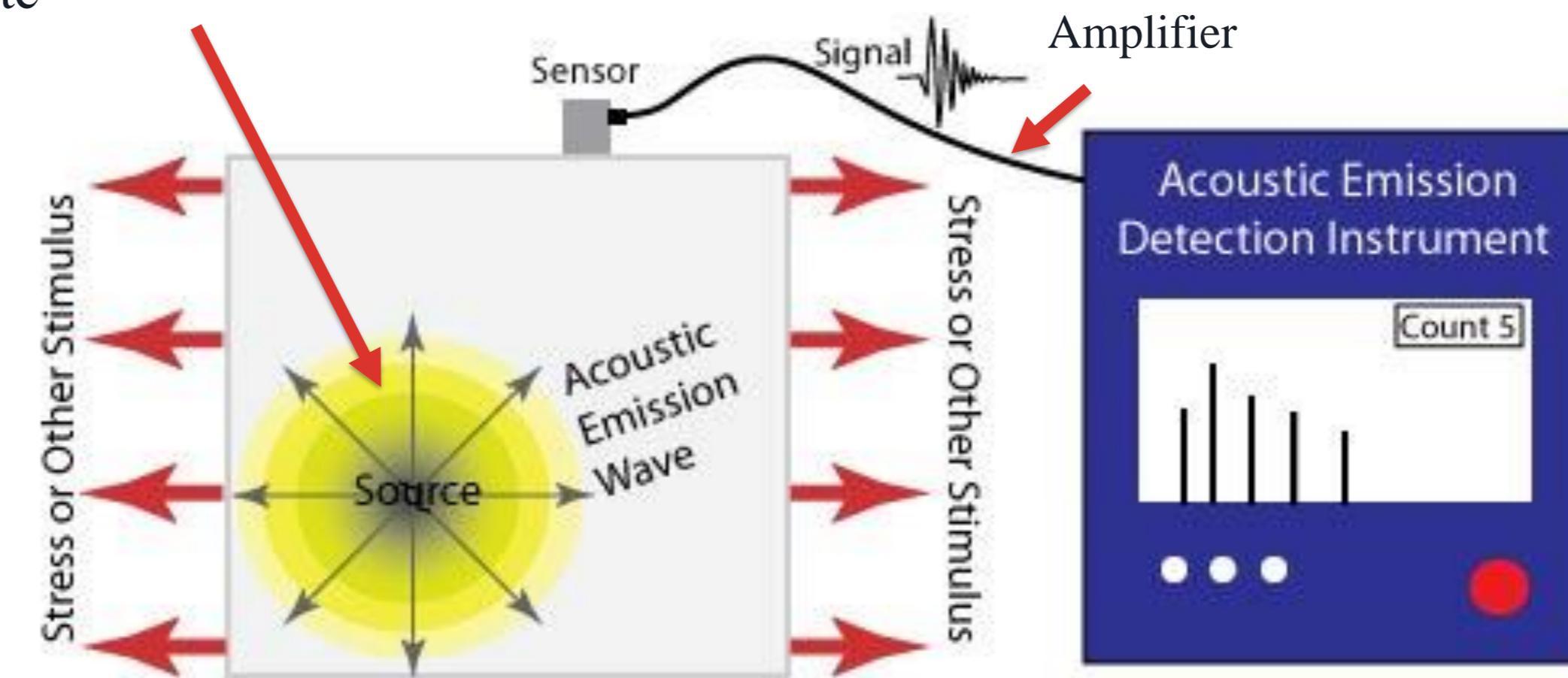
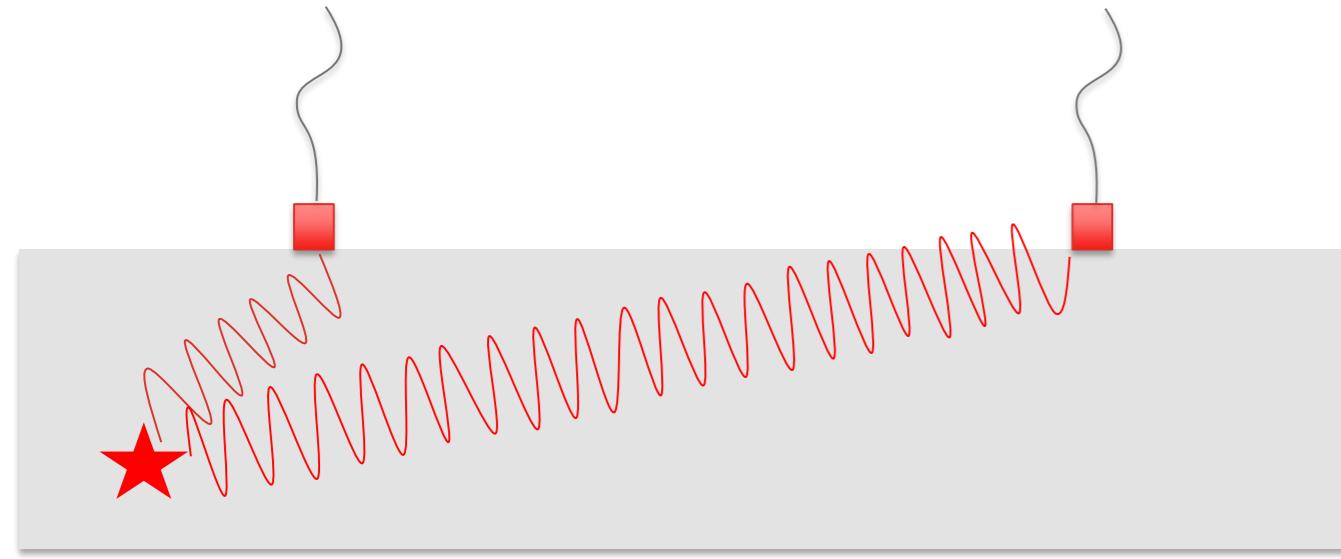
Application in bridge infrastructure: a) Digital photography and b) Thermogram

Washer, G. (2012), "Advances in the use of thermographic imaging for the condition assessment of bridges. Bridge Structures", V.8, No. 2, pp. 81-90



# Acoustic Emission

- Cracks growing
- Fibers breaking
- ...etc

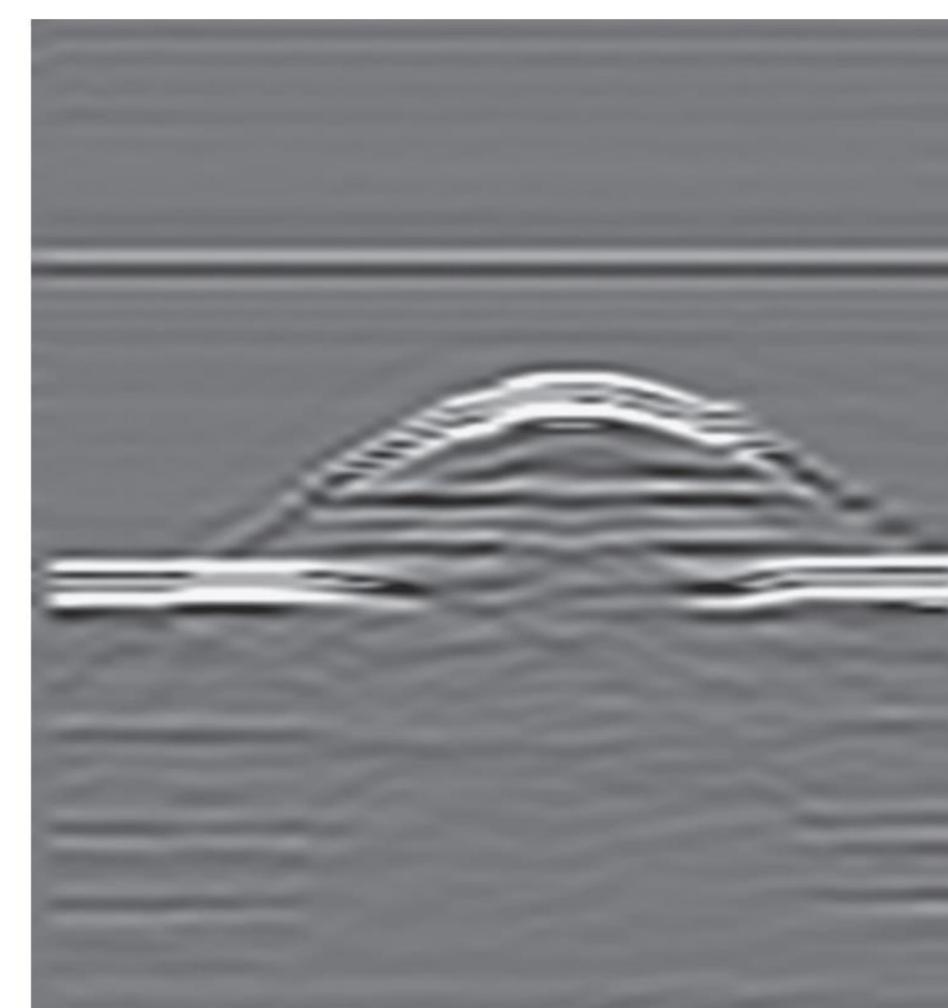
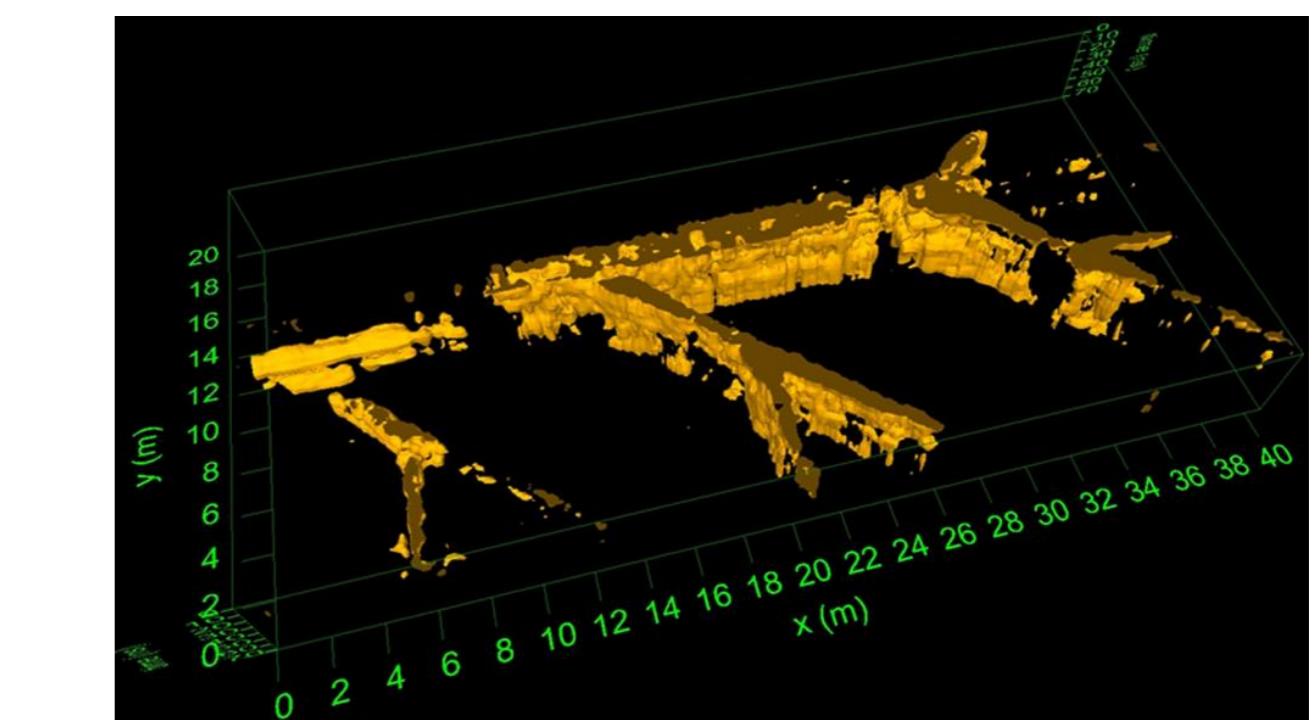
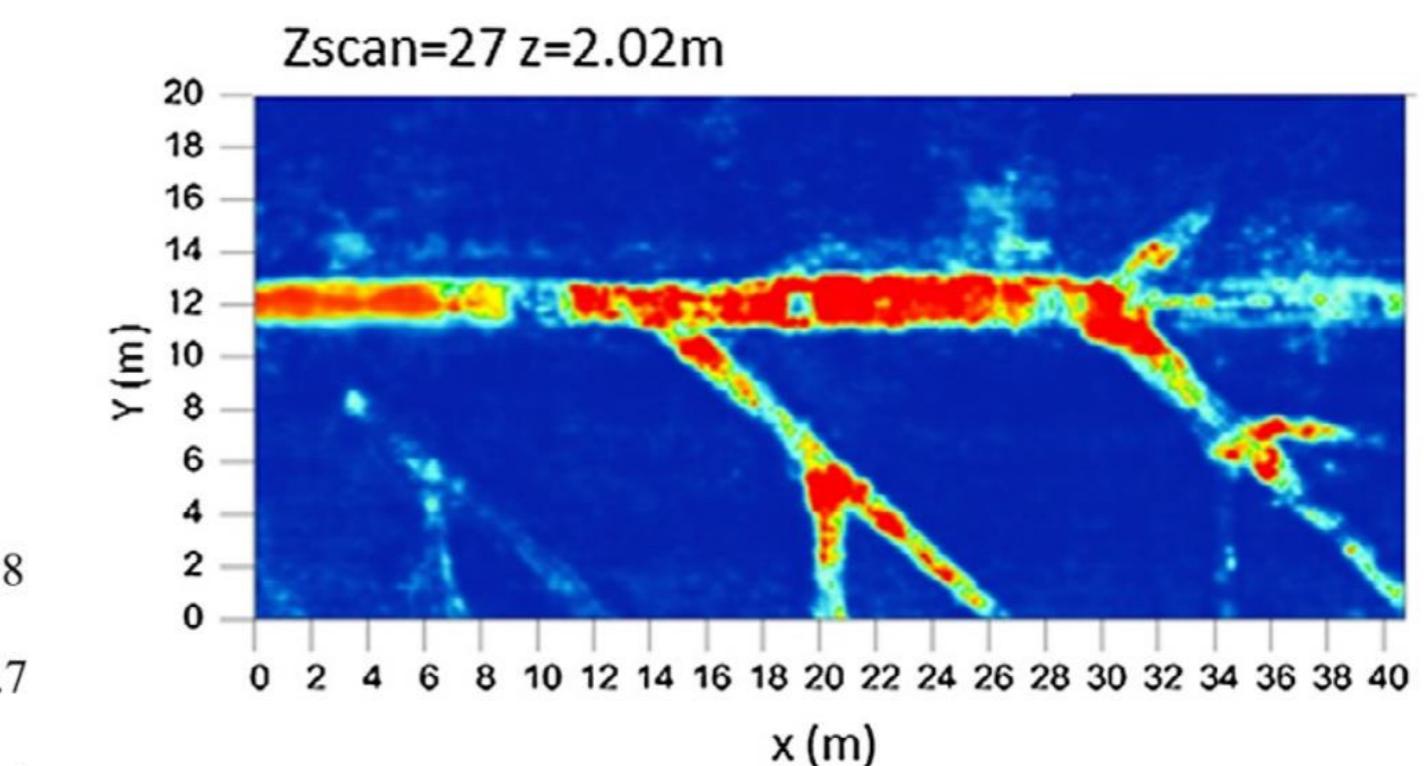
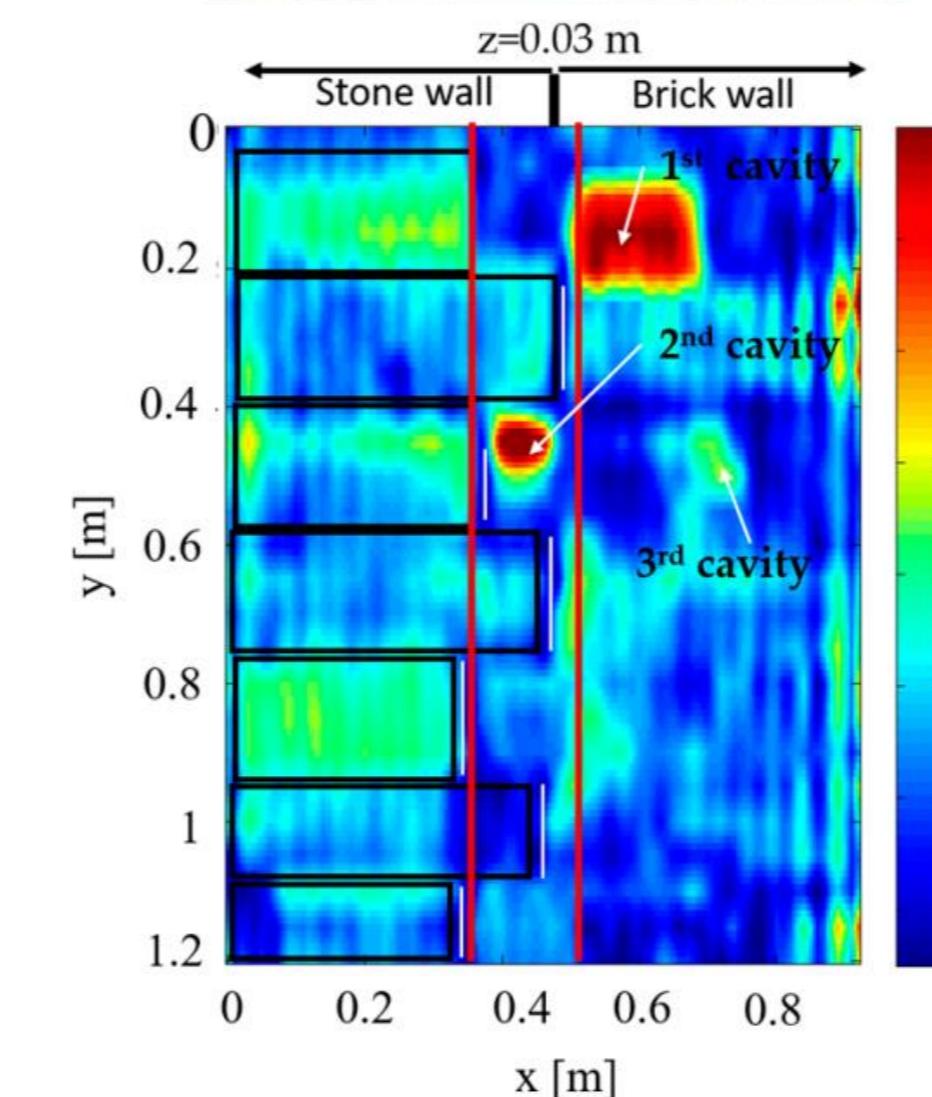
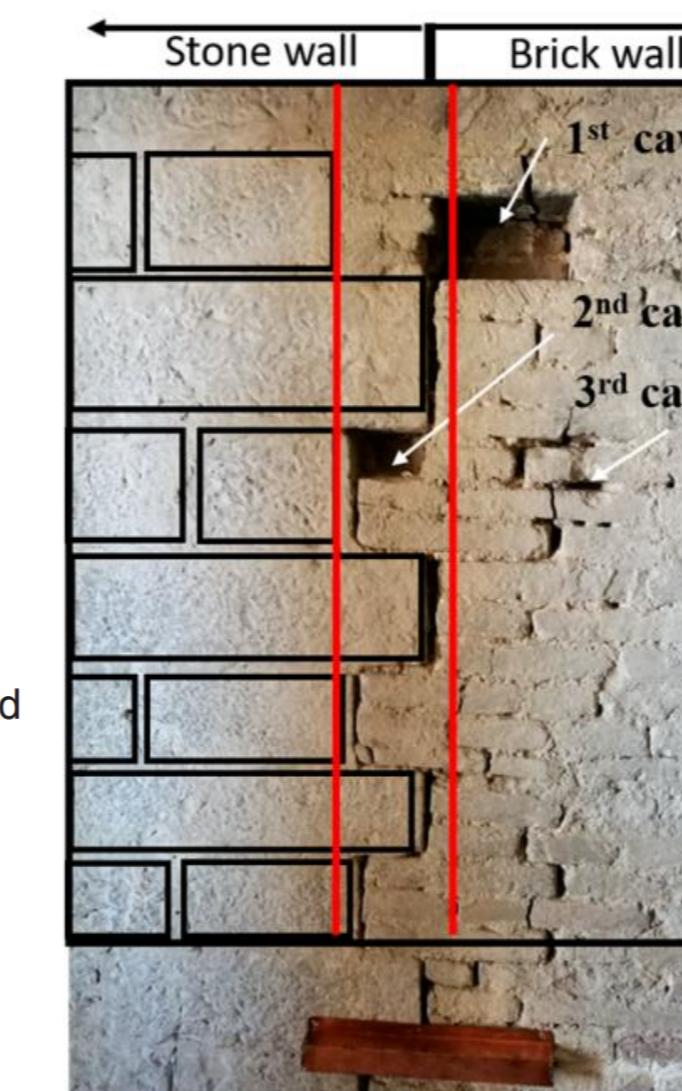
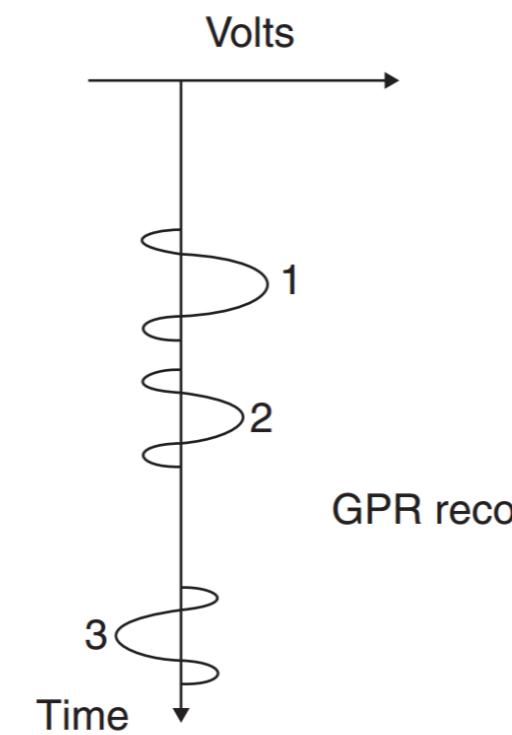
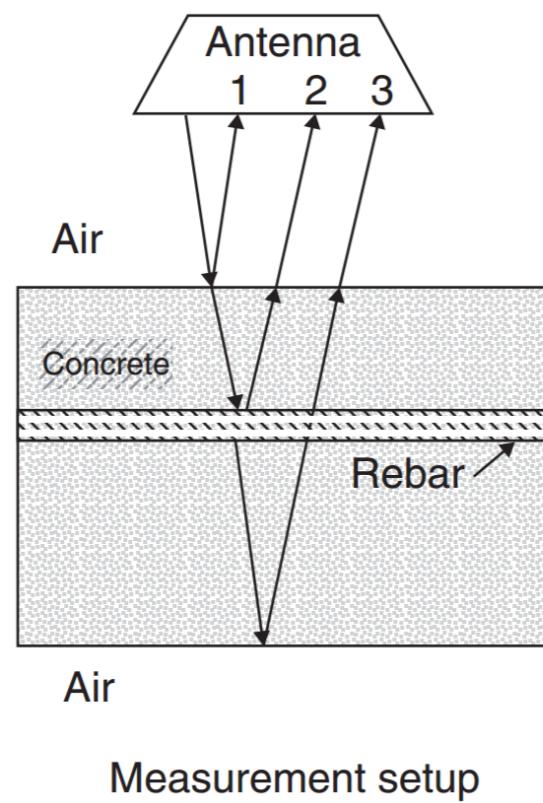
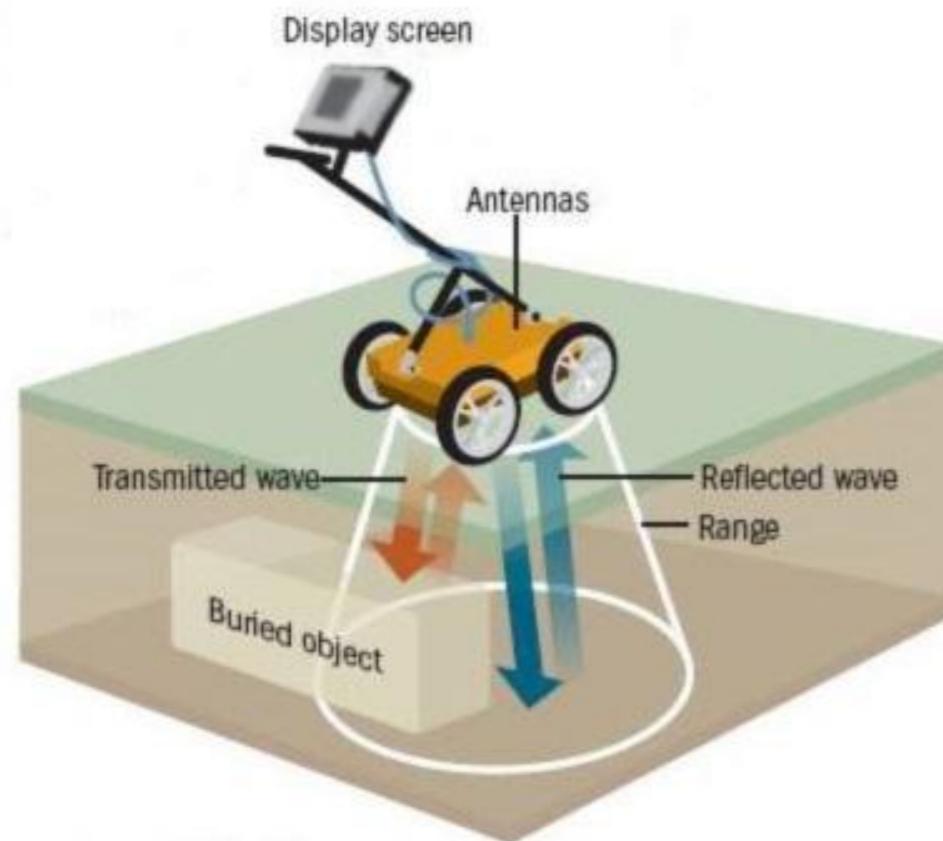


UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

Wang, M. L., Lynch, J. P., & Sohn, H. (Eds.). (2014). *Sensor Technologies for Civil Infrastructures, Volume 1: Sensing Hardware and Data Collection Methods for Performance Assessment*. Elsevier.

