

## 1. Consideraciones generales.

### 1.1. Requisitos de un refuerzo colaborante.

El planteamiento de un refuerzo colaborante: por recrecido de sección, por adhesión de chapa o adhesión de MBrace, es preciso evaluar la respuesta de la sección mixta. De este modo la respuesta final, vendrá determinada por el fallo más desfavorable: agotamiento a compresión, rasantes inasumibles en la zona de contacto, agotamiento a tracción, etc.

La evaluación detallada de la respuesta estructural del elemento incluye:

- Geometría de los elementos
- Calidad de materiales: hormigón, acero y resistencia superficial a tracción pura.
- Localización de daños, ubicación, extensión de fisuras y grietas
- Localización y extensión de corrosión en armadura interna.
- Cuantía de armadura existente
- Evaluación de cargas existentes
- De existir oxidación en la armadura, la pérdida de capacidad resistente del elemento se evaluará teniendo en cuenta la pérdida de sección resistente así como la pérdida de adherencia.

La eficiencia del refuerzo depende de la calidad del soporte: incluyéndose hormigón existente y/o mortero de reparación. La calidad del soporte debe ser capaz de transmitir los esfuerzos entre el elemento y el refuerzo adherido. Este requisito es crítico para todas las disposiciones de refuerzo, a excepción del zunchado de elementos (con solape de anillos de fibras).

Para soporte excesivamente fisurado o degradado, se precisa su reparación hasta conseguir la cohesión y solidez requerida para la eficiencia del refuerzo. En algunos casos se precisa la retirada del mortero existente y su restitución.

### 1.2. Limitaciones de la adhesión de chapas de acero.

Conceptualmente la técnica de adhesión de chapas es idéntica a la adhesión de MBrace. Asimismo trabajar con chapas de acero, conlleva varias limitaciones constructivas y de durabilidad.

- peso elevado de las chapas de acero, con dificultad para la puesta en obra y apuntalamiento. Un mal apuntalamiento puede provocar sobreexcesos de resina en aquellas zonas dónde la chapa ceda, con eventuales problemas de correcta transmisión de esfuerzos derivados de la fluencia del adhesivo.
- necesidad de empalmes y soldaduras, debido a las limitaciones de transporte y ubicación en obra (especialmente en edificación y trabajos en altura). Especial atención merecen las soldaduras y el uso de adhesivos, con necesidad de mecanismos de control del calor para evitar el deterioro de las resinas adhesivas.
- difícil adaptación a geometrías no rectas, con sobrecostos derivados de corte en taller sobre plano. Es un problema habitual en refuerzo de bóvedas, arcos y túneles.
- necesidad de mantenimiento y protección contra la oxidación a lo largo de la vida útil del refuerzo.
- control de los dispositivos de anclaje, así los eventuales daños al armado interno existente.



**Ilustración 1.- Apuntalamiento de chapa metálica.**



**Ilustración 2.- Necesidad de protección de chapas de acero expuestas en ambientes agresivos.**

En este campo de aplicación es dónde el sistema MBrace aporta numerosas ventajas derivadas de su bajo peso y elevada resistencia, de fácil corte y puesta en obra sobre soportes curvos.

### 1.3. Ventajas del sistema MBrace

Los materiales compuestos son muy ligeros (densidad de 1.7 g/cm<sup>3</sup> frente 7.8 g/cm<sup>3</sup> del acero), con elevadas propiedades resistentes (2500-4000 MPa frente 260-500 MPa del acero). Ambas propiedades permiten la aplicación de refuerzos mucho más ligeros que mediante acero, sin necesidad de apuntalamiento. De este modo los trabajos en zonas de difícil acceso (forjados sanitarios o trabajos en altura), se facilitan. La no necesidad de apuntalamiento permite la instalación desde plataformas telescópicas ligeras, sin necesidad de apuntalamiento ni cimbrado, generando las mínimas interferencias con los usos habituales de las instalaciones.