Grosse, C. U., & Ohtsu, M. (Eds.). (2008). *Acoustic emission testing*. Springer Science & Business Media.

# Ground Penetrating Radar (GPR)



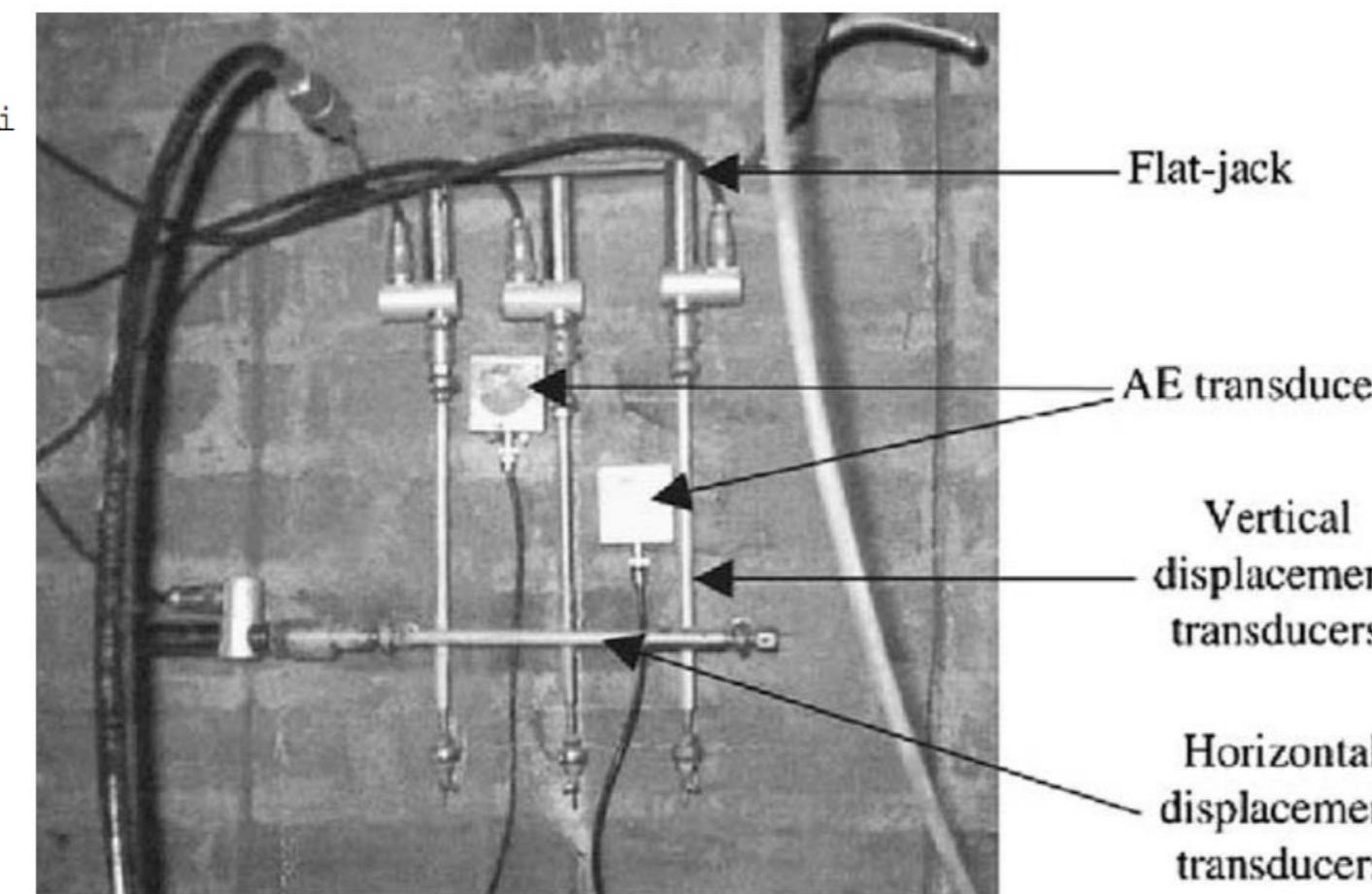
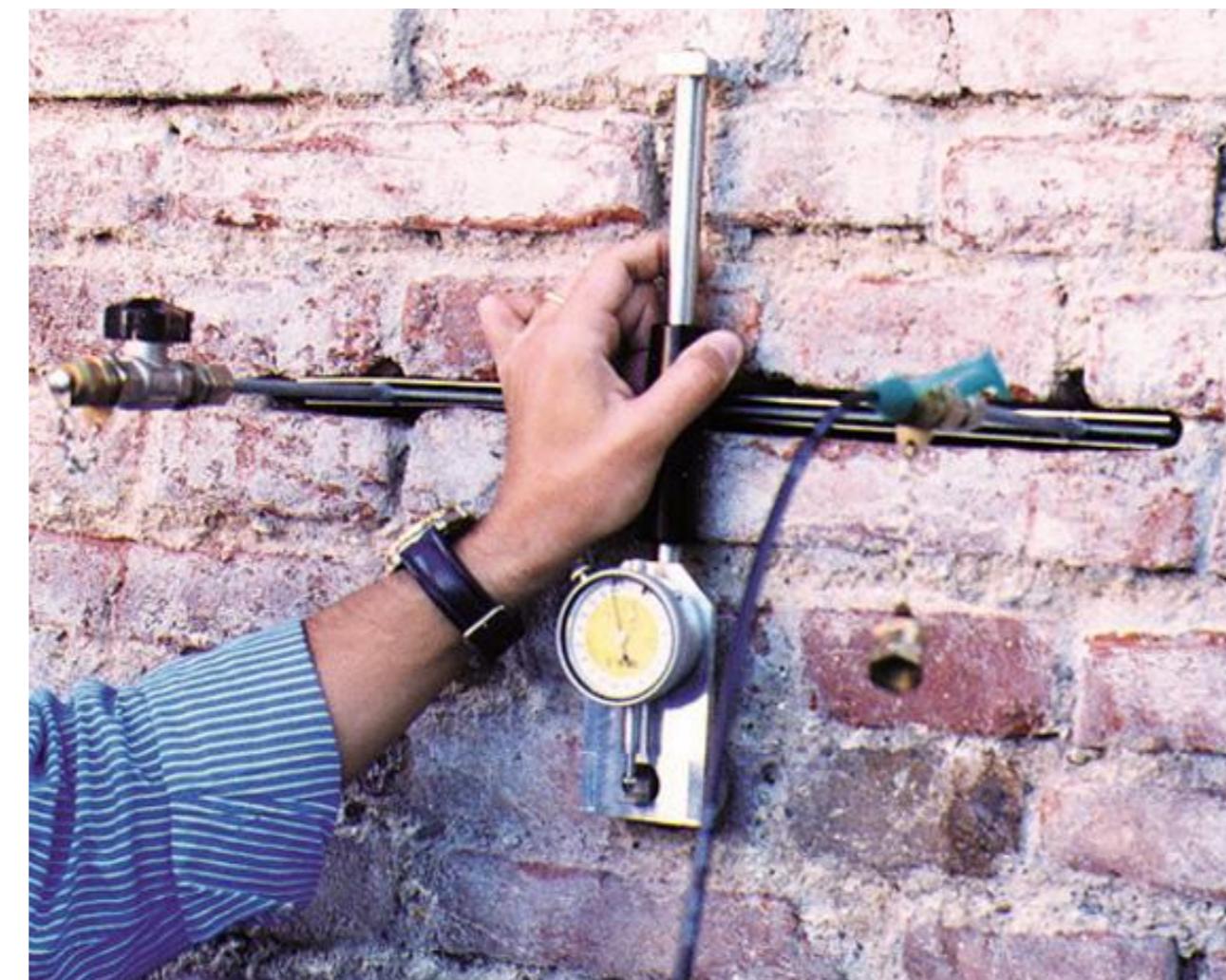
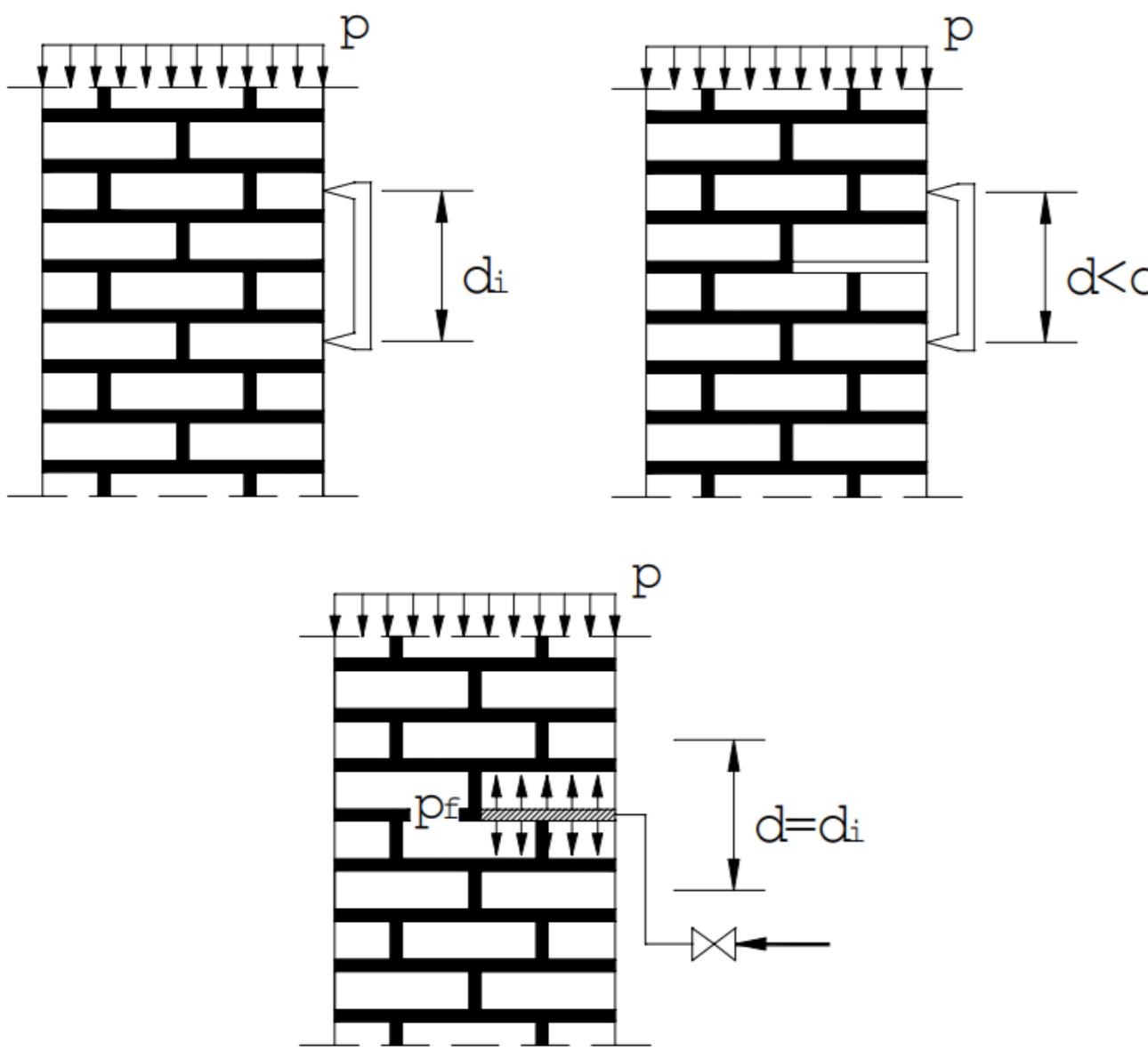
UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

Wang, M. L., Lynch, J. P., & Sohn, H. (Eds.). (2014). *Sensor Technologies for Civil Infrastructures, Volume 1: Sensing Hardware and Data Collection Methods for Performance Assessment*. Elsevier.

Catapano, I., Ludeno, G., Soldovieri, F., Tosti, F., & Padeletti, G. (2018). Structural assessment via ground penetrating radar at the Consoli Palace of Gubbio (Italy). *Remote Sensing*, 10(1), 45.

Núñez-Nieto, X., Solla, M., Novo, A., & Lorenzo, H. (2014). Three-dimensional ground-penetrating radar methodologies for the characterization and volumetric reconstruction of underground tunneling. *Construction and Building materials*, 71, 551-560.

# Flat jacks

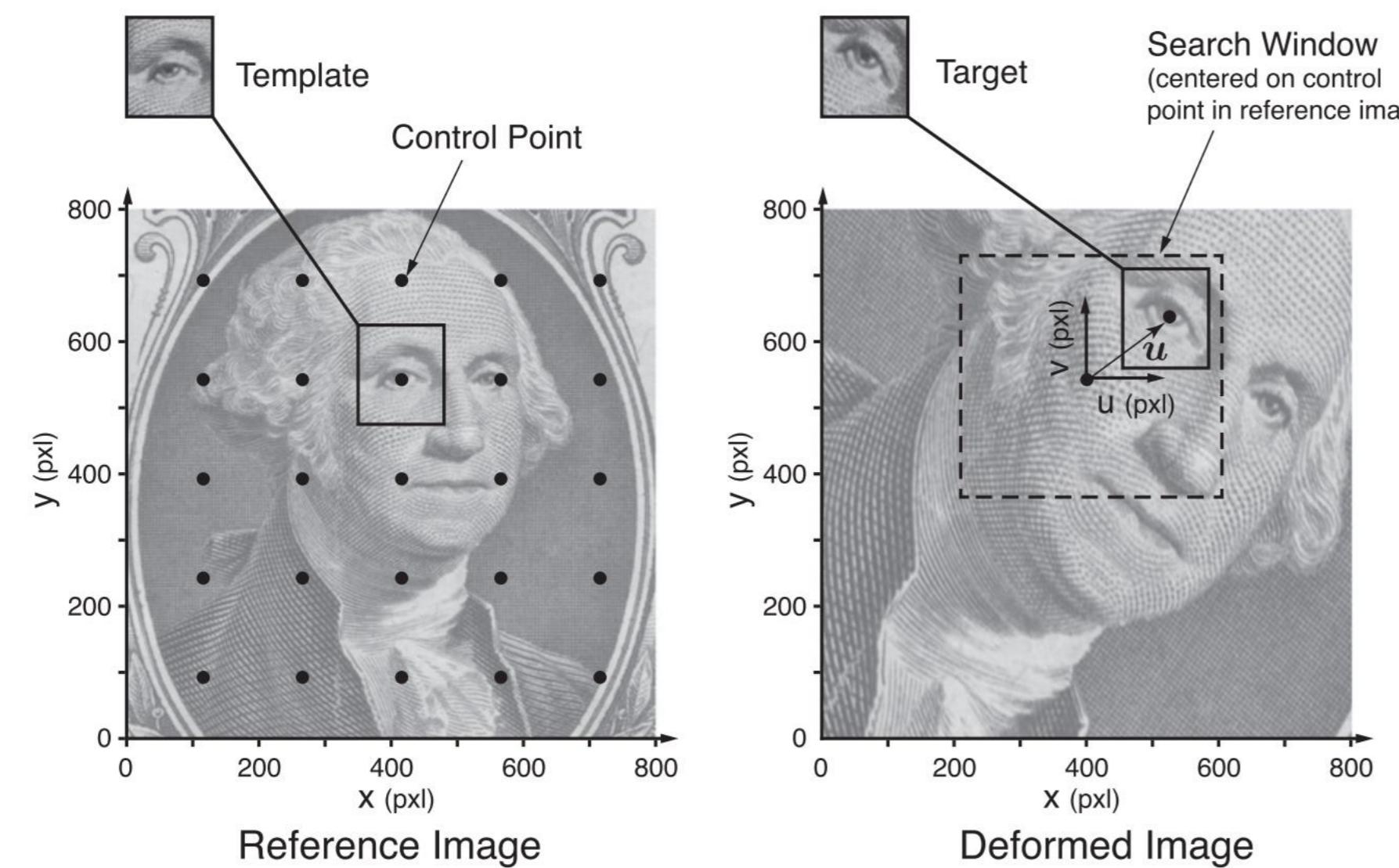


Carpinteri, A., Invernizzi, S., & Lacidogna, G. (2009). Historical brick-masonry subjected to double flat-jack test: Acoustic emissions and scale effects on cracking density. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2813-2820.



Bartoli, G., Betti, M., & Giordano, S. (2013). In situ static and dynamic investigations on the "Torre Grossa" masonry tower. *Engineering Structures*, 52, 718-733.

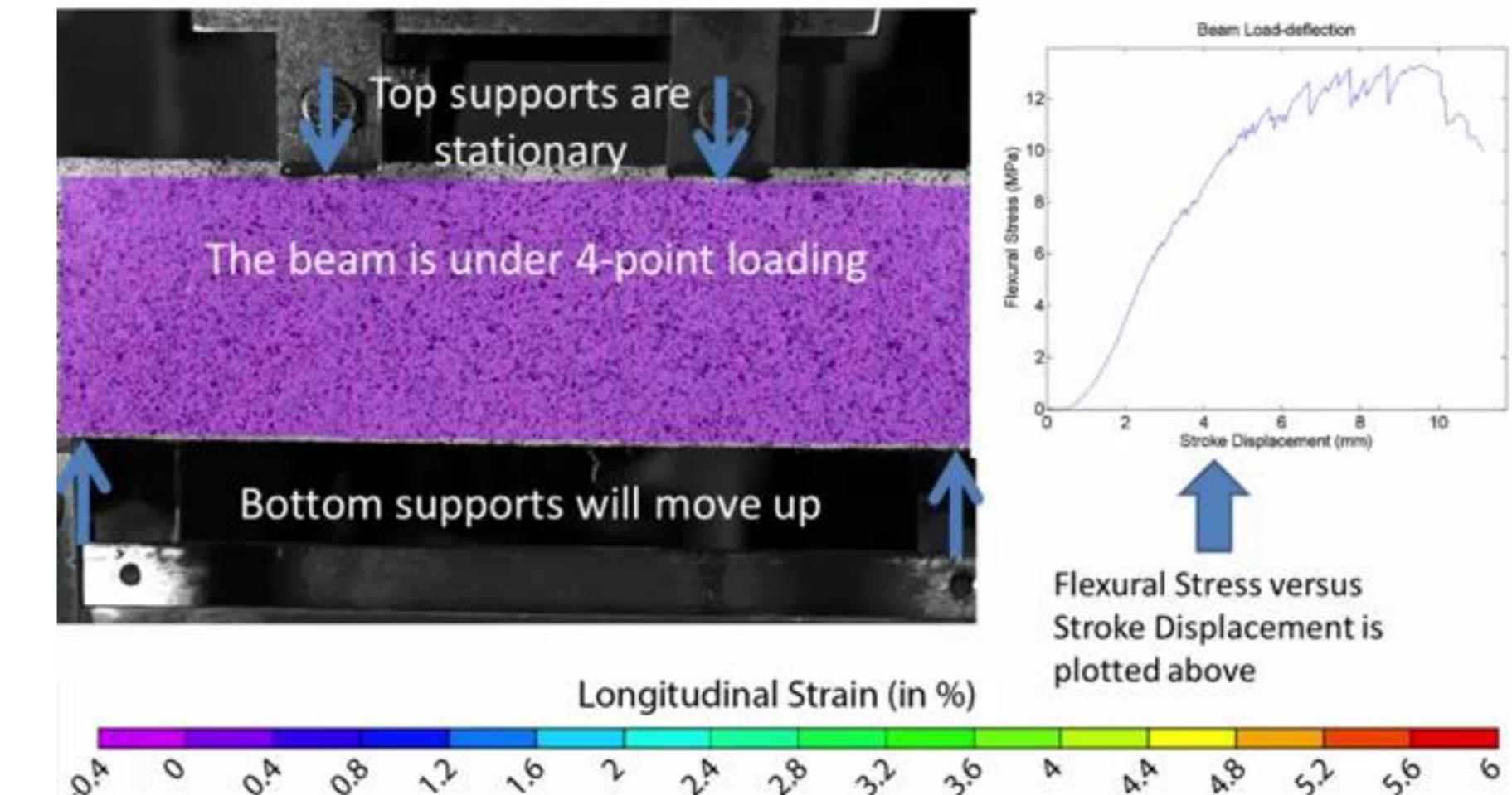
# Digital Image Correlation



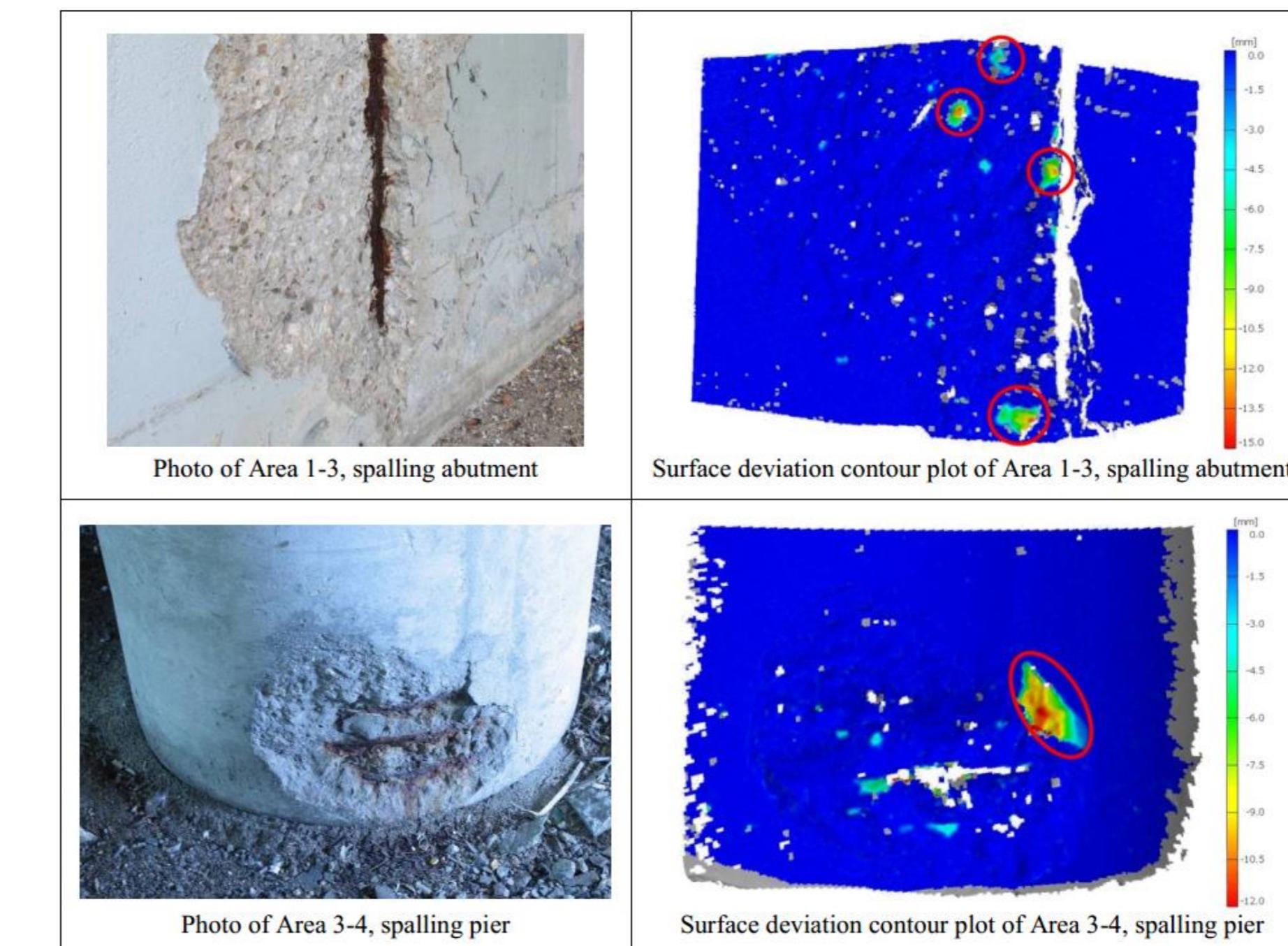
Turner, D. Z. (2015). Peridynamics-based digital image correlation algorithm suitable for cracks and other discontinuities. *Journal of Engineering Mechanics*, 141(2), 04014115.



UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

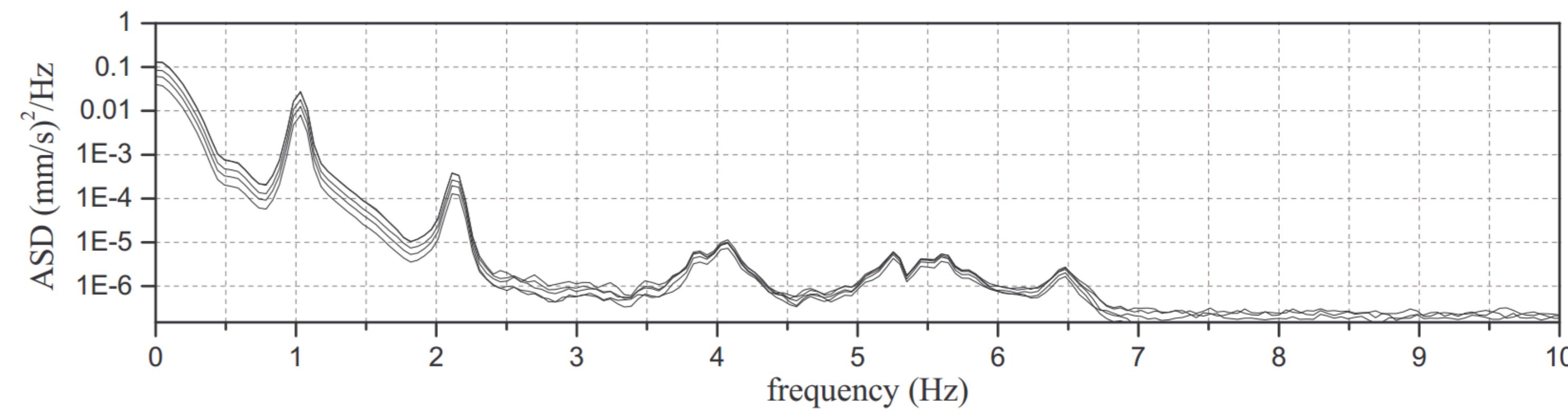
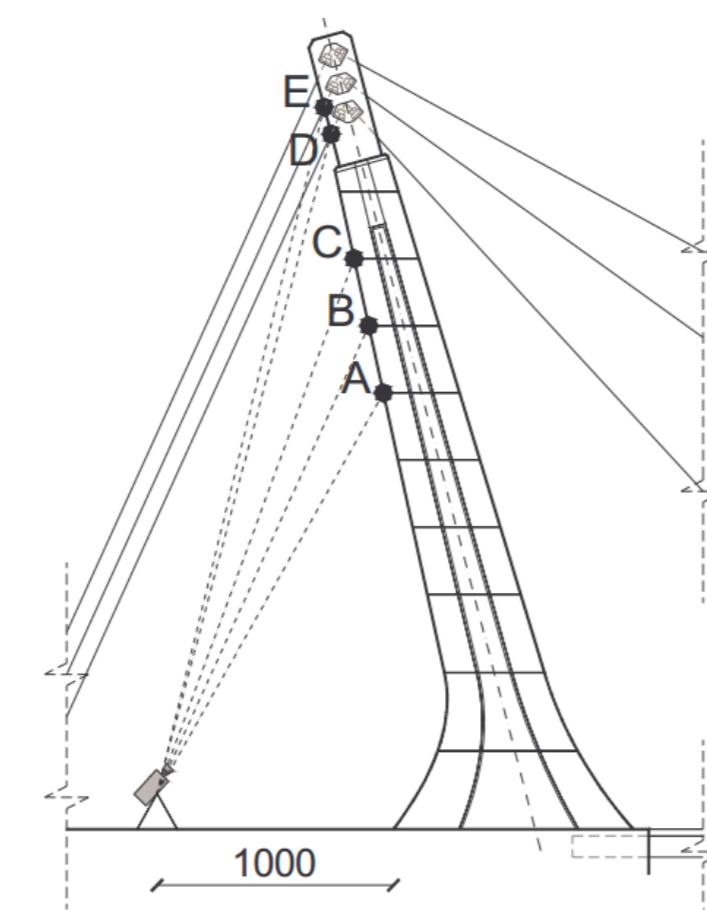
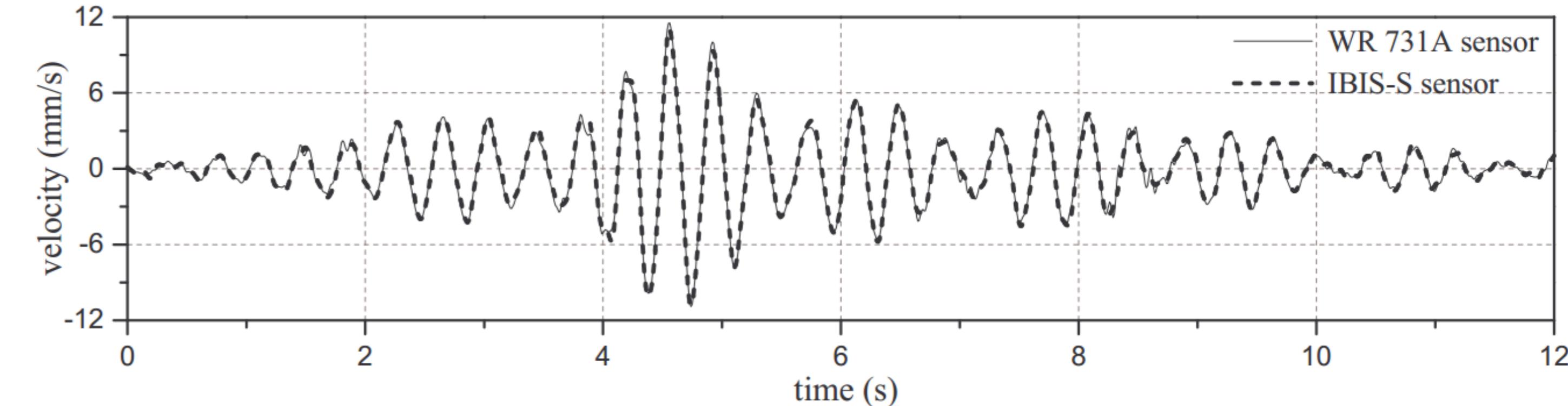


<https://www.youtube.com/watch?v=yxOdLlwp3TU>



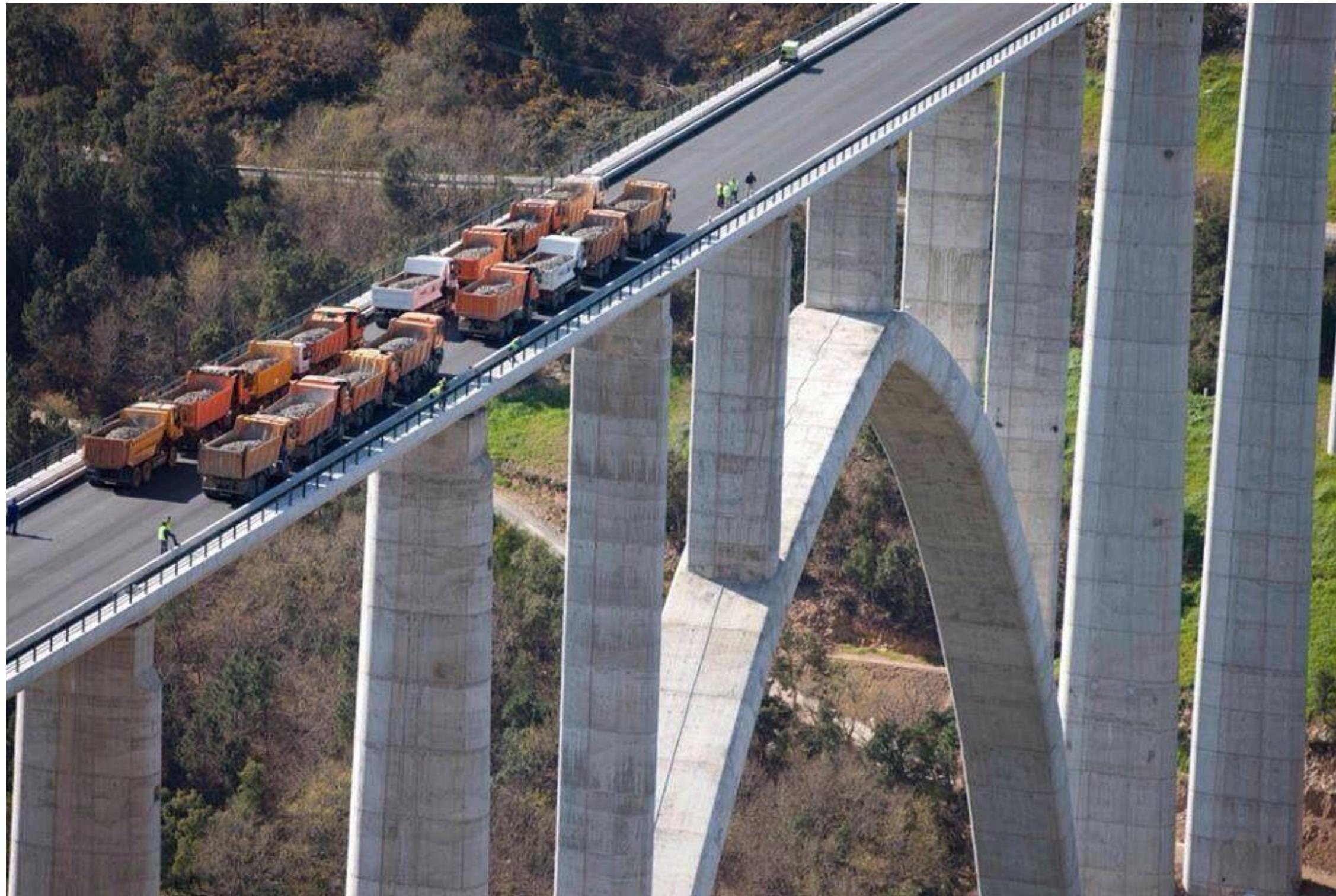
Nonis, C., Niezrecki, C., Yu, T. Y., Ahmed, S., Su, C. F., & Schmidt, T. (2013, April). Structural health monitoring of bridges using digital image correlation. In *Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2013* (Vol. 8695, p. 869507). International Society for Optics and Photonics.

# Interferometric radar (microwave interferometer)



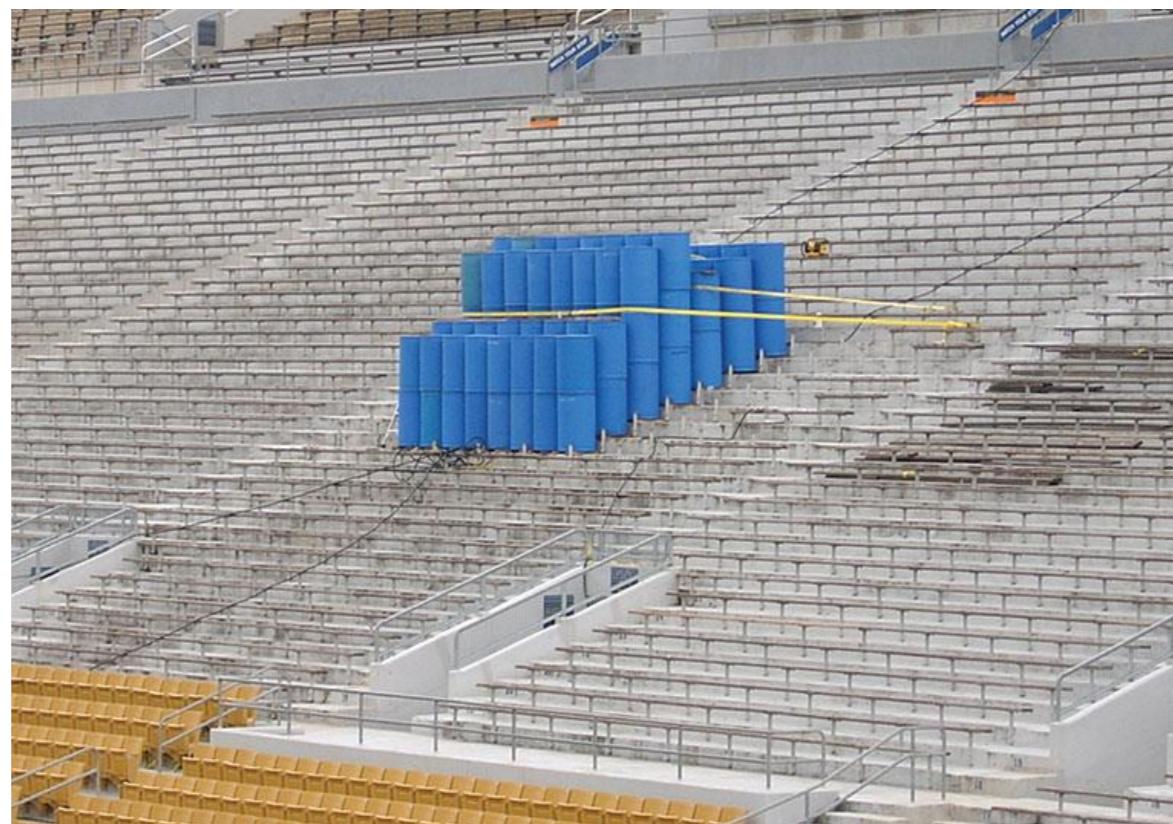
# Load testing

## 1. certified steel/cast-iron weights (trucks)



# Load testing

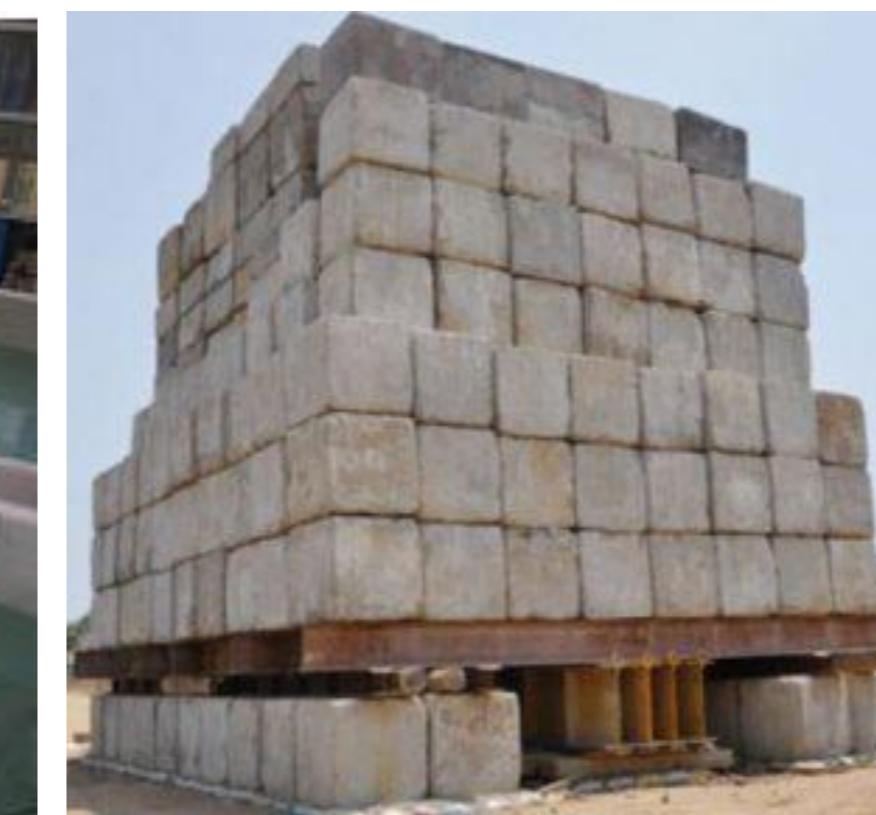
2. Water



3. bagged sand 4. kentledge



5. hydraulic jacks



# Tecnologías de monitorización

## DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL HORMIGÓN

- ❖ Core sampling
- ❖ Powder-drilled samples
- ❖ Non-destructive testing assessment of in situ strength
- ❖ Ultrasonic pulse velocity testing
- ❖ In situ permeability tests



## CONDICIÓN DE SERVICIO DE LAS ARMADURAS

- ❖ Half-cell potential mapping
- ❖ Resistivity testing of concrete
- ❖ Direct measurements of corrosion rate



## TESTS DE LABORATORIO Y ANÁLISIS DE MUESTRAS



UNIVERSIDAD  
DE GRANADA



# Análisis modal como técnica in-situ, automatizable, no destructiva, y no invasiva

La monitorización basada en vibraciones, o pruebas dinámicas, se basa en la identificación de variaciones inducidas por daños en las propiedades modales de las estructuras (es decir, **frecuencias resonantes, formas modales y propiedades de amortiguación**).

Hay dos tipologías principales de pruebas dinámicas:

- Excitaciones artificiales - **Análisis modal experimental (EMA)**.
- Vibraciones ambientales - **Análisis modal operacional (OMA)**.

## Observaciones

- **Los sensores** (acelerómetros o sensores de velocidad/desplazamiento) **no se pueden ubicar en los nodos de los modos**.
- **La capacidad del sistema para detectar daños depende de su capacidad para identificar modos de alta frecuencia.**



# Análisis modal como técnica in-situ, automatizable, no destructiva, y no invasiva

La monitorización basada en vibraciones, o pruebas dinámicas, se basa en la identificación de variaciones inducidas por daños en las propiedades modales de las estructuras (es decir, **frecuencias resonantes, formas modales y propiedades de amortiguación**).

Hay dos tipologías principales de pruebas dinámicas:

- Excitaciones artificiales - **Análisis modal experimental (EMA)**.
- Vibraciones ambientales - **Análisis modal operacional (OMA)**.

## Observaciones

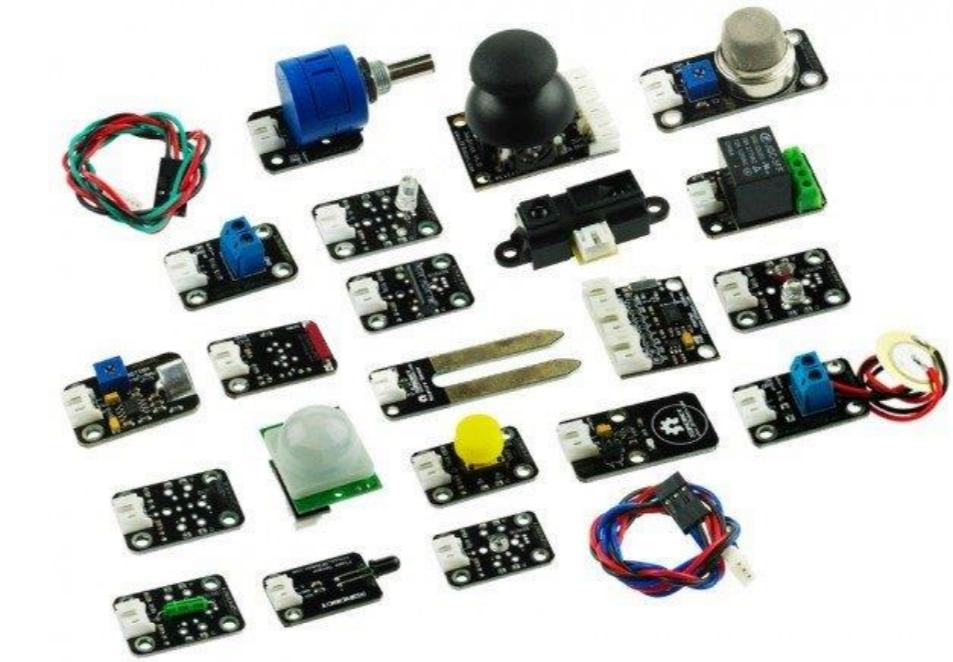
- **Los sensores** (acelerómetros o sensores de velocidad/desplazamiento) **no se pueden ubicar en los nodos de los modos**.
- **La capacidad del sistema para detectar daños depende de su capacidad para identificar modos de alta frecuencia.**

## Ventajas/desventajas

- **Identificación global de daños.**
- **Las patologías estructurales locales con efecto limitado sobre la rigidez general de las estructuras pueden pasar desapercibidas.**
- **El amortiguamiento (mecanismos de disipación de energía) es muy sensible al daño, sin embargo, su identificación depende en gran medida del nivel de excitación modal y generalmente está sujeto a altos niveles de incertidumbre.**
- **No destructivo.**
- **No es necesario acceder a lugares difíciles.**
- **OMA - Las condiciones normales de funcionamiento de la estructura permanecen inalteradas - Mínima intrusión.**
- **OMA – “Fácilmente” aplicable a la monitorización continua y de largo plazo de estructuras.**



# Sensores



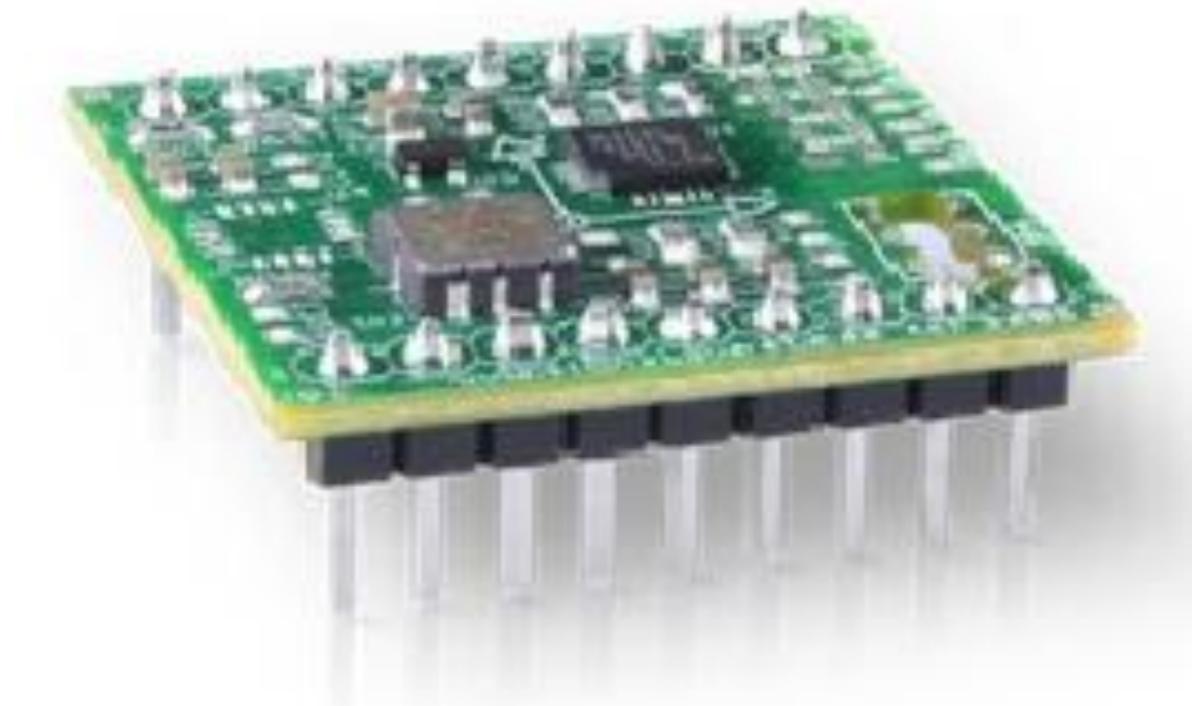
## Key Definitions

- ❖ Transducers, sensors, and actuators
- ❖ Analog-to-digital converter
- ❖ Primary vs secondary state sensing
- ❖ Sampling rate
- ❖ Error and signal-to-noise ratio
- ❖ Range, resolution, sensitivity, and gauge factor
- ❖ Precision and accuracy



### Key Definitions

- **Transducers, sensors, and actuators (Transductores, sensores y actuadores)**
  - Un transductor es un dispositivo que convierte una señal con cierta forma física en otra señal de distinta naturaleza.
  - Los dispositivos que ofrecen un output eléctrico son llamados sensores (transductor + electrónica).
  - Los transductores de salida (output-transducer) transforman señales eléctricas en un cierto output (señalización, movimiento).
  - Un actuador es la combinación de un output-transducer más la electrónica necesaria.