La facilidad de aplicación del Sistema MBrace:

- solventar la problemática de solapes y soldaduras
- adaptación perfecta sobre soportes curvos
- facilidad de adhesión con existencia de instalaciones
- facilidad de cruce entre refuerzos (refuerzo de forjados bidireccionales)



**Ilustración 3.- Refuerzo en paramento cóncavo, para cosido de esfuerzos previa inyección de fisuras. La fisuración se produce por acción de pretensado sobre hormigón no suficientemente endurecido.**

Los pequeños espesores permiten mantener gálibos de servicio en estructuras tales como puentes y túneles. Según el formato empleado, ante ensayo destructivo se puede plantear la reparación del laminado dañado.

#### 1.4. Limitaciones del sistema MBrace

Las principales desventajas vienen motivadas por el elevado grado de exposición de estos refuerzos y su baja capacidad de respuesta frente condiciones de alta temperatura, actos vandálicos y/o accidentes. La respuesta al fuego, muy limitada, debido a la baja resistencia de los adhesivos empleados (60 °C aprox.) es idéntica al empleo de chapa metálica. En este sentido, es preciso evaluar con detenimiento cuál es la filosofía del refuerzo: soporte de sobrecargas variables adicionales o refuerzo y función de refuerzo principal.

En general, para refuerzos adheridos, no se admite un coeficiente de seguridad (para cargas sin mayorar y materiales sin minorar) inferior a 1. Es decir, sin la presencia del refuerzo (o ante un eventual fallo de éste) la estructura, con las cargas existentes, no puede colapsar. Esto es así porqué, adicionalmente al fuego, una sucesión de accidentes (p.e. impacto de camión con volquete levantado arrancando el laminado adherido) pueden provocar la pérdida total o parcial del refuerzo existente.

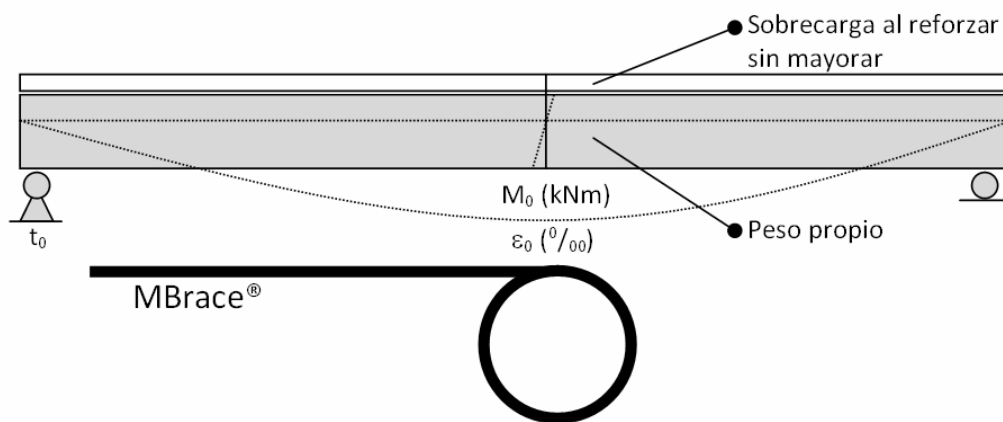
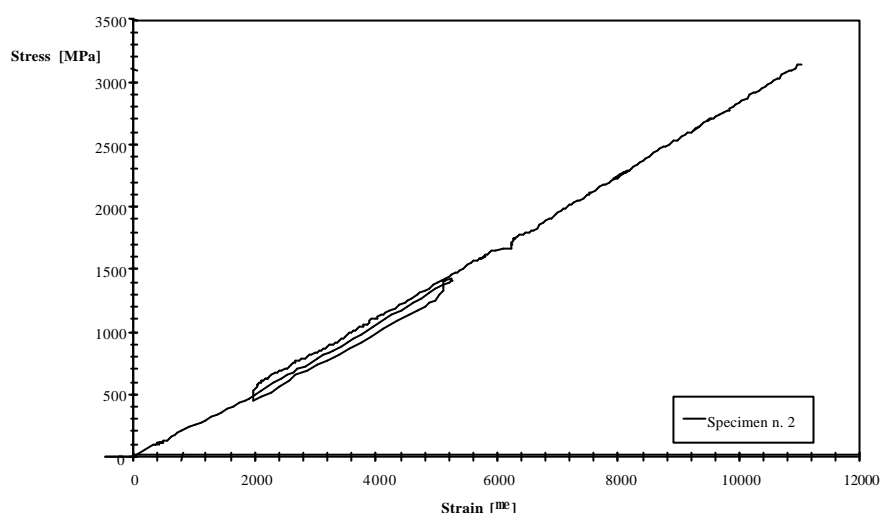