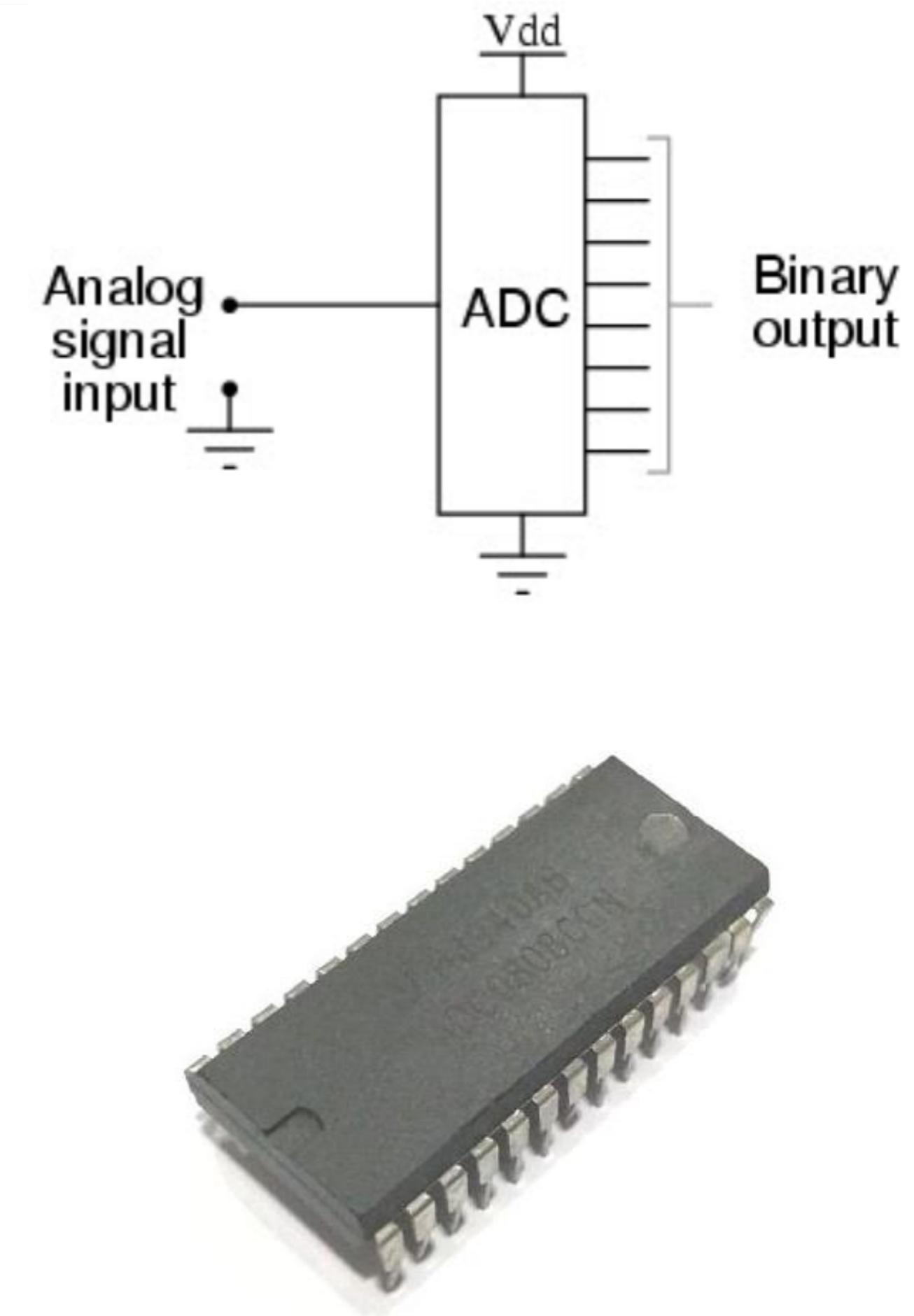
# Definiciones clave

## Key Definitions

- **Analog-to-digital converter (ADC)**  
**(Convertidor analógico-digital)**

Casi todas las magnitudes físicas medibles están en forma analógica (por ejemplo, temperatura, sonido, presión, luz, etc.). Dichas señales no pueden ser procesadas por computadoras y procesadores digitales. Por lo tanto, el sistema necesita un dispositivo intermedio para convertir los datos analógicos en datos digitales, es decir, un convertidor de analógico a digital. **Los convertidores de analógico a digital (ADC) son circuitos integrados electrónicos que convierten señales analógicas (voltajes) en digitales o binarias que constan de 0s y 1s.**

En los ADC, dos factores determinan la precisión de la señal digitalizada: **nivel de cuantificación (quantization level)** o tasa de bits (bits rate) y **tasa de muestreo (sampling rate)**.



# Definiciones clave

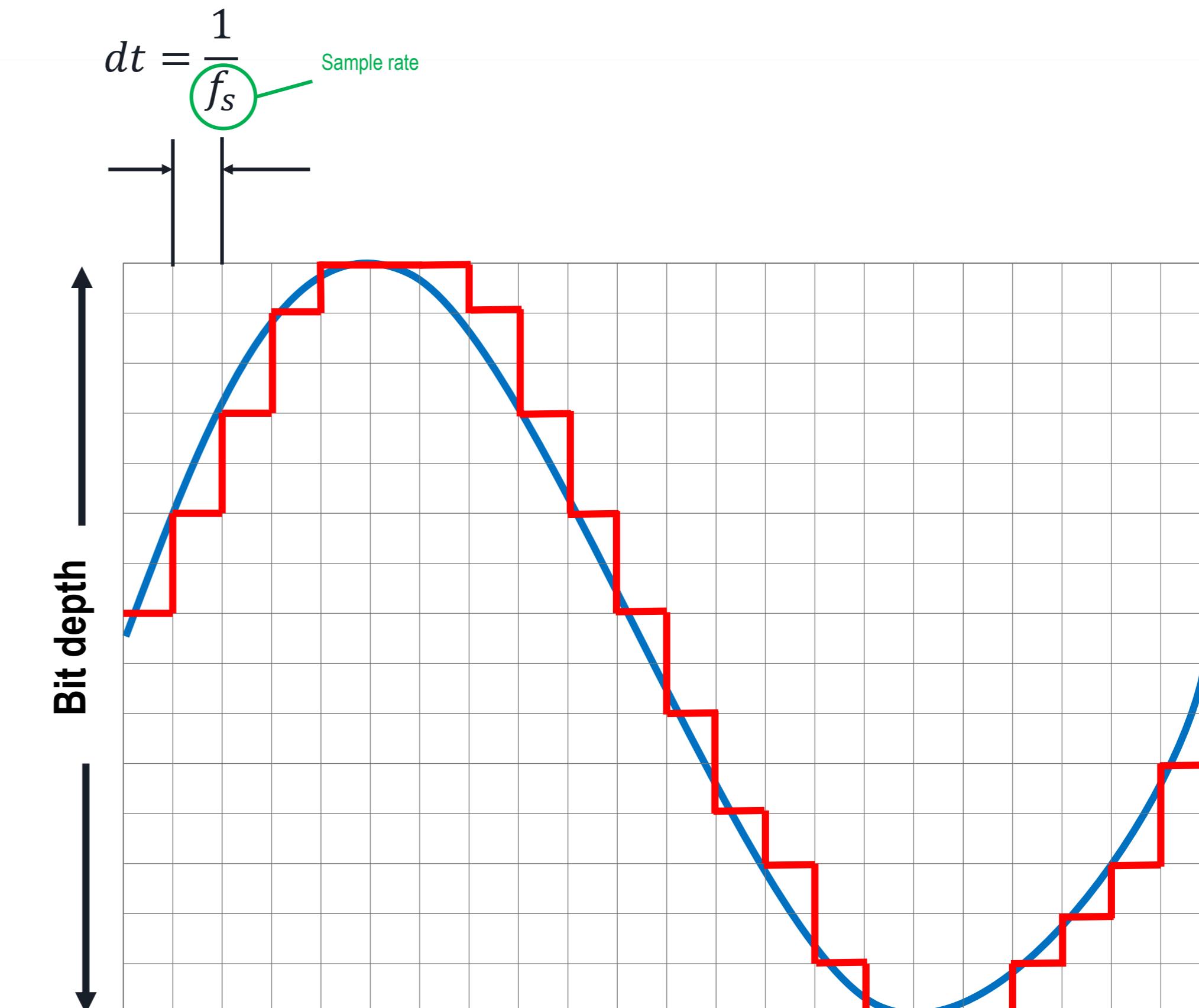
## Key Definitions

Nyquist frequency:  $f_{nyquist} = \frac{f_s}{2}$

Quantization level:  $Nq = 2^n$  ( $n$  – no bits)

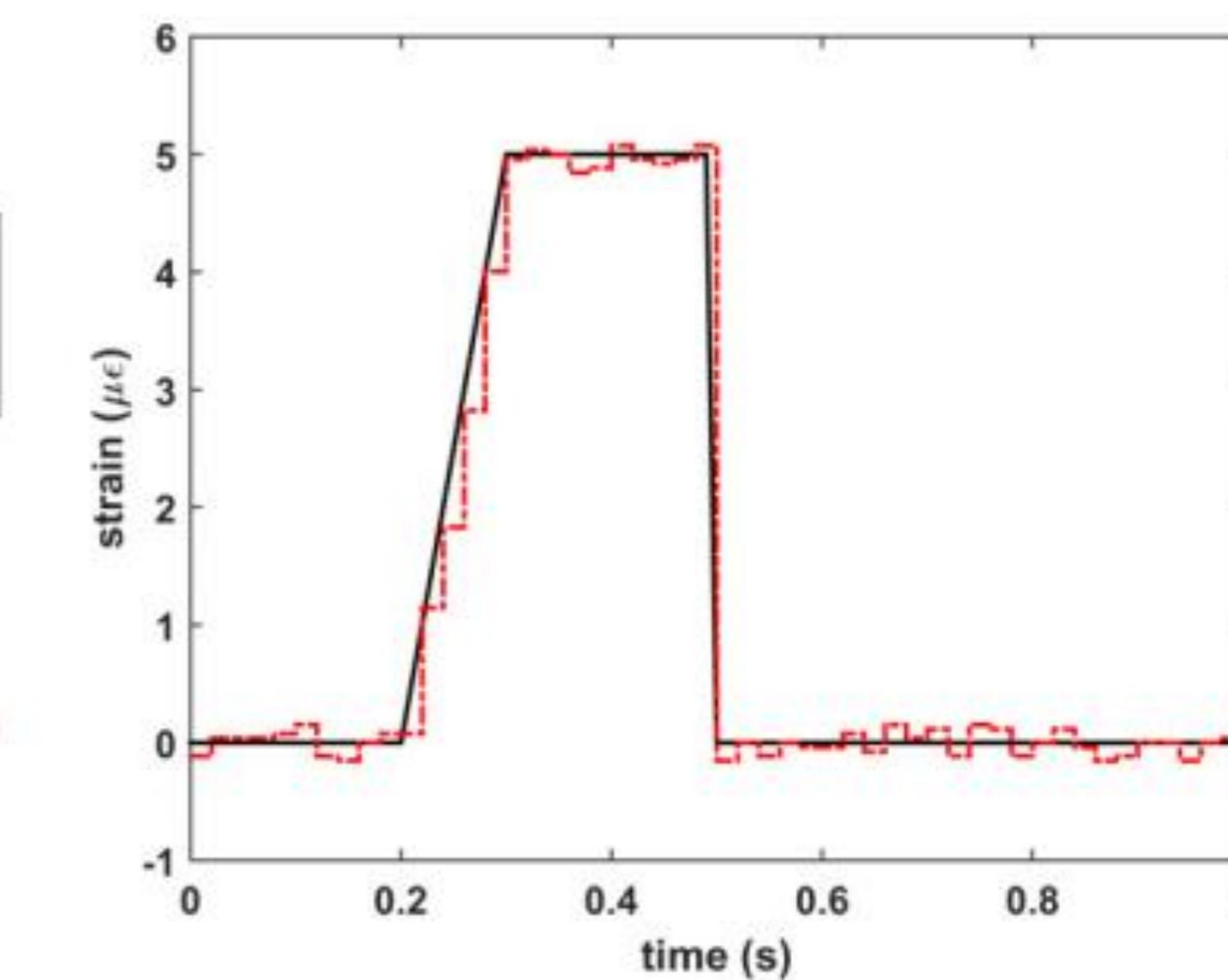
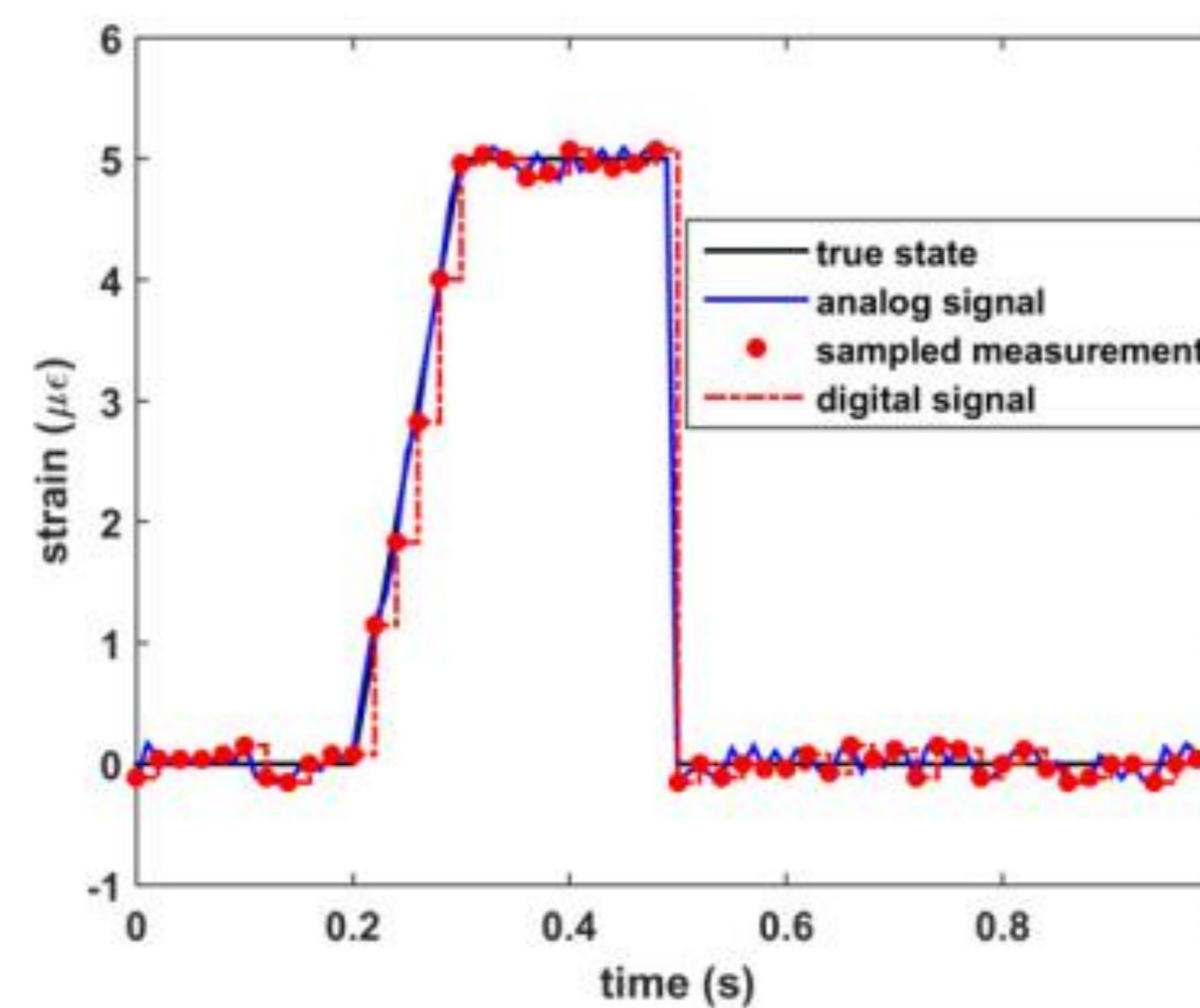
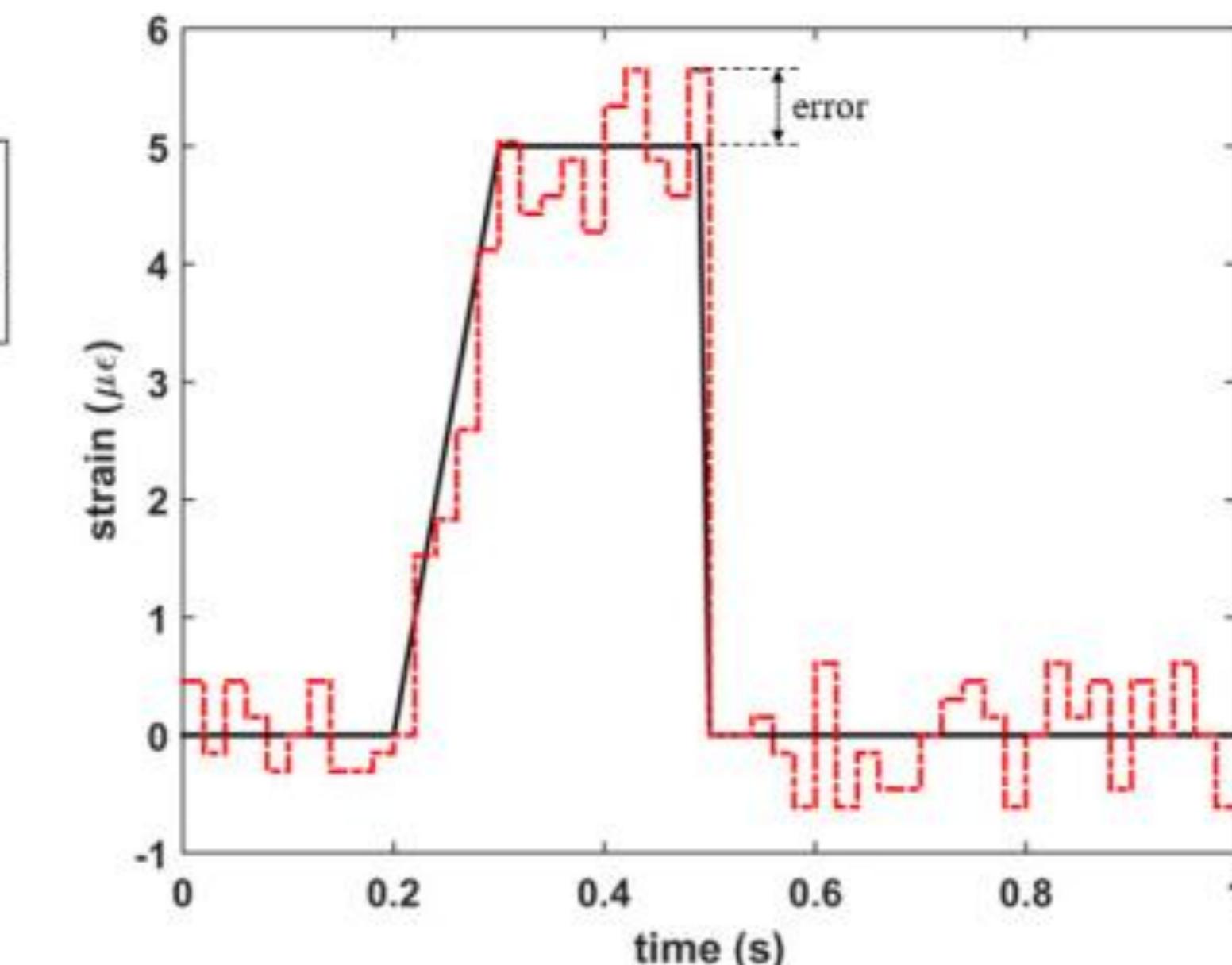
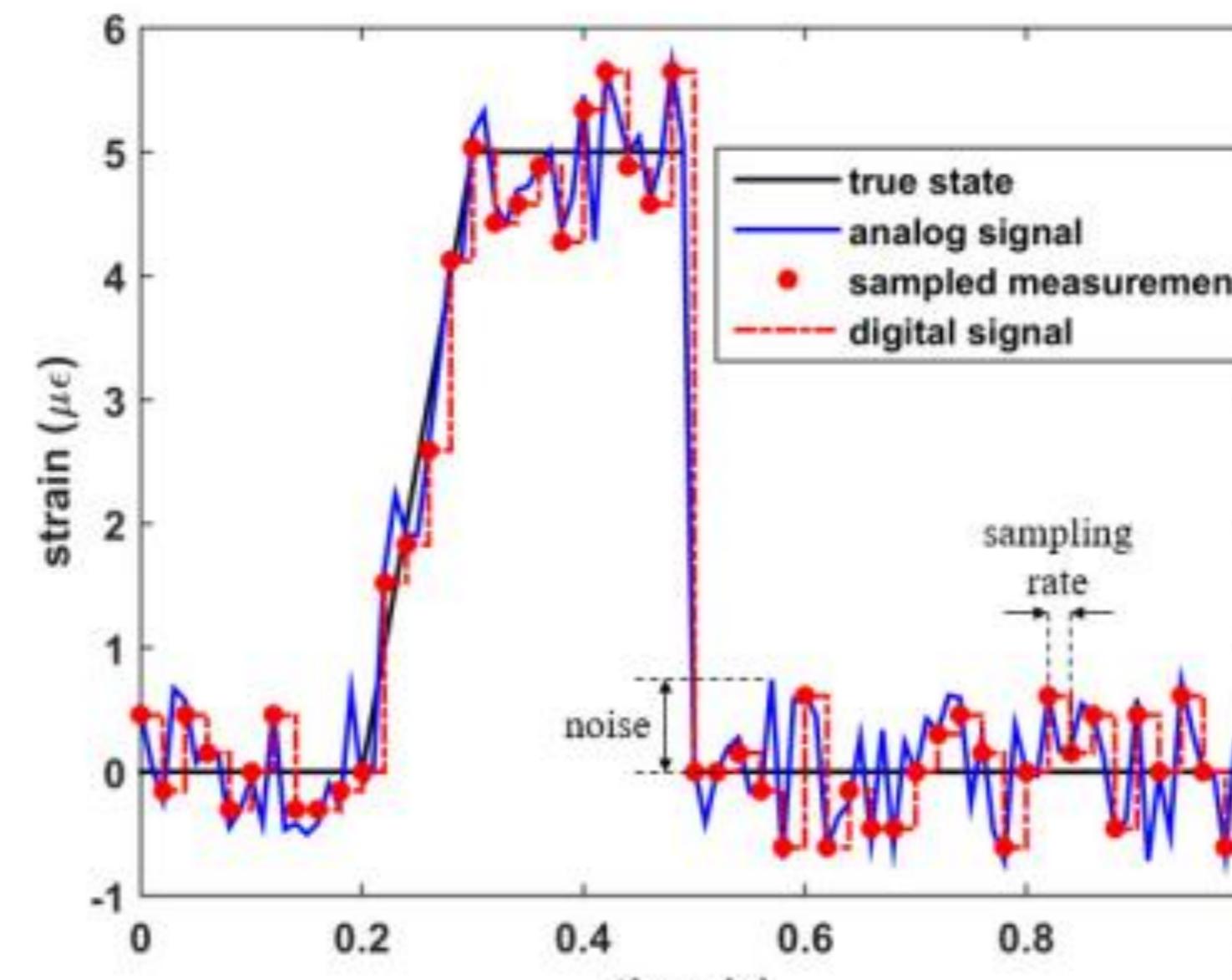
Resolution:  $R = \frac{V_{ref}}{Nq - 1}$

Average quantization error:  $\pm \frac{R}{2}$



The ADC converts the input signal into a series of digital values by approximating the signal with a fixed precision

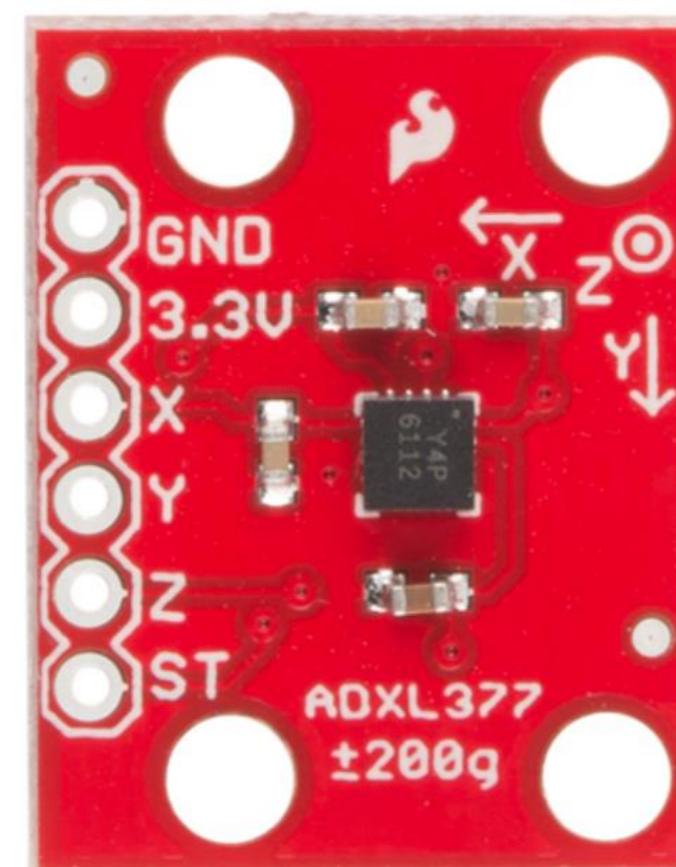
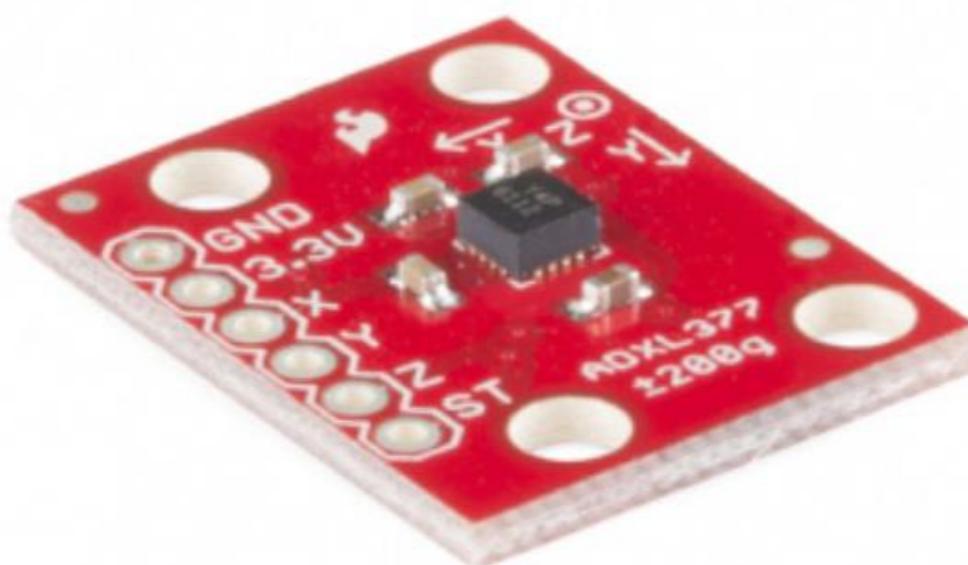
# Definiciones clave