Ilustración 4.- Estabilidad de la Estructura previo al refuerzo

De las propiedades intrínsecas del material, es importante destacar, por sus inconvenientes

- Comportamiento completamente lineal hasta rotura, sin plastificación previa y rotura frágil, provocando una pérdida de ductilidad global de la estructura.



**Ilustración 5.- Comportamiento elástico lineal de una muestra de MBrace.**

- Orientación unidireccional e anisótropa, no admitiendo anclajes pasantes, basando la transmisión de esfuerzos, de modo exclusivo, a mecanismos adherentes, a merced de la eficacia de los adhesivos, del soporte y de las condiciones de aplicación (existencia o no de polvo).
- Limitación de la eficiencia del refuerzo según la calidad resistente del soporte, al ser éste el limitante bajo fenómenos de arrancamiento y falta de adherencia, el crítico.
- Necesidad de correcta ejecución del refuerzo in situ, con un comportamiento binario: o plena contribución o nula contribución.



**Ilustración 6.- Ensayo de control de calidad con mala impregnación del material compuesto.**

### 1.5. Vida útil de diseño.

En el documento de The Highways Agency BD 84/02 "Strengthening of concrete bridge supports for vehicle impact using fibre reinforced polymers", se define en 30 años como vida útil del sistema de refuerzo. Se hereda la experiencia acumulada mediante adhesión de chapa metálica. En Aeronáutica la experiencia es de 40 años. Asimismo se recomienda el mantenimiento e inspecciones periódicas para refuerzos en centrales nucleares y puentes. En puentes y estructuras con mantenimiento, se plantea la adhesión de material adicional que se pueda retirar para su posterior ensayo tras 10 años de vida útil.

## 2. MBrace: material compuesto.

El Sistema MBrace, está formado por una cantidad variable de fibras de elevadas prestaciones embebidas en una matriz polimérica o sintética, de propiedades conocidas.

El comportamiento resistente del compuesto viene determinado por la calidad, cuantía, orientación y distribución de las fibras en la sección. Las resinas empleadas transmiten las cargas de fibra a fibra (evitando la rotura interlaminar), y de éstas al soporte de hormigón, al plantear un refuerzo adherido o por inserción.

## 2.1. Fibra

La fibra constituye el esqueleto resistente, y aporta la tensión resistente al material adherido: prefabricado (LAMINATE) o ejecutado in situ (FIBRE).

Los valores resistentes de los materiales compuestos, se comparan en ámbitos de refuerzo activo y pasivo.

Propiedades	Acero	Fibra de Aramida	Fibra de Carbono
Límite elástico, MPa	276-517	-	-
Tensión última, MPa	483-690	1720-2540	600-3690
Módulo elástico, GPa	200	41-125	120-580
Elongación en plastificación, 0/00	1.4-2.5	-	-
Elongación en rotura	6-12	1.9-4.4	0.5-1.7
Densidad	7900	1250-1400	1500-1600

**Tabla 1. Comparativo de propiedades entre acero pasivo y Materiales compuestos**

Criterio	MBrace Fibra de Aramida	MBrace Fibra de Carbono
Resistencia a tracción	Muy bueno	Muy bueno
Módulo elástico	Muy bueno	Muy Bueno
Comportamiento a largo plazo	Muy bueno	Muy Bueno
Fatiga	Excelente	Bueno
Densidad	Bueno	Excelente
Resistencia a medios alcalinos	Muy bueno	Bueno

**Tabla 2.- Comparativo de propiedades de los diferentes materiales del Sistema MBrace.**

### 2.1.1. Resistencia química

La fibra de carbono y de aramida presenta un muy buen comportamiento al ataque químico.