# Definiciones clave

## Ejemplo

ADXL337 ( $\pm 3$  g)



Datasheet:

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ADXL337.pdf>

Pin Label	Pin Function	Input/Output	Notes
3.3V	Power Supply	Input	Can be between 1.8 - 3.6V.
X	X axis acceleration	Output	Analog output whose voltage correlates to acceleration measured on the X axis
Y	Y axis acceleration	Output	Analog output whose voltage correlates to acceleration measured on the Y axis
Z	Z axis acceleration	Output	Analog output whose voltage correlates to acceleration measured on the Z axis
ST	Self Test	Input	Used to verify sensor functionality
GND	Ground	Input	0V, common voltage to share with microcontroller circuit

**0.33 mV/g (seismic accelerometers ~10 V/g)**

<https://www.amazon.es/Sparkfun-ADXL337-Breakout/dp/B00MIDFW82>

## Definiciones clave

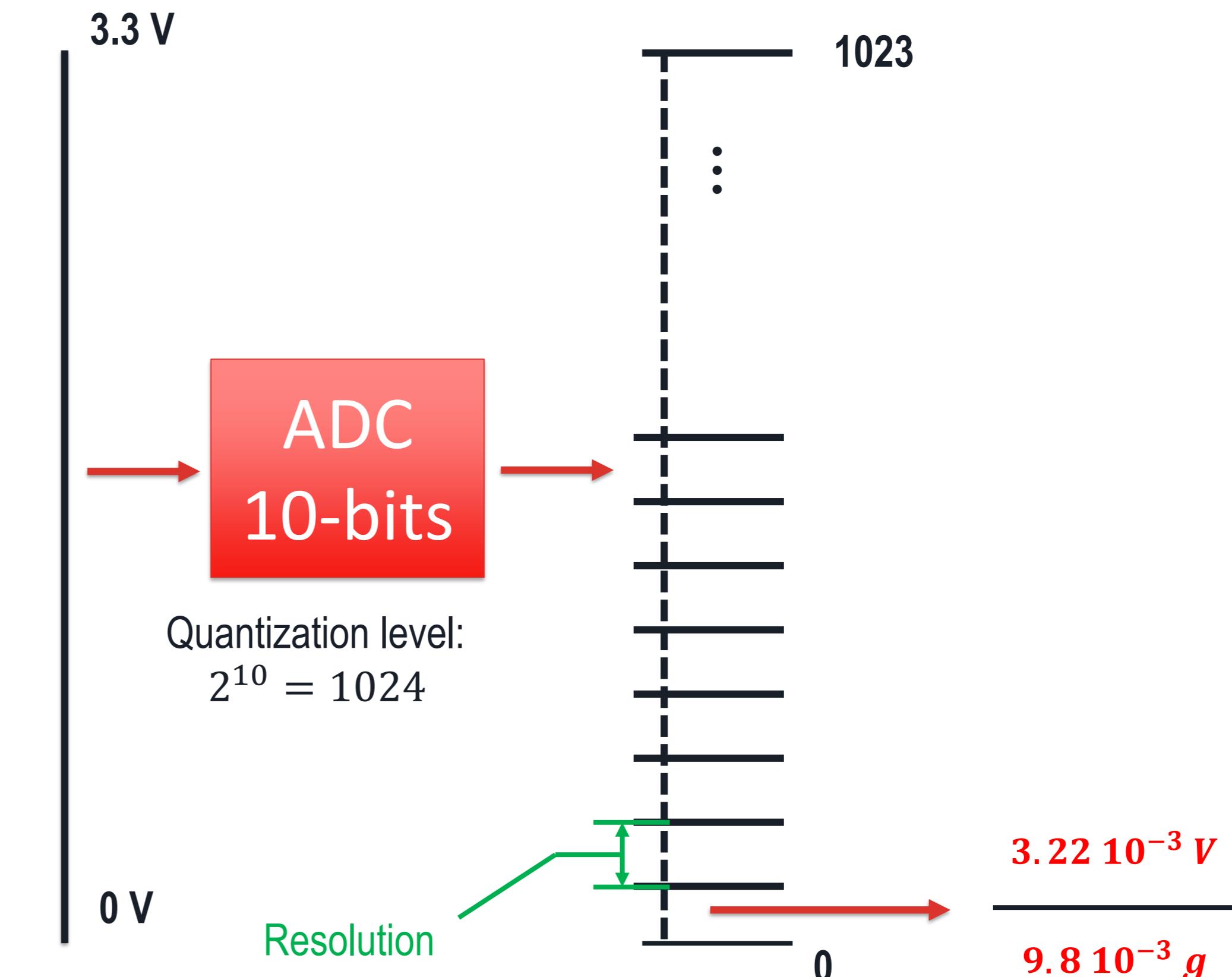
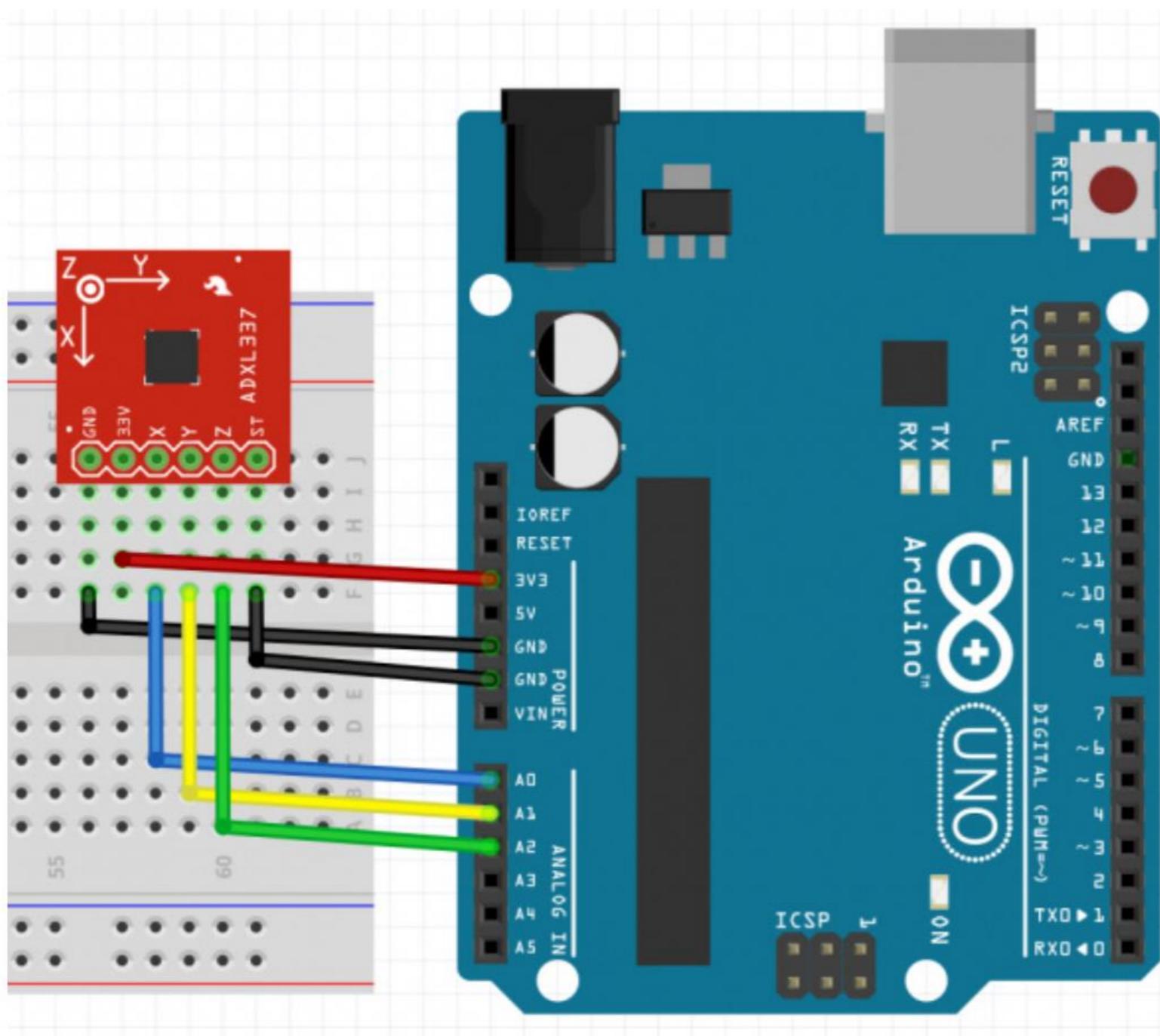
Sensitivity

300 mV/g (3 V)

330 mV/g (3,3 V)

$$s_g = \pm 1 \cdot \frac{R}{sens_{sensor}} = \pm 9.8 \cdot 10^{-3} g$$

## Ejemplo

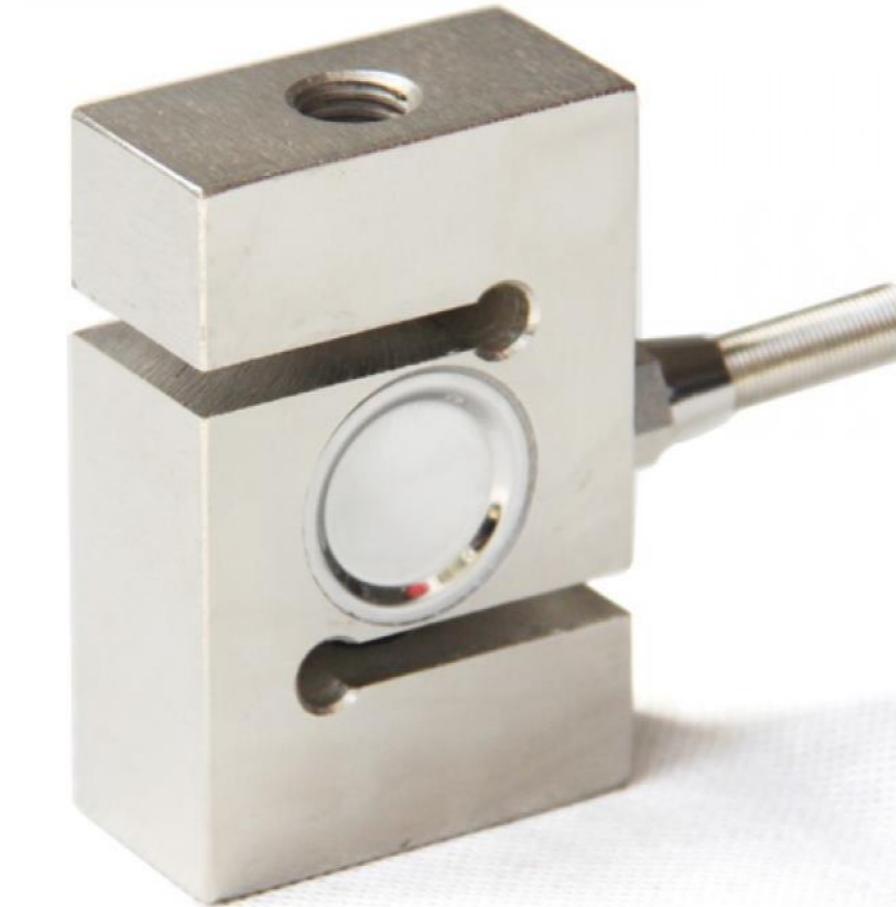
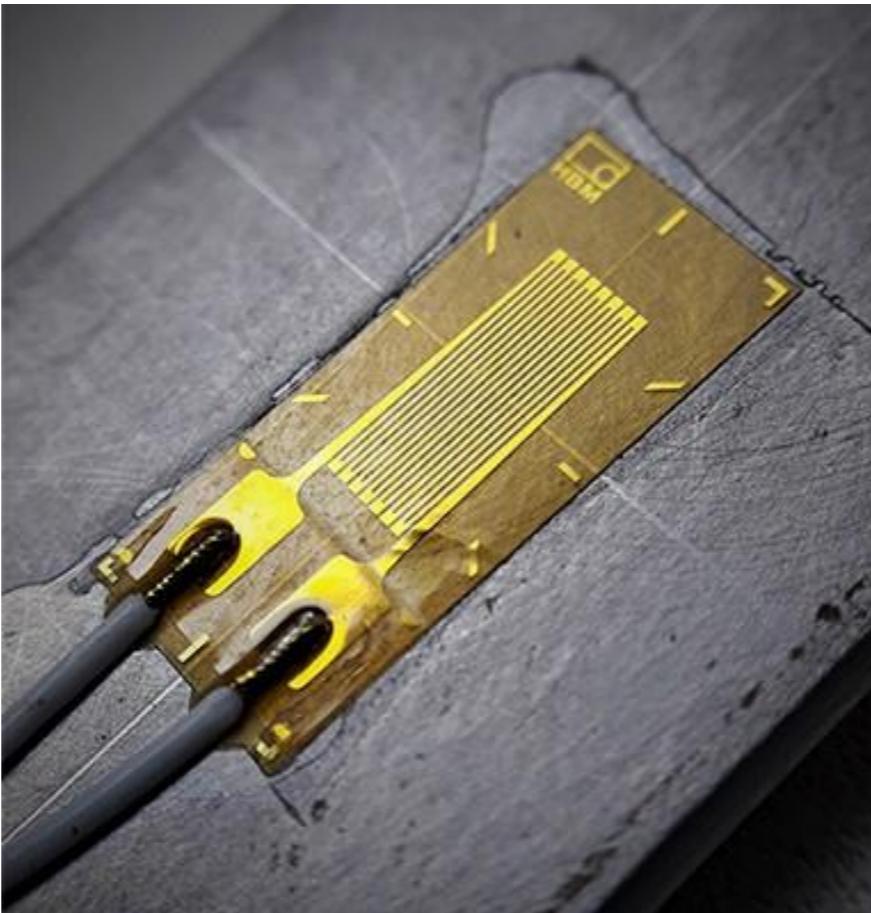


$$R = \frac{V_{ref}}{N_q - 1} = \frac{3.3}{1024 - 1} V = 3.22 \cdot 10^{-3} V$$

## Key Definitions

### Transductores primarios y secundarios

- Transductor primario: la conversión se realiza en un solo paso (e.g. galga extensiométrica)
- Transductor secundario: la conversión requiere más de un paso (e.g. célula de presión)



## Key Definitions

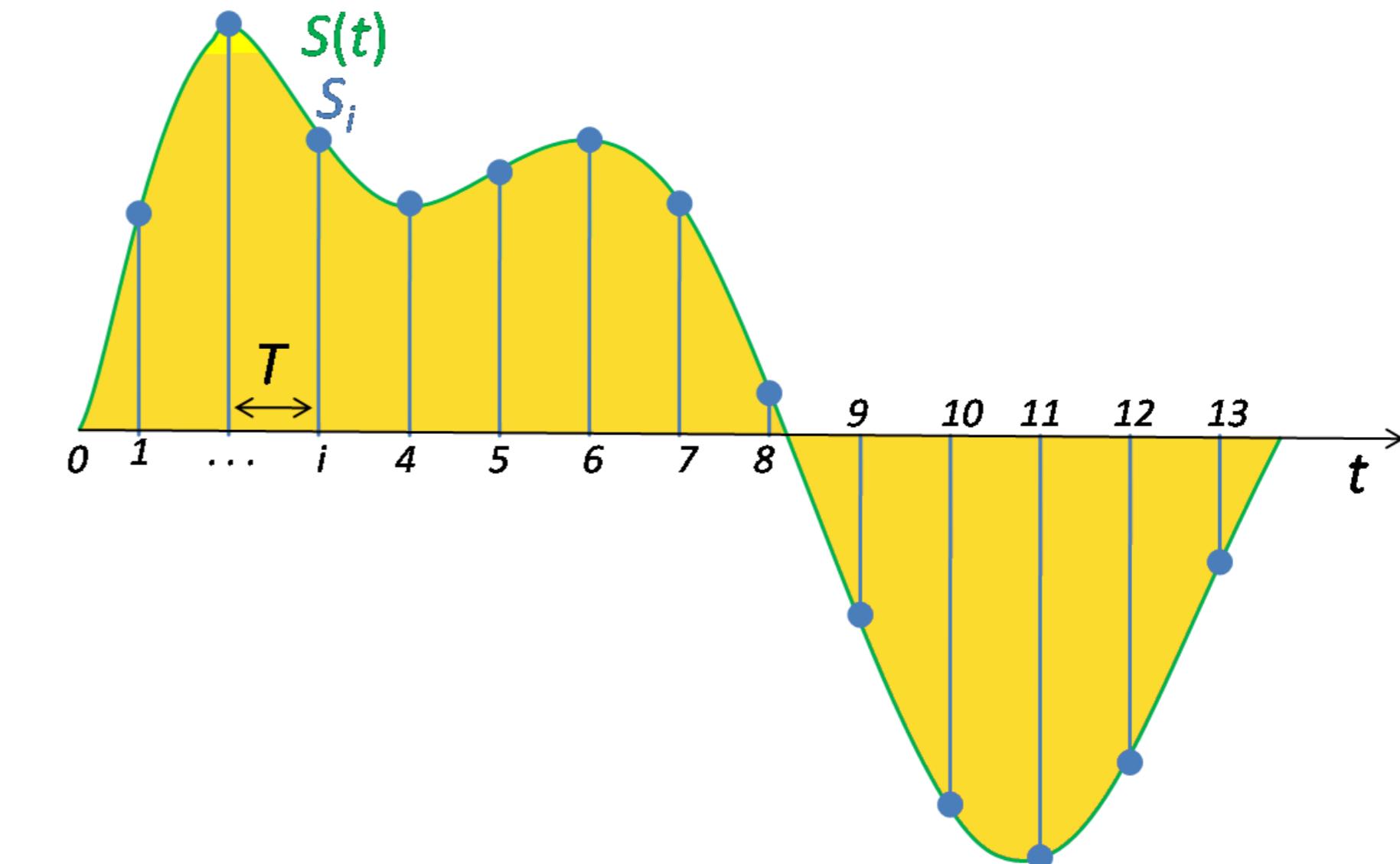
### Frecuencia de muestreo (Sampling rate)

- Muestreo refiere a la reducción de un señal continua en el tiempo a una señal discreta.
- Frecuencia de muestreo: Número de muestras por segundo.

$$dt = \frac{1}{f_s} \quad f_s[\text{Hz}] = \frac{\omega (\text{rad/s})}{2\pi}$$

#### Nyquist sampling theorem

Dada una frecuencia de muestreo  $f_s$ , solo podremos extraer información del rango de frecuencias desde 0 hasta  $f_{nyquist} = \frac{f_s}{2}$



## Key Definitions

- Error and signal-to-noise ratio

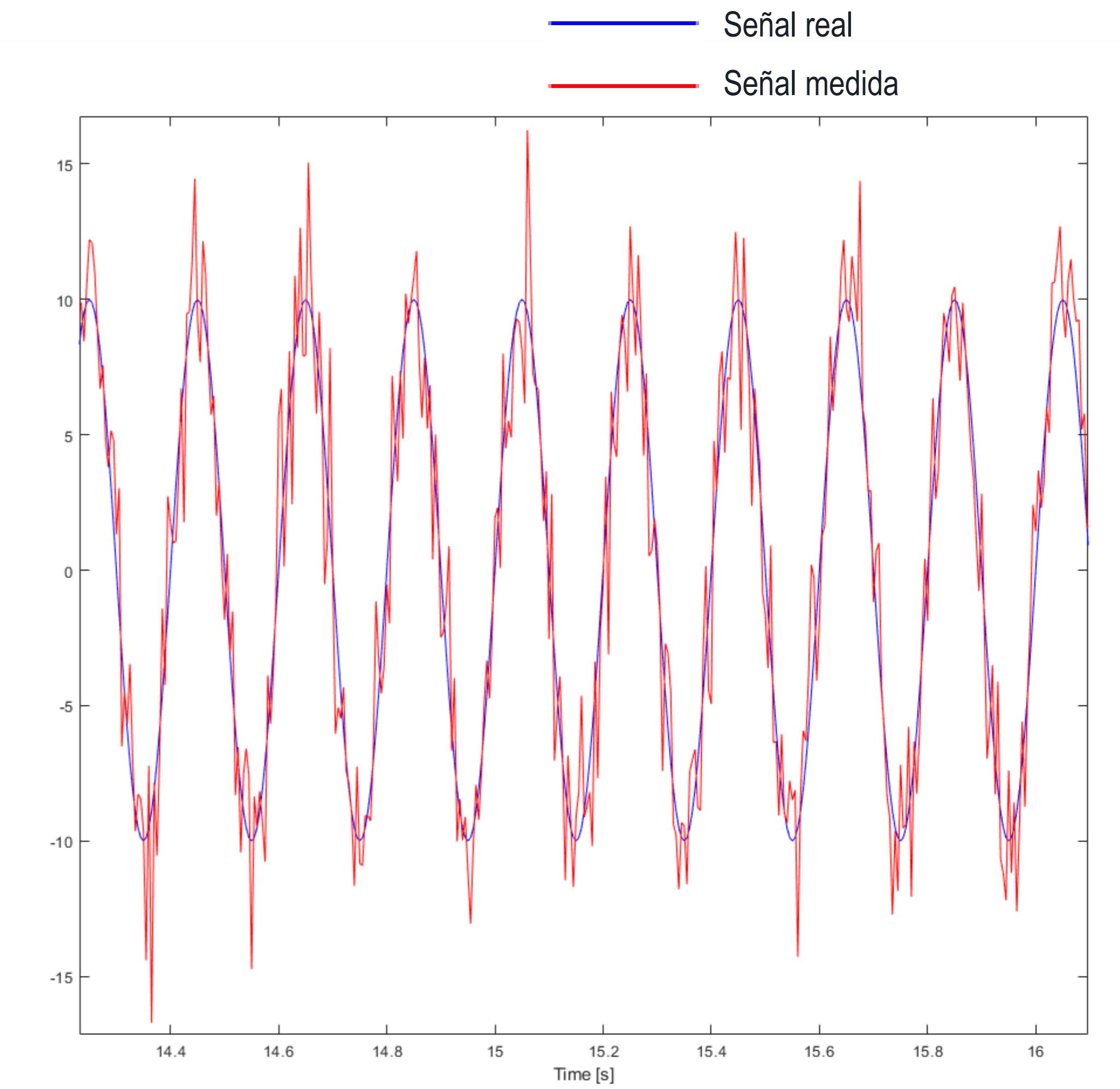
El **error** es la diferencia entre el estado medido y el valor real o verdadero. La **relación señal-ruido (signal-to-noise ratio SNR)** refiere al nivel de ruido presente en las mediciones. Puede definirse como la relación entre la potencia media de una señal y la potencia del ruido de fondo:

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}}$$

o alternativamente como:

$$SNR = \frac{rms(signal)}{rms(noise)}$$

*rms – root mean square*



# Definiciones clave

## Key Definitions

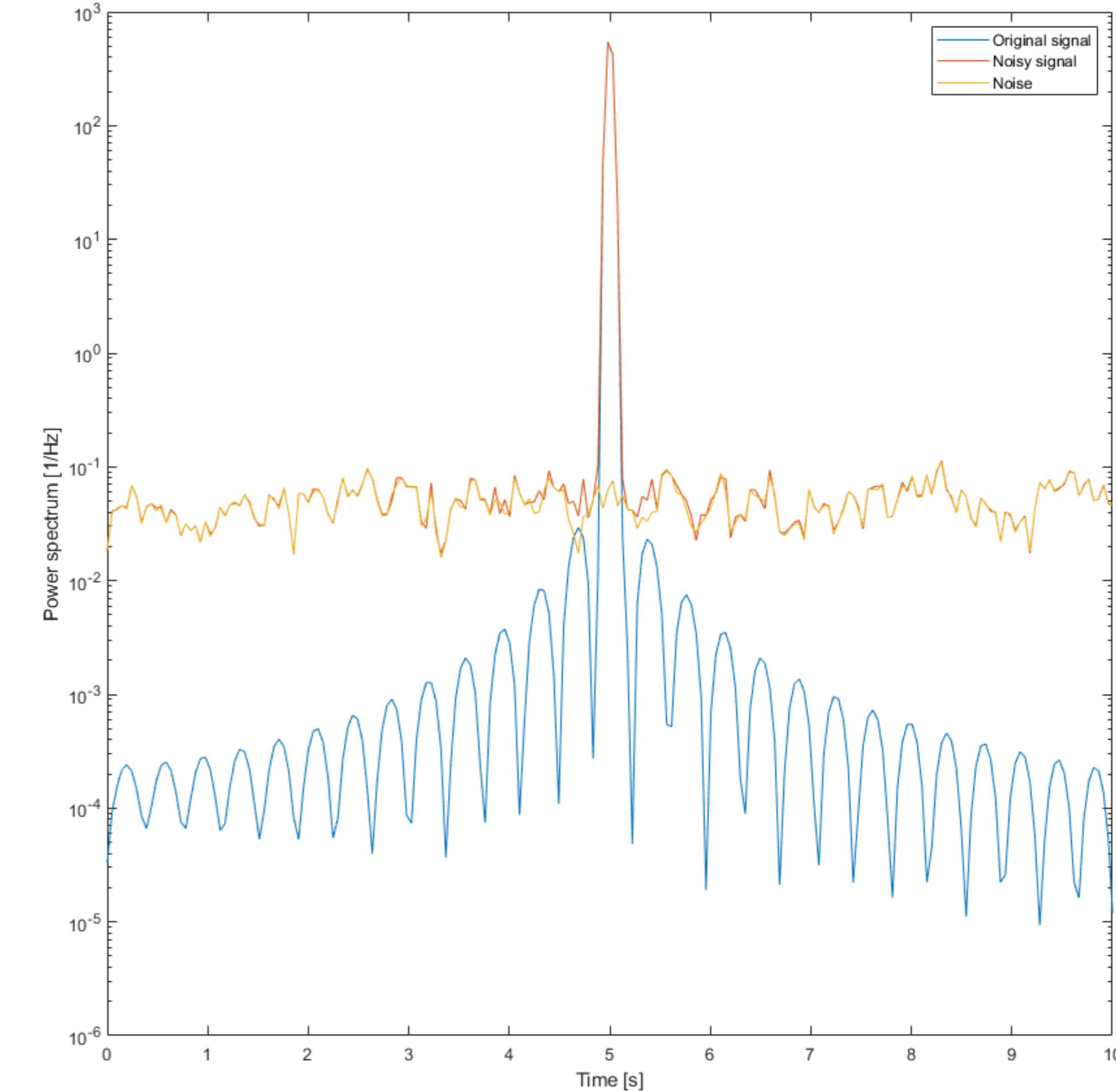
- Error and signal-to-noise ratio

El error es la diferencia entre el estado medido y el valor real o verdadero. La relación señal-ruido (**signal-to-noise ratio SNR**) es el nivel de ruido presente en las mediciones. Puede definirse como la relación entre la potencia media de una señal y la potencia del ruido de fondo:

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}}$$

o alternativamente como:

$$SNR = \frac{rms(signal)}{rms(noise)}$$



*rms – root mean square*

# Definiciones clave

## Key Definitions

- Range, resolution, sensitivity, and gauge factor

**Rango (range)**: conjunto de valores que puede medir un sensor, a menudo expresados en forma de intervalo.

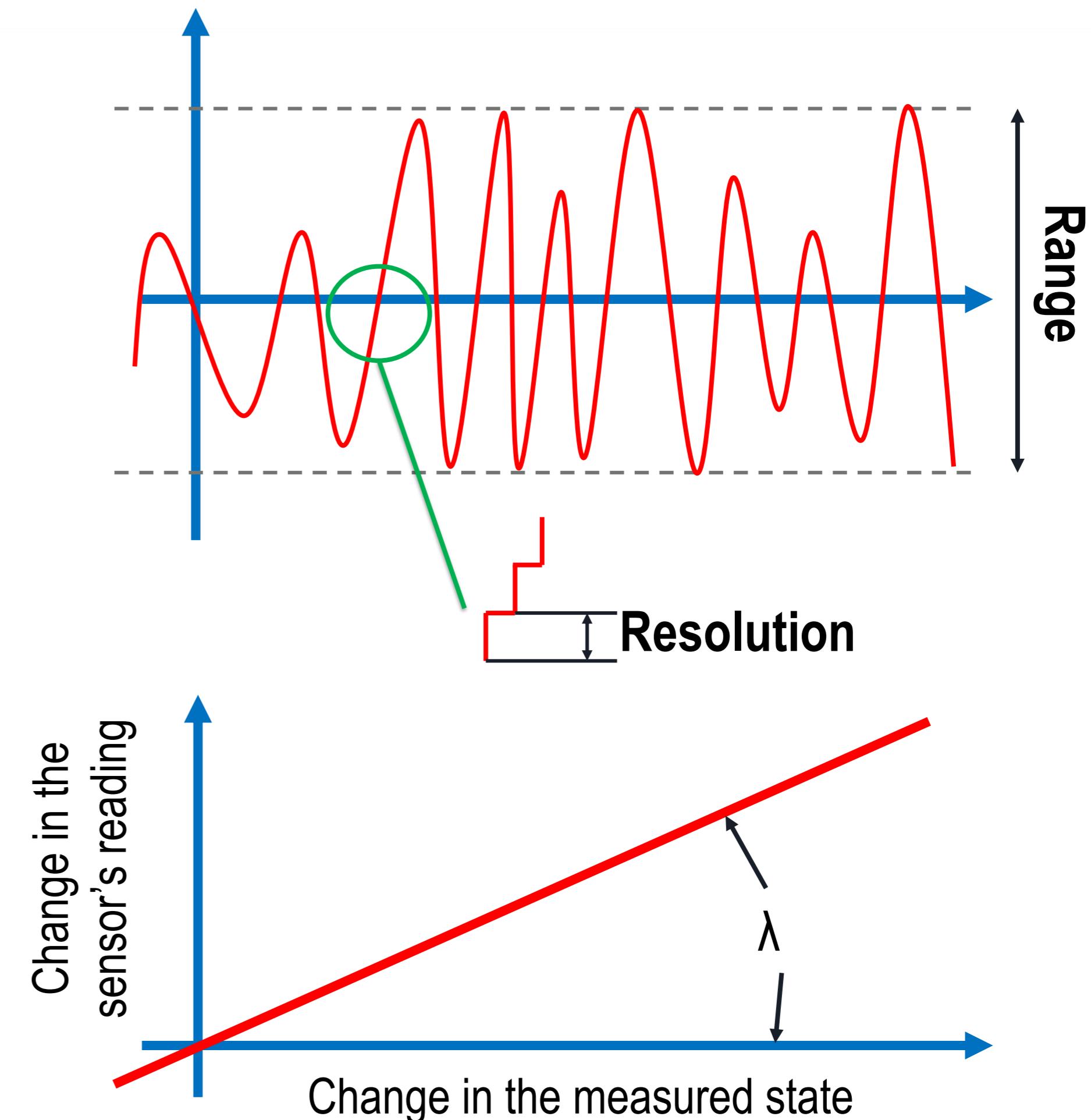
**Resolución (Resolution)**: cambio de estado más pequeño medible por un sensor.

**Sensibilidad (Sensitivity)**: el cambio de estado más pequeño que se puede detectar a partir de la lectura de un sensor.

**Factor de galga (Gauge factor)**: a menudo notado como  $\lambda$  or GF, relación entre el cambio en la lectura del sensor y el cambio en el estado medido.

El factor de galga es una propiedad del propio sensor y, a menudo, depende de las propiedades del material y/o la configuración mecánica.

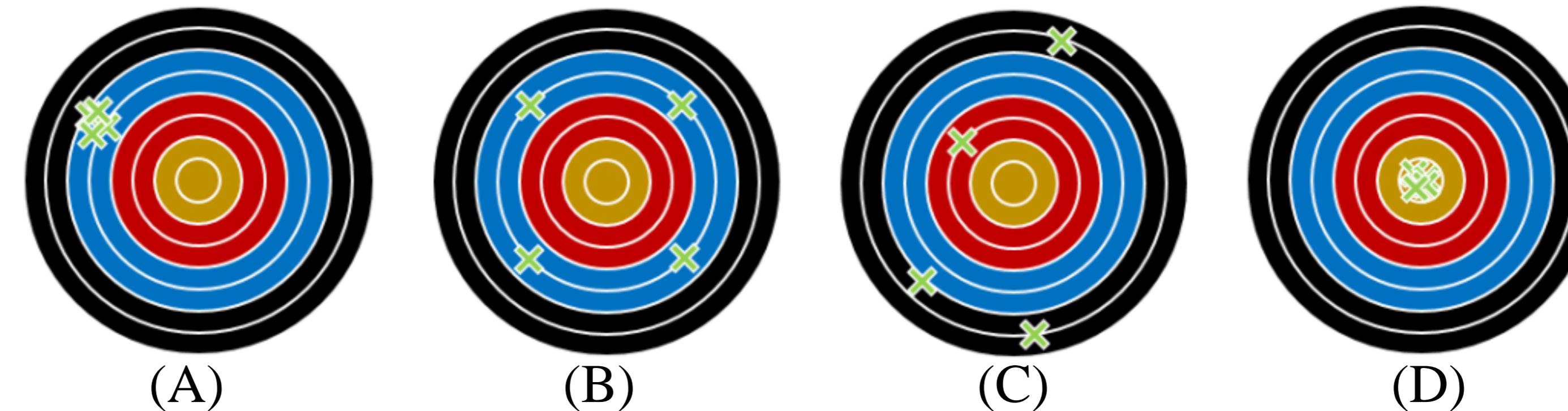
El rango, la resolución y la sensibilidad son propiedades que dependen del sistema de adquisición de datos. La resolución es una función de los bits del convertidor analógico-digital (ADC). La sensibilidad se puede tomar como la resolución del sensor multiplicada por el nivel de ruido.



## Key Definitions

- **Precision and accuracy**

La **precisión (Precision)** es lo cerca que están las mediciones consecutivas entre sí. La **exactitud (accuracy)** es qué tan cerca están las mediciones del valor real o verdadero. La precisión y la exactitud son dos conceptos independientes, como se muestra en la siguiente figura. La figura (A) ilustra un lanzamiento preciso de baja exactitud pero alta precisión, donde todos los dardos aterrizaron cerca pero lejos del centro. La Fig. (B) ilustra un lanzamiento preciso de baja precisión, donde los dardos cayeron cerca del centro, pero no cerca entre sí. En la figura (C) no se logra ni alta precisión ni alta exactitud, mientras que la figura (D) ilustra un lanzamiento muy preciso y exacto. En las mediciones, se puede calibrar un sensor preciso pero no exacto para lograr precisión, mientras que un conjunto de mediciones exactas pero no precisas se puede promediar para lograr precisión.



# Sensores

## **Lista de sensores disponibles en SHM**

sensor	measured state
accelerometer	acceleration
anenometer	wind speed
barometer	atmospheric pressure
elasto-magnetic	force
fiber optics	light transmission
global positioning system (GPS)	location
hygrometer	humidity
LiDAR	distance
linear variable differential transformer (LVDT)	displacement
microphone	sound waves
photosensor	light
pluviometer	precipitation amount
radar	distance/speed
seismometer	ground acceleration
strain gauge	strain
thermocouple	temperature
tiltmeter	angle
total station	distance
vibrating wire	force
video camera	image
weigh-in-motion	vehicle weight



## Algunos sensores clave

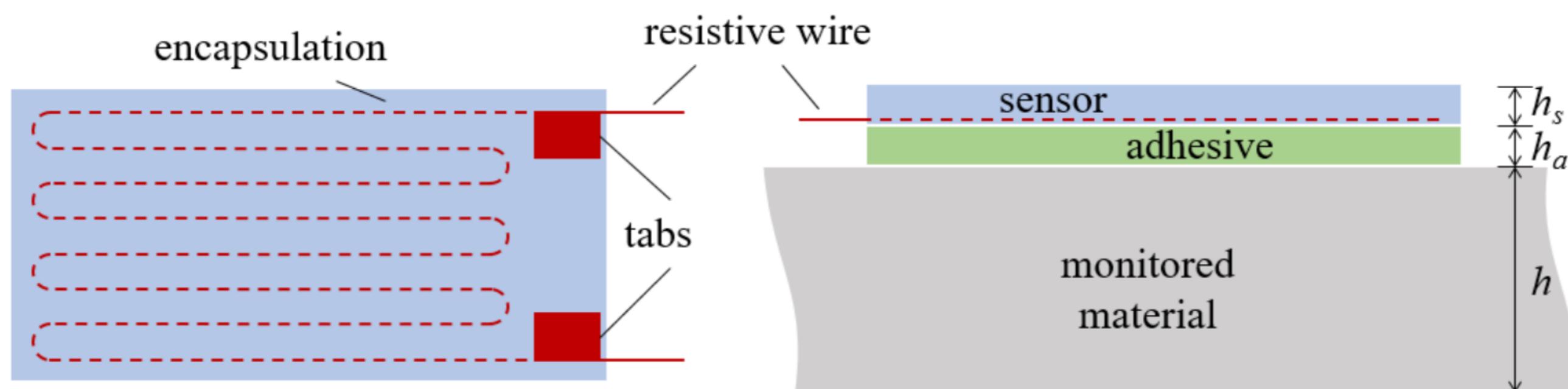
- Galgas extensiométricas (Resistive strain gauges)
- Células de presión (Load cells)
- Acelerómetros (Accelerometers)
- Inclinómetros (Tiltmeters/inclinometers)
- Extensómetros (LVDTs)
- Sensores de corrosión (Corrosion sensors)
- Fibra óptica (Fiber optics)



## Algunos sensores clave

### Galgas extensiométricas

Las galgas extensiométricas resitivas se encuentran entre los sensores más utilizados en SHM. Por lo general, son de pequeño tamaño y se pueden configurar de varias formas para medir la **deformación** lineal o el corte/par a lo largo de diferentes ejes. Una configuración común de galgas son las galgas extensiométricas resitivas lineales. La variación en la resistencia eléctrica cuando la galga se ve sometida a una acción mecánica puede relacionarse con la deformación en la estructura a través de un factor de galga. El alambre resistivo se encapsula en un sustrato que se adhiere a una superficie monitorizada usando un adhesivo.



# Algunos sensores clave

# Células de presión

Las células de carga son sensores que convierten diferentes tipos de cargas (tensión, compresión, flexión, cizallamiento, etc.) en una señal eléctrica.

- Hydraulic load cells
  - Pneumatic load cells
  - Piezoelectric load cells
  - Capacitive Load cells
  - Vibration wire Load cells
  - Strain-Gauge load cells

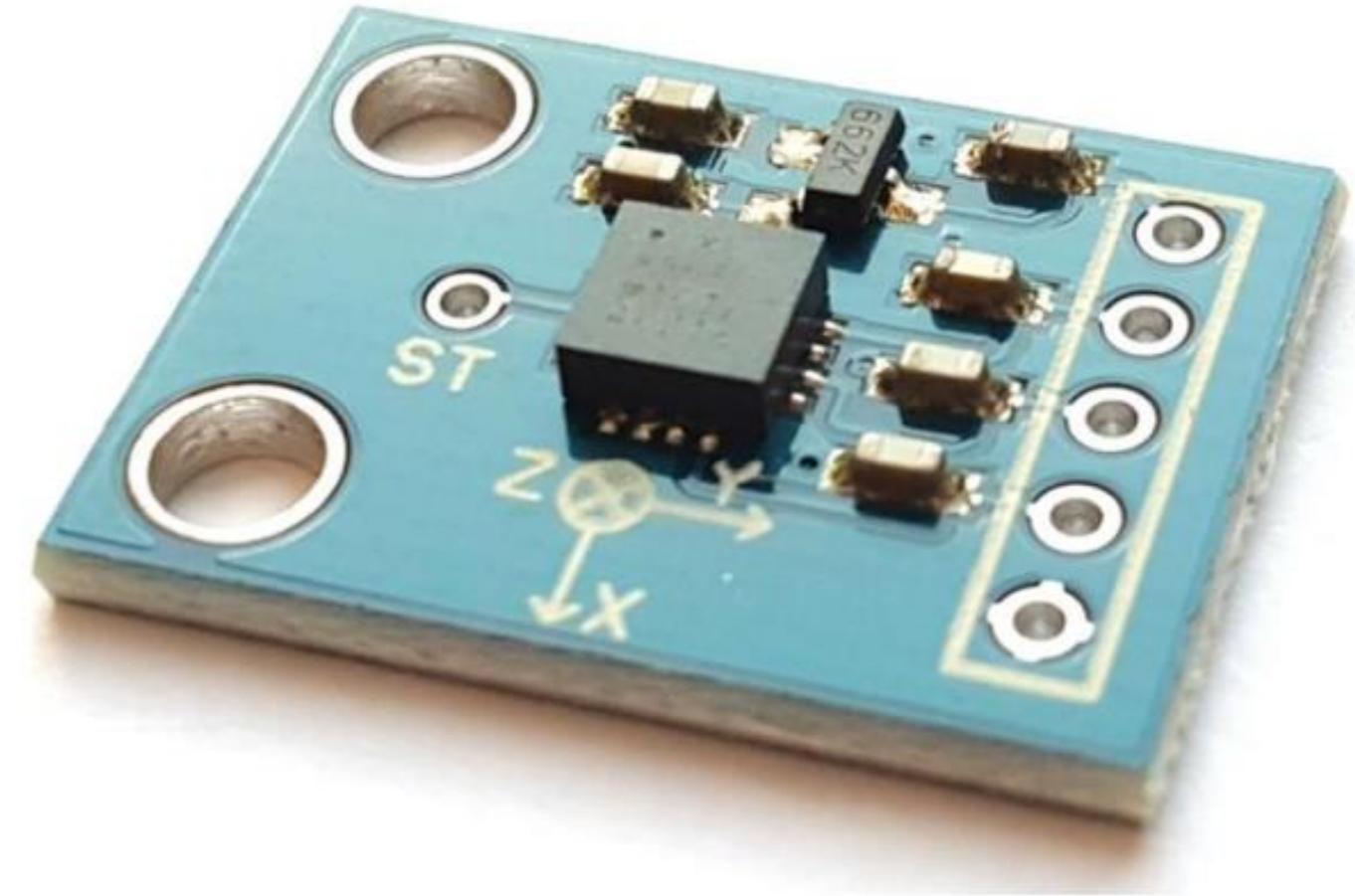


## Acelerómetros

Un acelerómetro es un dispositivo electromecánico que se utiliza para medir las fuerzas de aceleración. Dichas fuerzas pueden ser estáticas, como la fuerza continua de la gravedad, o dinámicas para detectar movimientos o vibraciones.

### Tipos de acelerómetros

- Force-balance
- Capacitive
- Piezoelectric
- MEMS



## Algunos sensores clave

### Acelerómetros de fuerza balanceada

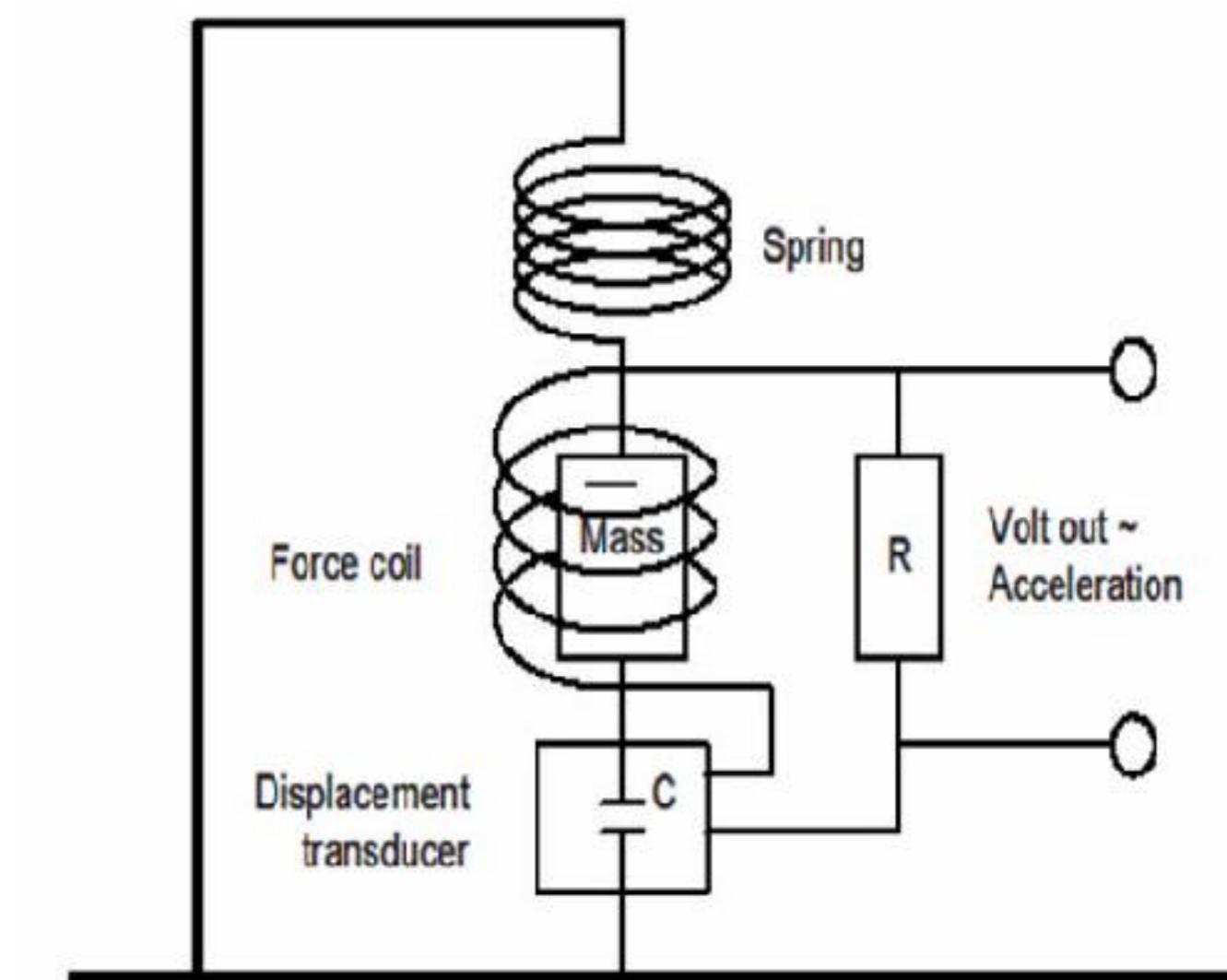
Un acelerómetro de fuerza balanceada utiliza un sistema de control de retroalimentación activa para controlar la posición de una masa de prueba. Cuando se acelera la carcasa del sensor, la masa de prueba dentro del sensor intenta permanecer estacionaria con respecto al marco. Esto hace que la masa de prueba se aleje de su posición nominal. Este movimiento relativo se detecta mediante un sensor de desplazamiento (a menudo capacitivo), que produce una señal en el sistema de control. Esto hace que la corriente fluya a través del elemento generador de fuerza que equilibra la fuerza debida a la aceleración. Finalmente, la corriente a la fuerza aplicada está relacionada con la aceleración de la masa de prueba.

#### Ventajas

- Muy utilizado para monitorizar estructuras civiles debido a su alta sensibilidad y buena resolución a bajas frecuencias.
- Relativamente insensible a los efectos térmicos y bajas no linealidades.

#### Desventajas

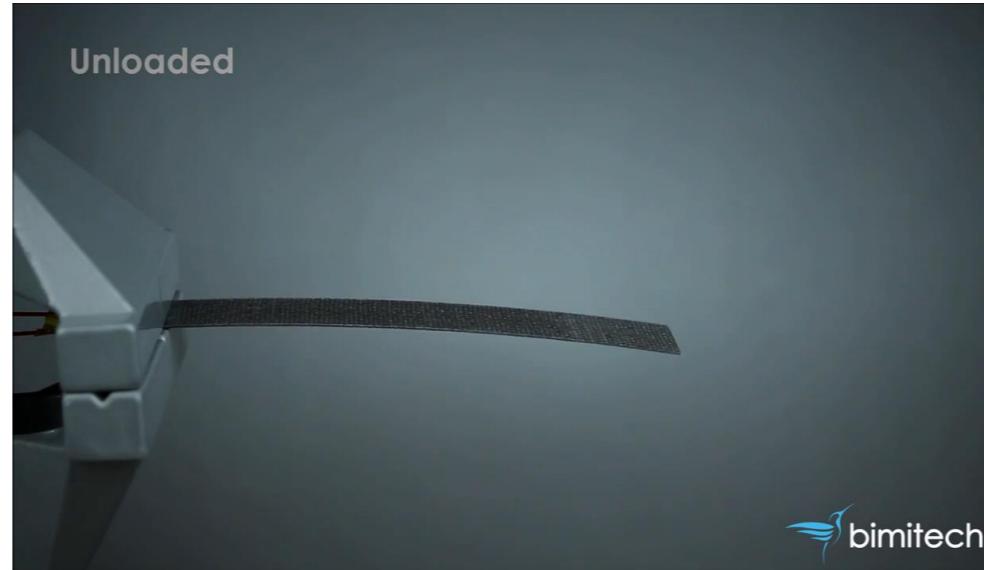
- Su mayor inconveniente es el mecanismo de control, que encarece el sensor y limita el ancho de banda del sensor a frecuencias relativamente bajas.