### 2.1.2. Exposición rayos ultravioletas

La fibra de carbono no se ve afectada por la luz ultravioleta. En cualquier caso la exposición directa al sol de las resinas estructurales puede provocar rigidización y pérdida de elasticidad. Generalmente, en estos casos se recurre a la aplicación de una pintura de protección (generalmente en base poliuretano alifático de color claro, inalterable en estas condiciones y con capacidad de reflejar parte del calor radiado).

### 2.1.3. Conductividad eléctrica

La fibra de aramida no presenta conductividad eléctrica y se recomienda su uso en zonas cercanas a líneas de alta tensión, líneas férreas y de comunicación. La fibra de carbono, dada su conductividad, precisa estar aislada de elementos metálicos.

### 2.1.4. Coeficiente de dilatación térmica

Los valores típicos de dilatación térmica se resumen en la tabla siguiente:

Coeficiente dilatación térmica	Fibra de Carbono	Fibra de Aramida
Longitudinal	0.7	0.7
Transversal	0.85	0.85

Tabla 3.- Coeficientes de dilatación térmicas para Materiales Compuestos x 10<sup>-6</sup>/°C

### 2.1.5. Resistencia al fuego

La fibra de carbono mantiene sus propiedades resistentes hasta 650°C y la aramida hasta 200°C. En todas las situaciones, el comportamiento crítico al fuego va a venir determinado por la transición vítrea de las resinas de adhesión. En estos casos es necesario estudiar la nocividad o no de los gases generados durante la combustión, así como la propagación de llama.



## 2.2. Matriz sintética

La función del adhesivo es formar y conformar el material compuesto, y transmitir los esfuerzos rasantes movilizados entre el soporte a reforzar y el esqueleto de fibras resistentes. La tecnología de adhesión estructural aúna: química de superficies, química de adhesivos, reología, análisis de tensiones y mecánica de fractura.

Para una adherencia perfecta es preciso determinar: materiales a adherir, relación y requisitos de mezcla, tecnología de aplicación, temperatura y humedad de curado, técnicas de preparación de superficies, coeficientes de expansión térmica, fluencia, abrasión y resistencia química y viscosidades en adhesivos.

### 2.2.1. Conceptos particulares

Hay conceptos importantes ligados a la naturaleza de los adhesivos epoxi:

- Pot life: tiempo máximo de aplicación tras la mezcla de los dos componentes, debido a inicio de endurecimiento de la resina. Depende de la temperatura ambiente, cantidad de producto mezclado y tipo de resina.
- Tiempo abierto: tiempo máximo tras la aplicación del adhesivo sobre las superficies a unir, para adherirlas.
- Temperatura de transición vítrea: Temperatura de pérdida de propiedades: comportamiento vítreo a plástico sin prestaciones mecánicas. Esta temperatura es diferente para distintos polímeros y formulación. Inversamente ligado a la elasticidad del polímero.

### 2.2.2. Naturaleza

La naturaleza empleada en los adhesivos estructurales empleados en construcción es, generalmente, epoxi. Según su uso requiere adición de fillers, fluidificantes, tixotropantes, promotores de adherencia, aditivos y pigmentos, entre otros.

Las resinas epoxi bicomponentes deben tener la viscosidad y consistencia de acuerdo al modo de aplicación del refuerzo. En las condiciones atmosféricas de aplicación las resinas deben ser trabajables y con pot-life (tiempo de endurecimiento dentro del conjunto) compatibles con el formato de presentación del producto.

El uso los adhesivos de naturaleza epoxi, viene motivado, por:

- Perfecta adherencia sobre multitud de soportes, especialmente soportes minerales: hormigón, mampostería, piedra.
- Largo tiempo abierto, facilitando los trabajos de puesta en obra.
- Elevada cohesión interna y adherencia.
- Posibilidad de elasticación, mediante adiciones.
- No forma subproductos tras el endurecimiento.
- Baja retracción en comparación a resinas de poliéster, vinilester y acrílicas.
- Baja fluencia, ni fatiga bajo carga sostenida.
- Formulación con tixotropía para trabajos en vertical y sobre cabeza.
- Capacidad de unión de soportes irregulares

### 2.2.3. Caracterización de los adhesivos

Dentro de las resinas del que conforman el Sistema MBrace, se encuentran el MBrace FIBRE SATURANT y el MBrace LAMINATE ADHESIVE, cuyas principales propiedades y características pueden encontrarse en las correspondientes fichas técnicas (FT 2.6.03 y FT 2.6.08)

Adicionalmente los dos sistemas han sido ensayos de acuerdo con la CEB-FIB Bulletin 14 apartado 8.4.1.4. y la EN 1542

#### 2.2.3.1. Sistema MBrace FIBRE

- Aplicabilidad según punto 2 de CEB-FIB Bulletin 14 apartado 8.4.1.4.