## Algunos sensores clave

<https://www.youtube.com/watch?v=TBy9kzPEDNs>

### Acelerómetros piezoeléctricos



Un acelerómetro piezoeléctrico es aquel que emplea el efecto piezoeléctrico de ciertos materiales para medir la aceleración en la estructura. Estos acelerómetros se utilizan con frecuencia en la monitorización de estructuras de ingeniería civil y del patrimonio cultural.

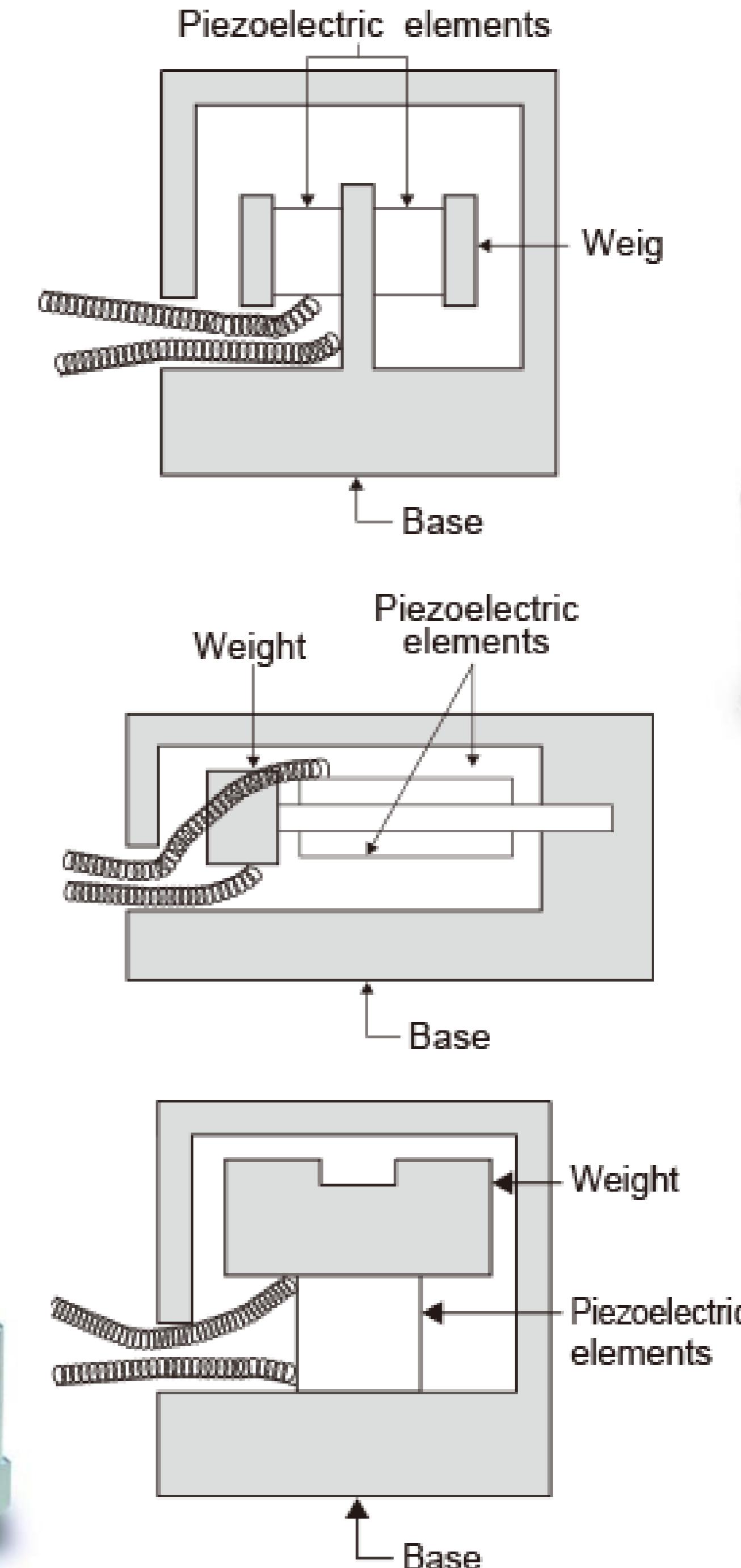
Los acelerómetros piezoeléctricos suelen utilizar una de tres configuraciones diferentes: el modo de corte, el modo de flexión o de compresión.

#### Ventajas

- Amplio rango de frecuencia, se pueden medir altas frecuencias.
- Alta sensibilidad.
- Excelente linealidad en su rango dinámico.
- Los acelerómetros piezoeléctricos son pequeños y de construcción robusta.

#### Desventajas

- Estos acelerómetros no pueden medir aceleraciones estáticas.
- Rango de temperatura limitado.
- No trabajan bien para rangos de frecuencias muy bajos.



## Algunos sensores clave

### Acelerómetros capacitivos

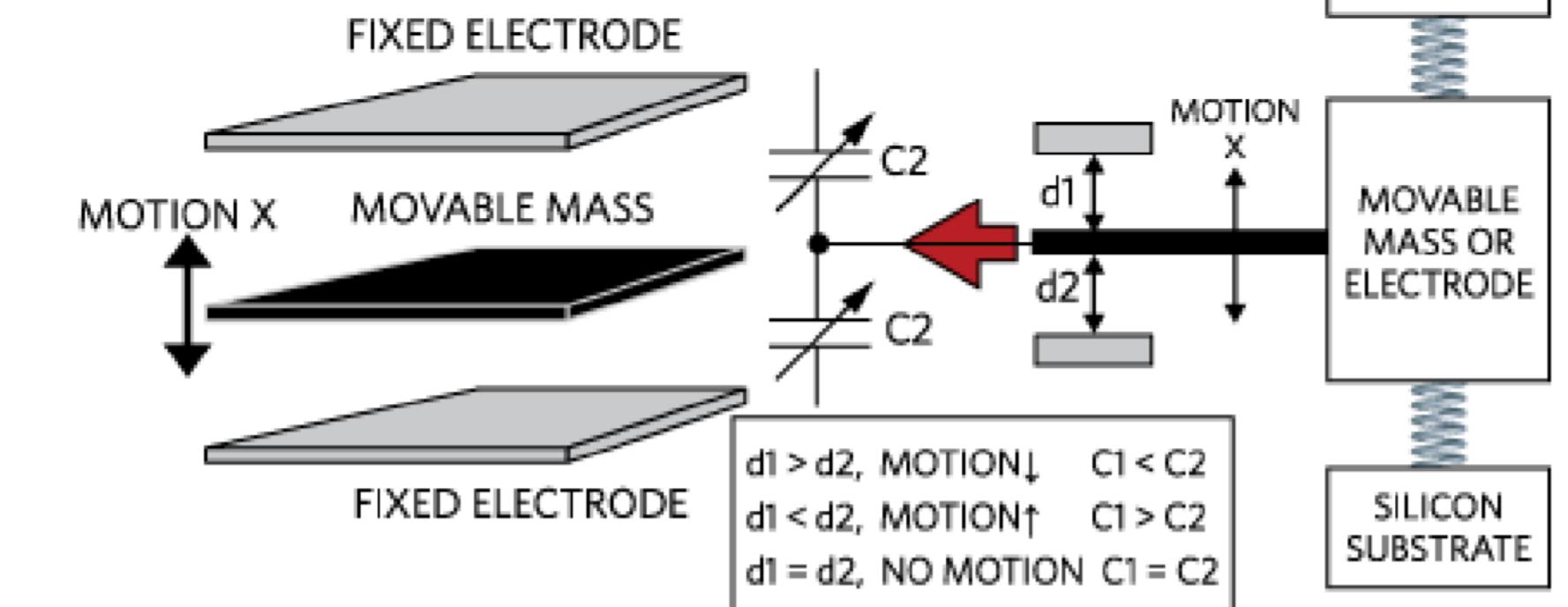
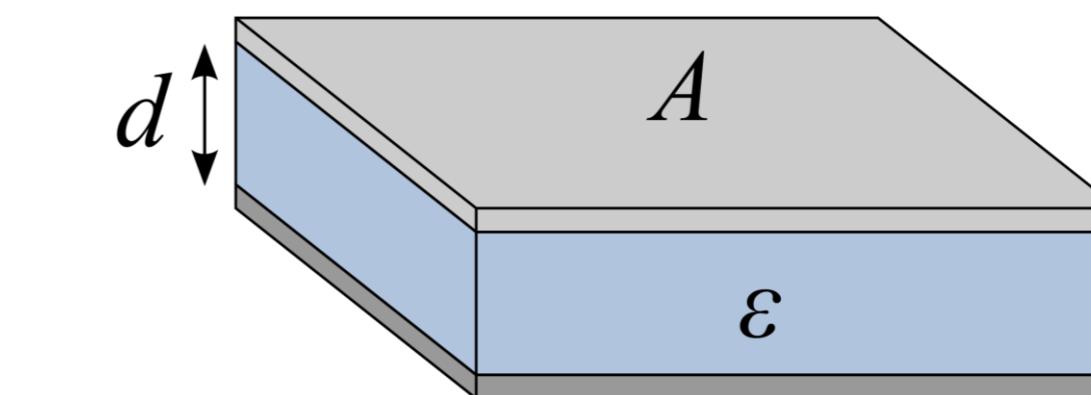
Un acelerómetro capacitivo utiliza el desplazamiento de una masa de prueba con respecto a la carcasa del acelerómetro para determinar la aceleración que está experimentando el sensor. Los movimientos de una masa de prueba suspendida entre dos placas modifican la capacitancia del sensor pudiendo medir así la aceleración del sistema.

#### Ventajas

Los acelerómetros capacitivos son ventajosos para la monitorización de grandes estructuras porque pueden adquirir mediciones en un amplio rango de frecuencias, incluida la aceleración estática.

#### Desventajas

Susceptibles a las variaciones de temperatura y humedad y son relativamente frágiles.

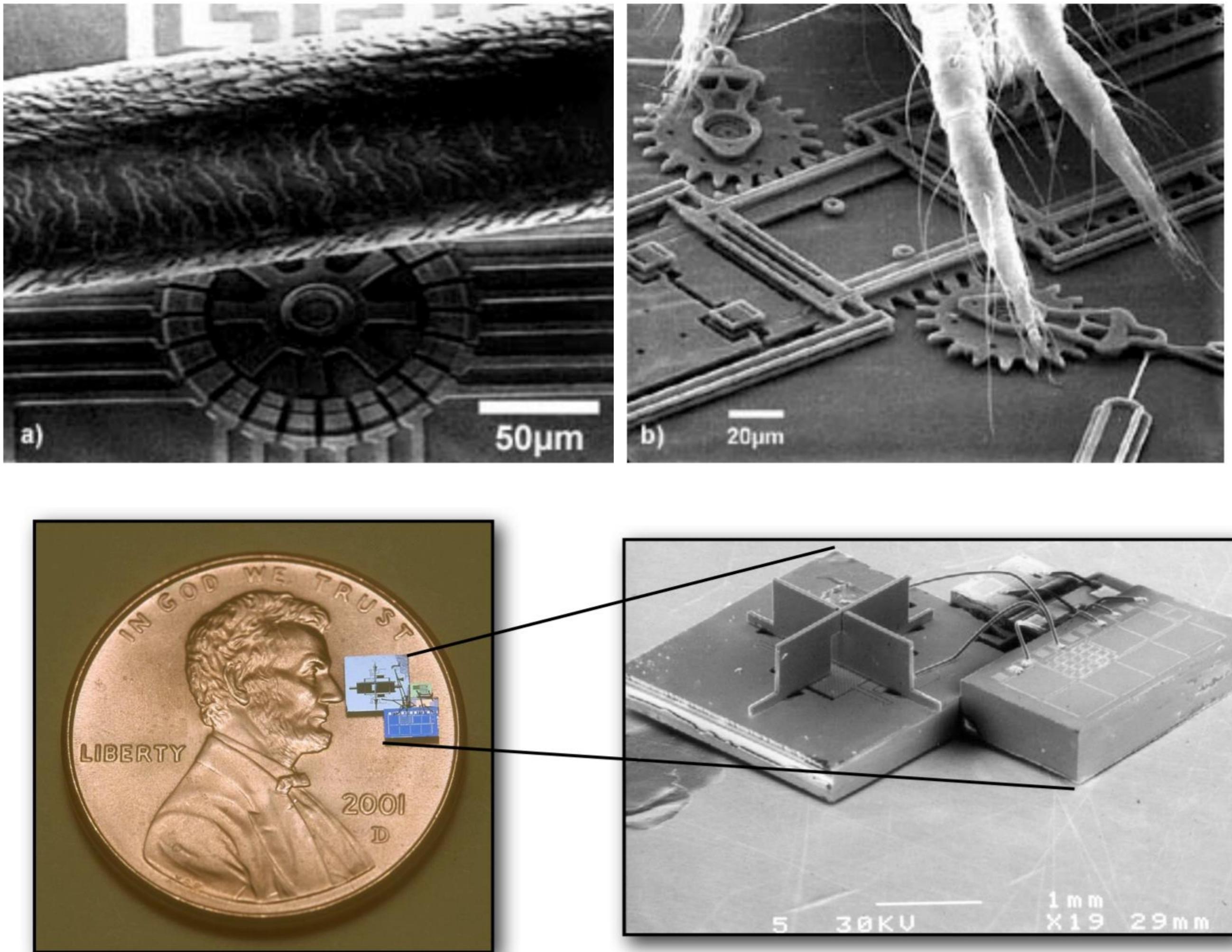


## Algunos sensores clave

### MEMS (micro electromechanical systems)

Los sistemas microelectromecánicos (MEMS) son una tecnología de proceso utilizada para crear pequeños dispositivos o sistemas integrados que combinan componentes mecánicos y eléctricos. Se fabrican utilizando técnicas de procesamiento por lotes de circuitos integrados (IC) y pueden variar en tamaño desde unos pocos micrómetros hasta milímetros.

En la forma más general, los MEMS consisten en microestructuras mecánicas, microsensores, microactuadores y microelectrónica, todos integrados en el mismo chip de silicio.



# Algunos sensores clave

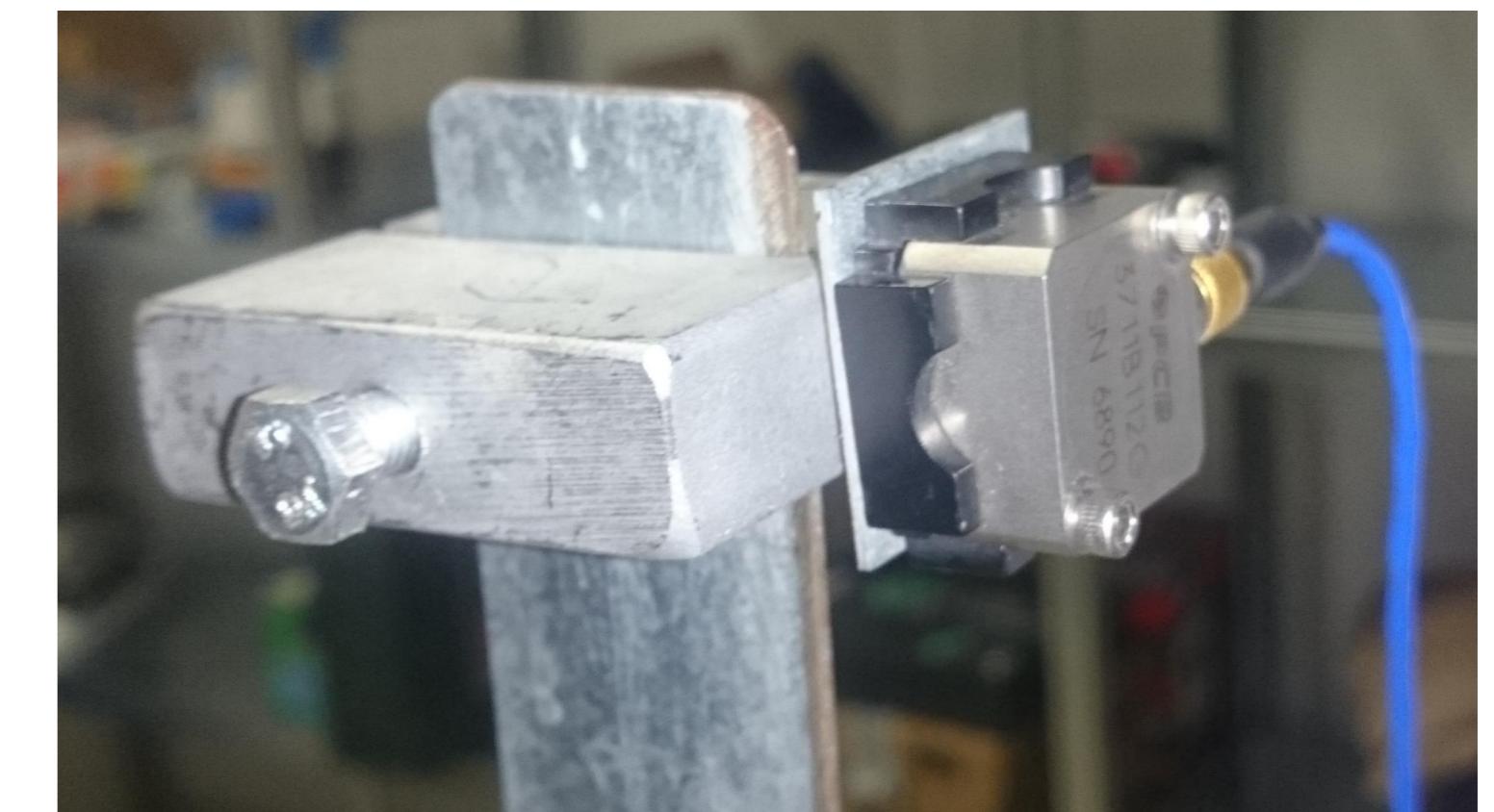
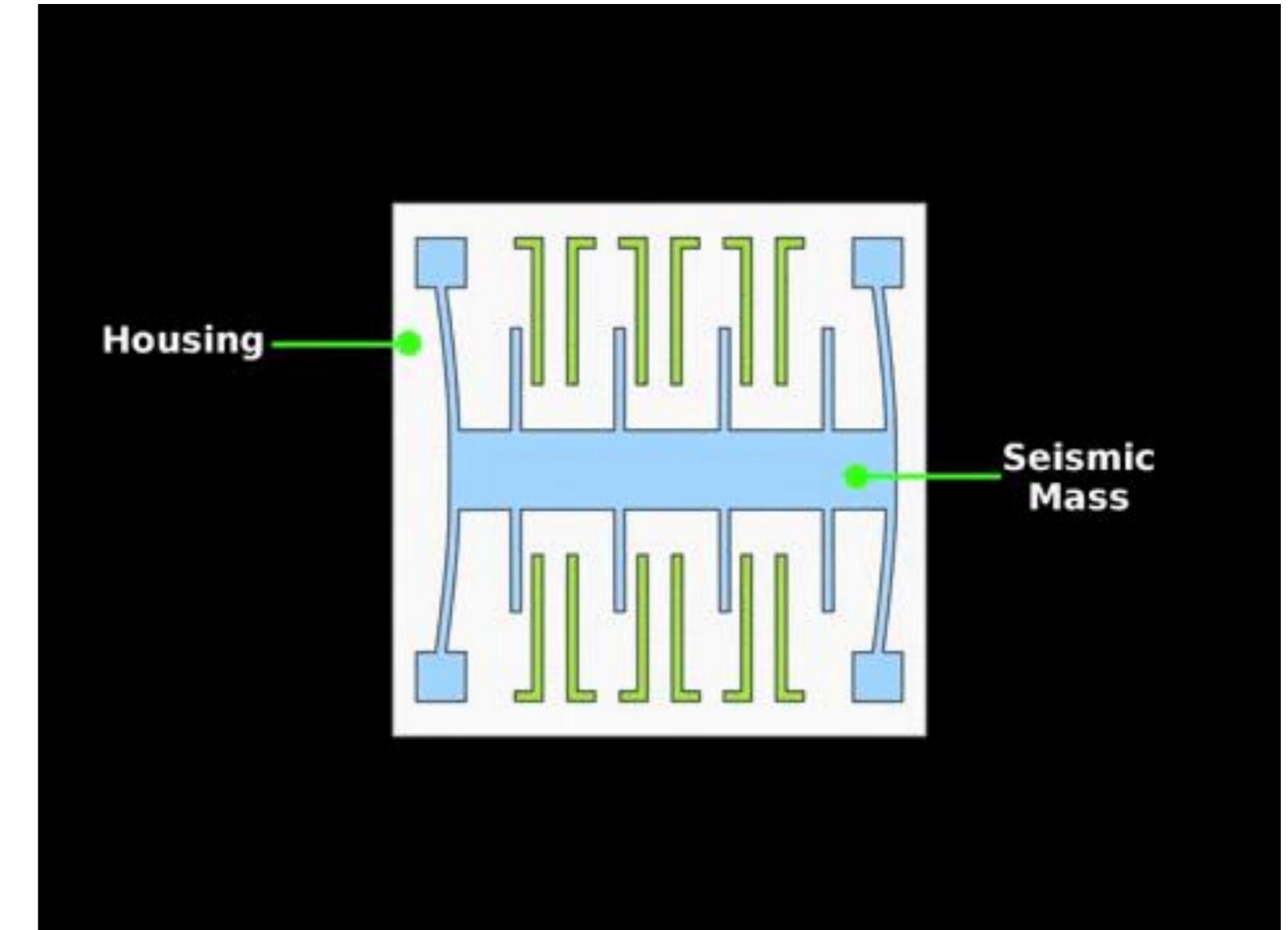
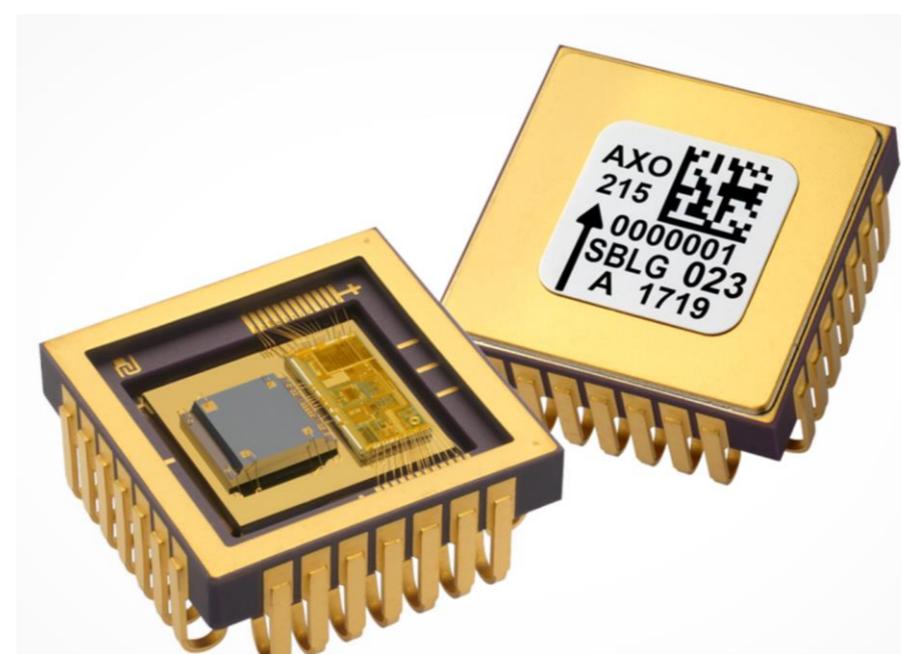
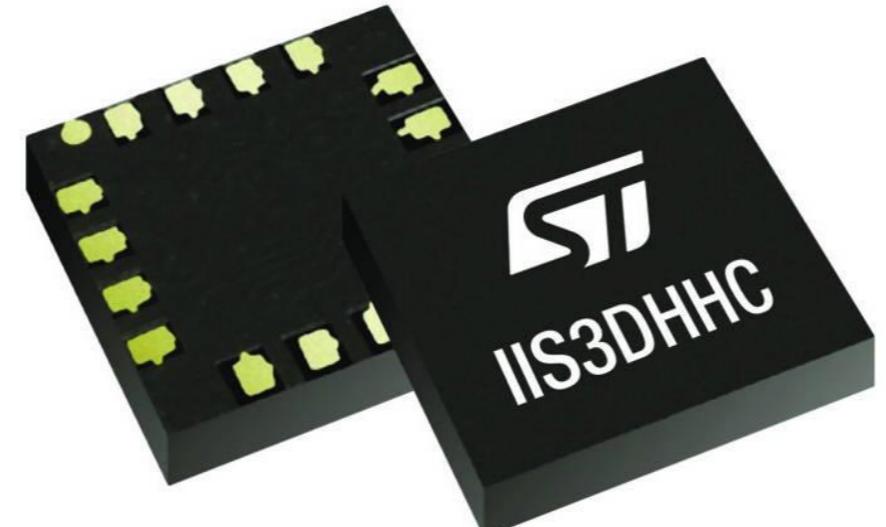
Existe una gran variedad de sensores (acelerómetros, sensores de presión ... etc) y actuadores MEMS.

## Ventajas

- Gran flexibilidad en el diseño.
- Puede medir aceleraciones estáticas.
- Pequeños y económicos.

## Desventajas

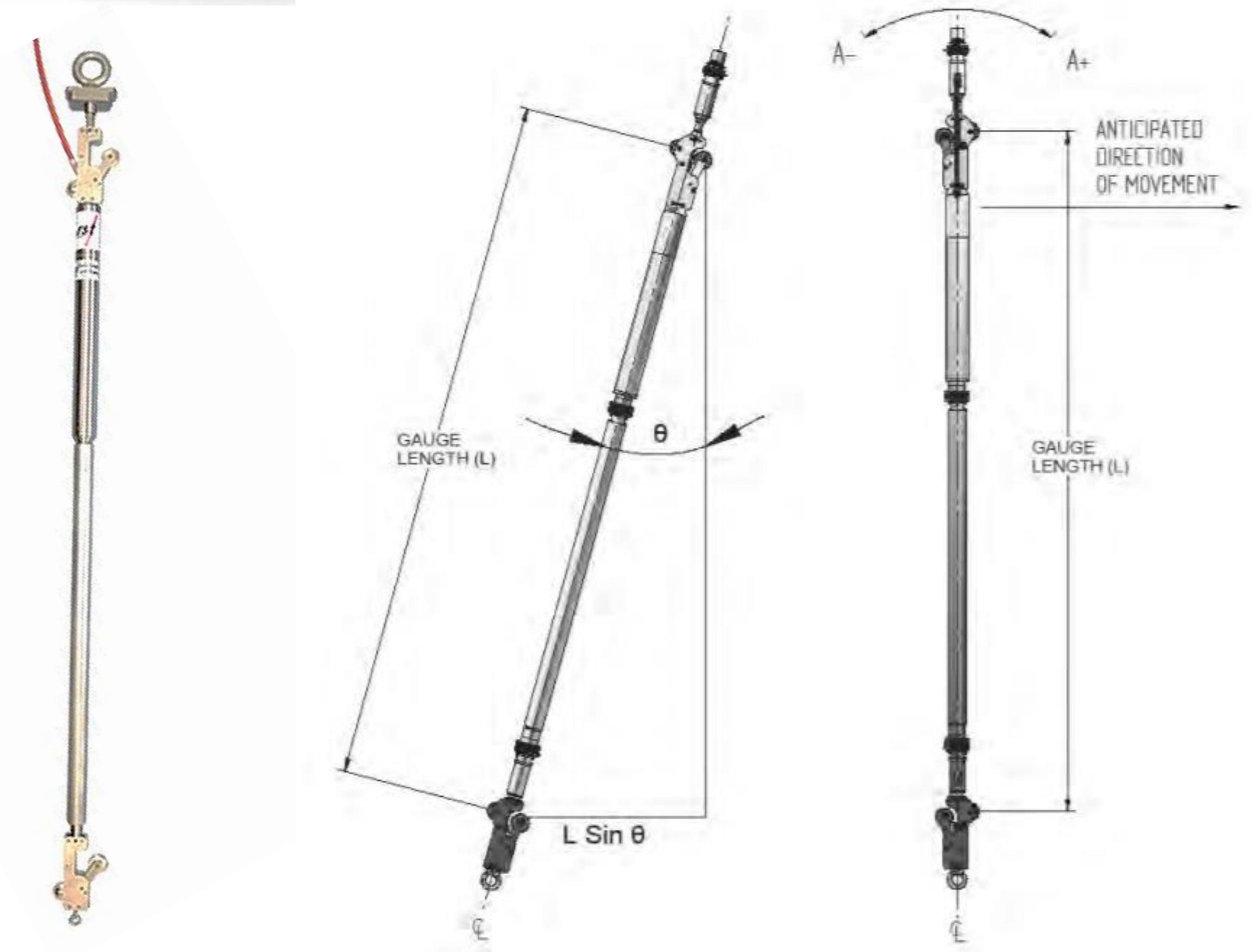
- Baja sensibilidad.
- Pequeño rango dinámico.



## Algunos sensores clave

### Inclinómetros

Un inclinómetro es un instrumento que se utiliza para medir ángulos de pendiente (o inclinación), elevación o depresión de un objeto con respecto a la dirección de la gravedad.

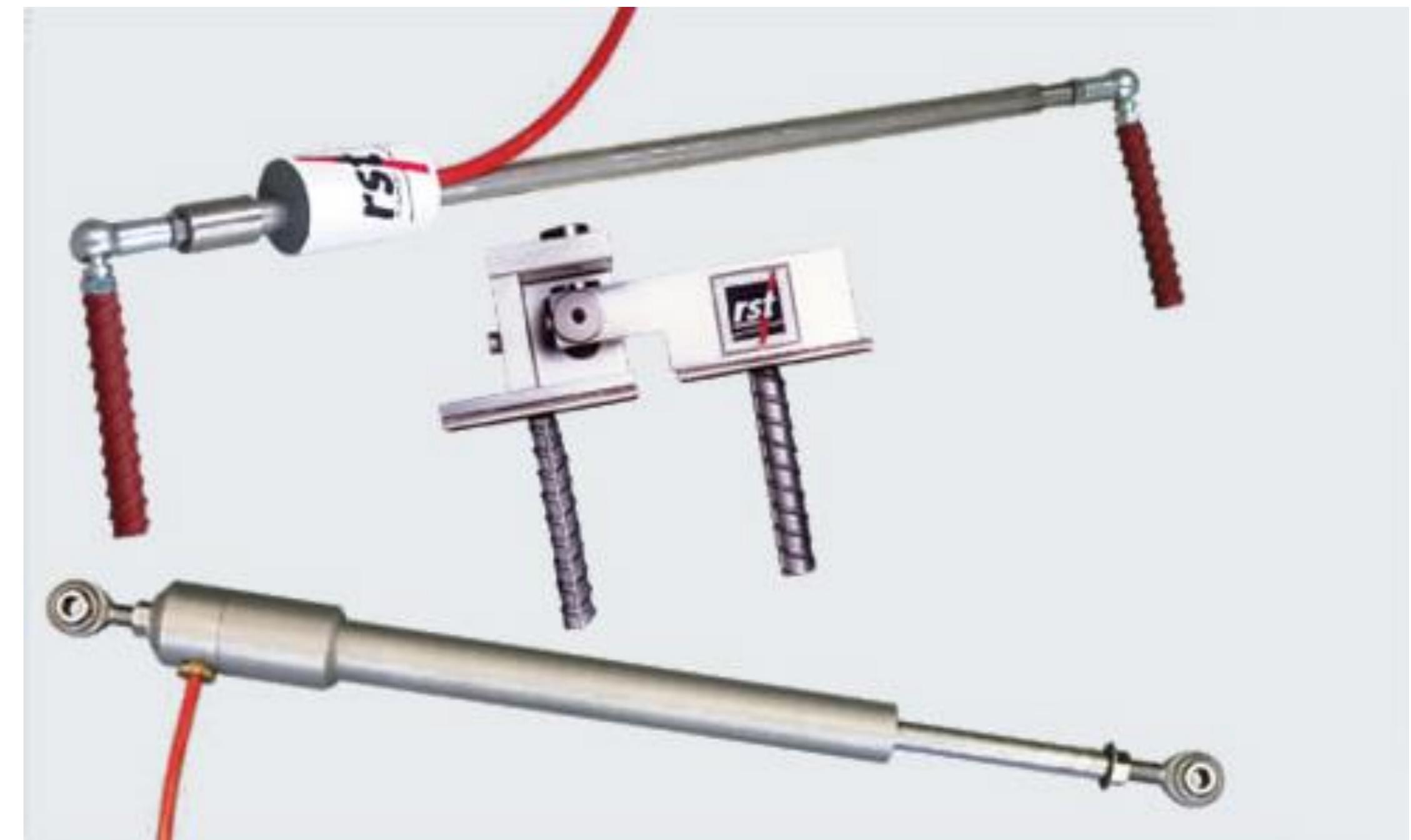


## Algunos sensores clave

### LVDTs

Los LVDT (linear variable differential transformers) son sensores electromecánicos que se utilizan para el desplazamiento entre dos puntos en una señal eléctrica. Consisten en un cilindro metálico hueco en el que un eje de menor diámetro se mueve libremente hacia adelante y hacia atrás a lo largo del eje largo del cilindro. El movimiento relativo entre los extremos del LVDT se traduce en un desplazamiento del núcleo dentro del cilindro, el cual se convierte en una señal eléctrica medible.

Puede utilizarse para mediciones estáticas y dinámicas.

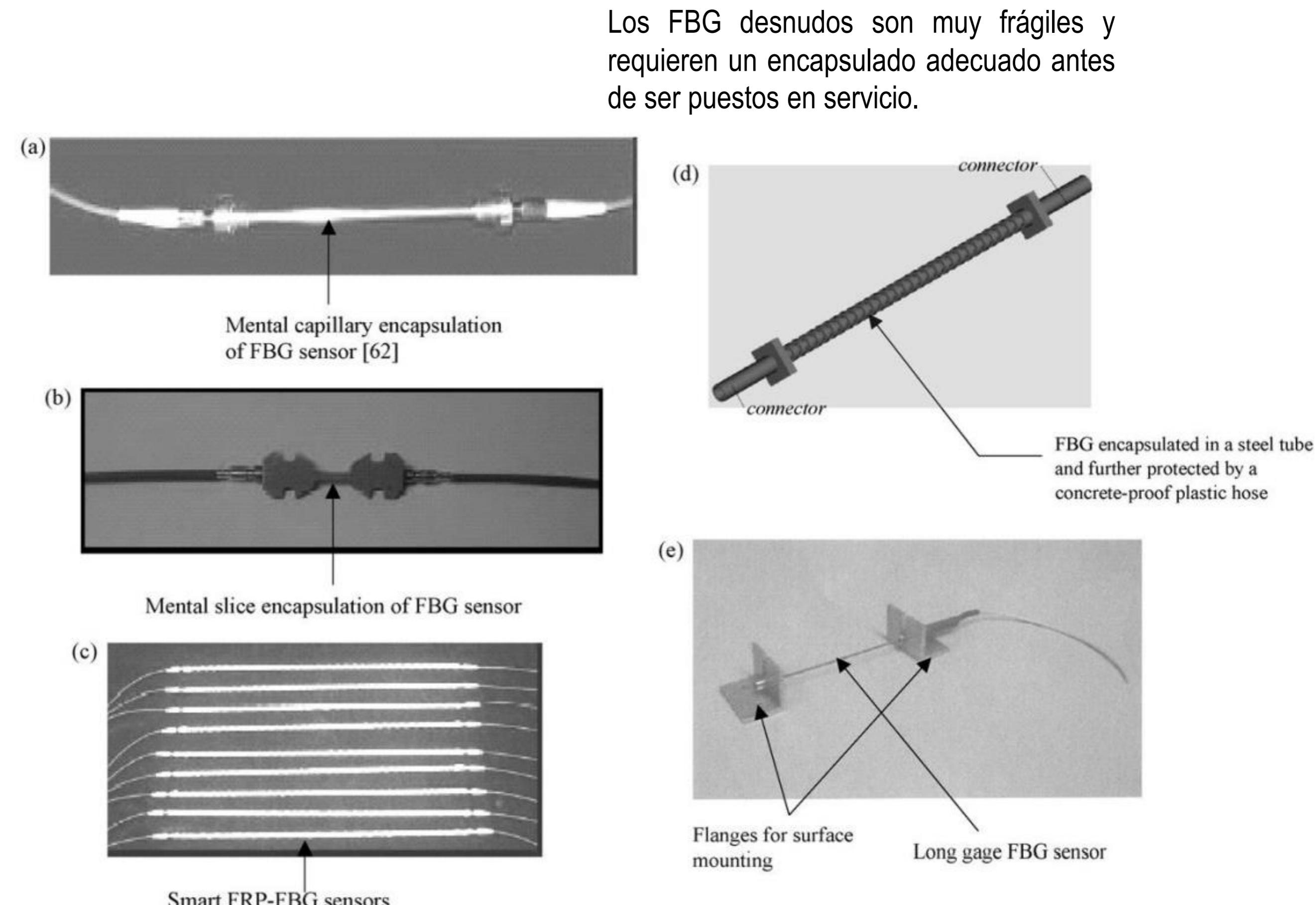
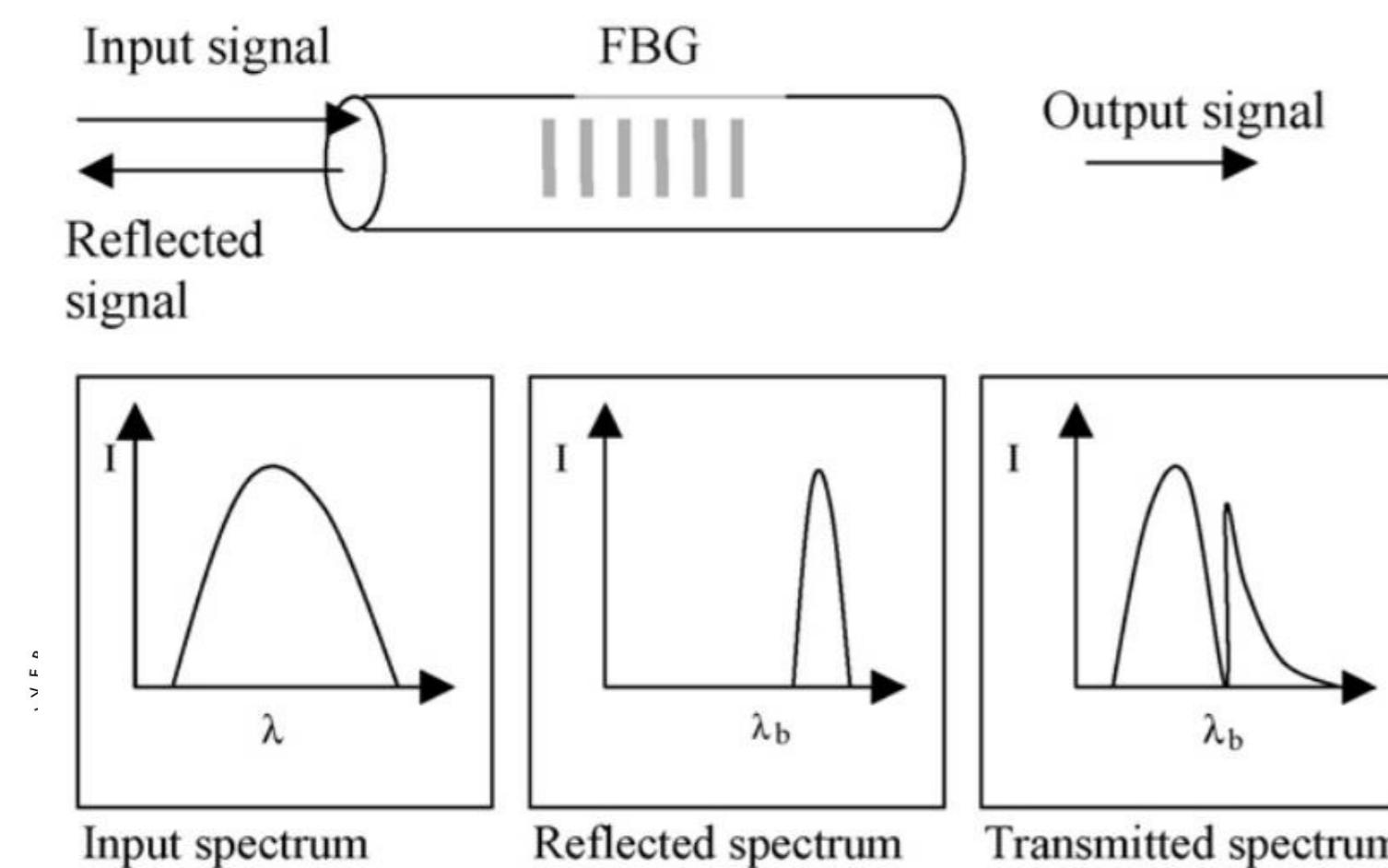


## Algunos sensores clave

### Fiber Optics – Fiber Bragg grating (FBG) sensors

Los FBG se obtienen creando variaciones periódicas en el índice de refracción del núcleo de una fibra óptica. Cuando se hace que la luz pase a través de la rejilla, parte del espectro de la onda de entrada se verá reflejada con una longitud de onda particular, llamada longitud de onda de Bragg. La longitud de onda de Bragg se expresa como  $\lambda_{h1} = 2n\Lambda_1$  ( $\lambda_{h1}$  - longitud de onda de Bragg;  $n$  – es el índice de refracción efectivo;  $\Lambda_1$  - período de la rejilla).

**El índice de refracción depende del estado de deformación de la fibra y la temperatura, por lo que estos sensores actúan simultáneamente como sensores de temperatura y deformación.**



Majumder, M., Gangopadhyay, T. K., Chakraborty, A. K., Dasgupta, K., & Bhattacharya, D. K. (2008). Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 147(1), 150-164.

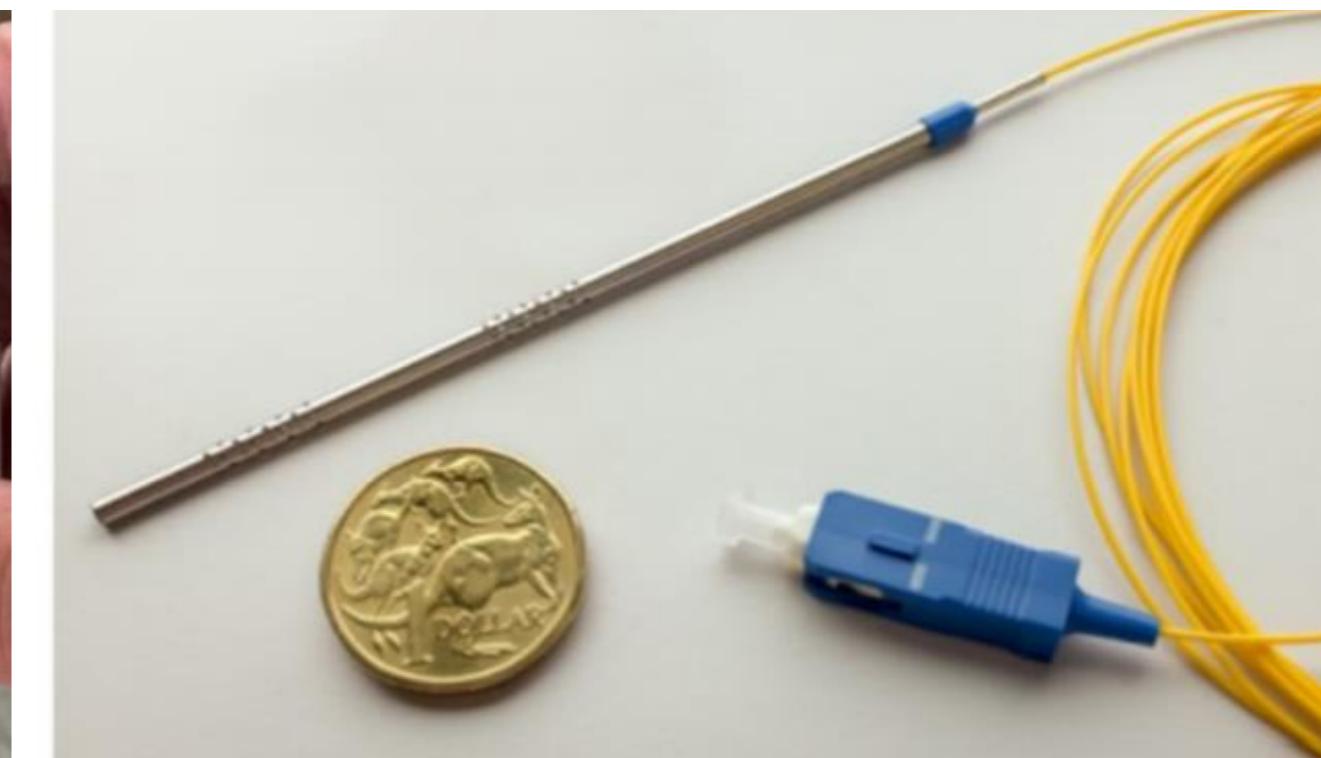
## Algunos sensores clave

## Corrosion sensors

Temperature: Embeddable temperature sensors



Humidity sensors



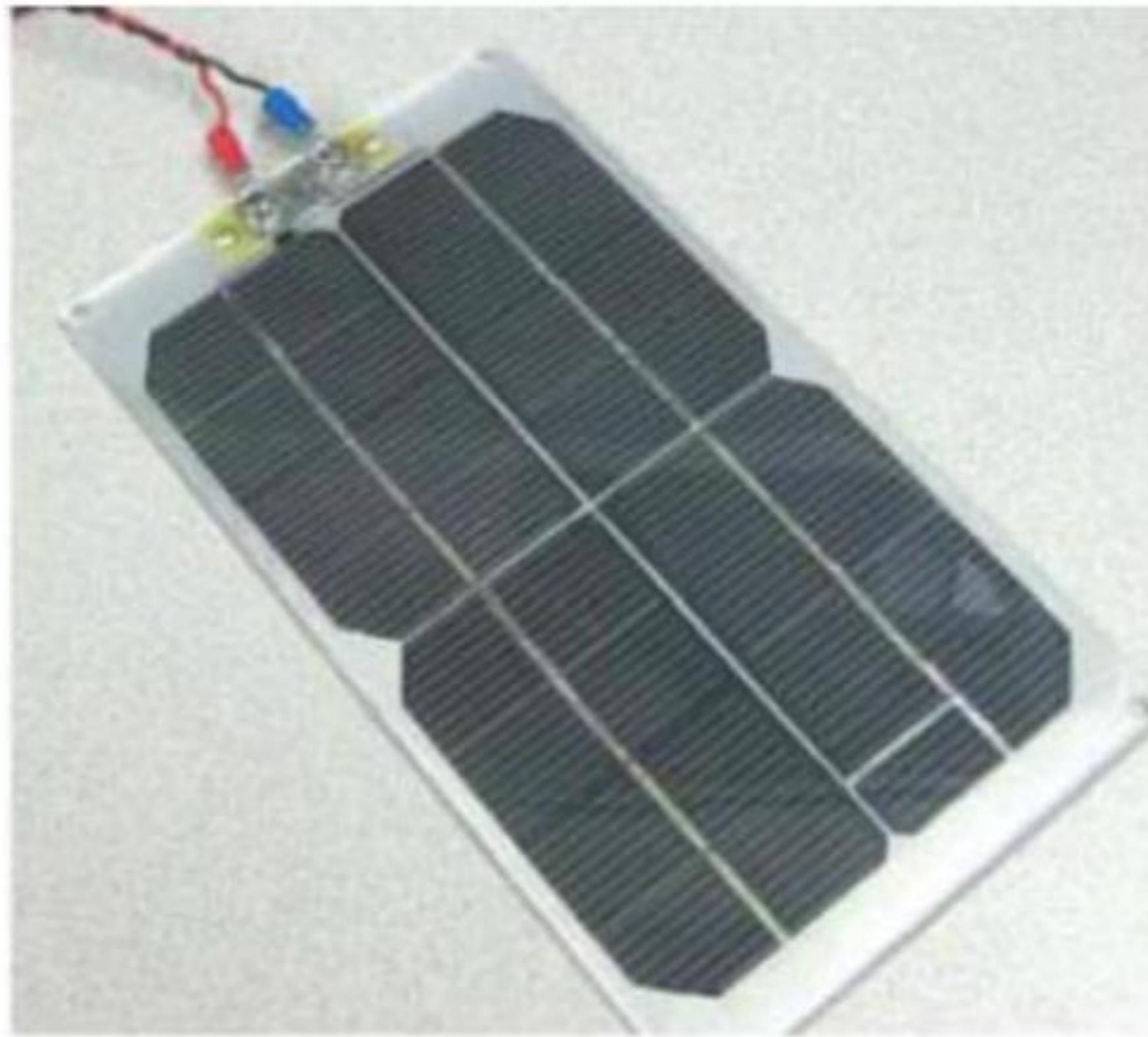
pH:

Embedded electrochemical sensors: corrosion state data (corrosion potential, concrete resistivity, and rebar corrosion rate) on a long-term cycle (2 to 5 years)



## Algunos sensores clave

### Power Supply



Jang, S., Jo, H., Cho, S., Mechitov, K., Rice, J. A., Sim, S. H., ... & Agha, G. (2010). Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using smart sensor technology: deployment and evaluation. *Smart Structures and Systems*, 6(5-6), 439-459.