#### Descripción del ensayo

Se preparan varias placas de hormigón sobre las que se aplica el sistema completo, siguiendo las indicaciones del apartado 2 del punto 8.4.1.4 del CEB-FIB Bulletin 14.

El ensayo se realiza tanto sobre soporte seco como sobre soporte húmedo. Para ello, la mitad de los soportes de hormigón se sumergen en agua durante 7 días y se sacan 2 horas antes de la aplicación. Además, todos los componentes se aclimatan a 5°C durante 24 horas

previamente a la aplicación. Posteriormente, y en este mismo clima, se aplica el sistema MBrace® Primer + MBrace® Fibre Saturant + MBrace® Fibre (4 capas) y se mantienen 7 días a 5°C + 7 días 21°C. Se preparan varias placas de hormigón sobre las que se aplica el sistema completo, siguiendo las indicaciones del apartado 2 del punto 8.4.1.4 del CEB-FIB Bulletin 14.

Transcurrido este tiempo se evalúa la superficie de la aplicación en términos de irregularidad, grosor de aplicación y otros defectos visibles.

### Resultados:

Para el sistema ensayado no se observa ningún tipo de defecto visible.

- Adherencia por tracción directa según EN 1542

### Descripción del ensayo

Las placas de hormigón preparadas en el apartado anterior se ensayan tras 7 días de curado a 5°C + 7 días 21°C a tracción directa según la norma UNE EN 1542.

### Resultados:

El ensayo se realiza por quintuplicado, obteniéndose los siguientes valores medios:

MBrace® Fibre Saturant	Resistencia al arrancamiento	Tipo de rotura	Resultado Según CEB -FIB
Soporte Seco	3.92 ± 0.64 N/mm <sup>2</sup>	100% hormigón	Rotura 100% hormigón
Soporte Húmedo	3.45 ± 0.65 N/mm <sup>2</sup>	100% hormigón	Rotura 100% hormigón

**Tabla 4 – Adherencia por tracción directa MBrace FIBRE**

### 2.2.3.2. Sistema MBrace LAMINATE

- Aplicabilidad según punto 2 de CEB-FIB Bulletin 14 apartado 8.4.1.4.

#### Descripción del ensayo

Se preparan varias placas de hormigón sobre las que se aplica el sistema completo, siguiendo las indicaciones del apartado 2 del punto 8.4.1.4 del CEB-FIB Bulletin 14.

El ensayo se realiza tanto sobre soporte seco como sobre soporte húmedo. Para ello, la mitad de los soportes de hormigón se sumergen en agua durante 7 días y se sacan 2 horas antes de la aplicación. Además, todos los componentes se aclimatan a 5°C durante 24 horas previamente a la aplicación. Posteriormente, y en este mismo clima, se aplica el sistema MBrace® Primer + MBrace® Laminate Adhesive HT + MBrace® Laminate y se mantienen 7 días a 5°C + 7 días 21°C. Se preparan varias placas de hormigón sobre las que se aplica el sistema completo, siguiendo las indicaciones del apartado 2 del punto 8.4.1.4 del CEB-FIB Bulletin 14.

Transcurrido este tiempo se evalúa la superficie de la aplicación en términos de irregularidad, grosor de aplicación y otros defectos visibles.

#### Resultados:

Para el sistema ensayado no se observa ningún tipo de defecto visible.

- Adherencia por tracción directa según EN 1542

#### Descripción del ensayo

Las placas de hormigón preparadas en el apartado anterior se ensayan tras 7 días de curado a 5°C + 7 días 21°C a tracción directa según la norma UNE EN 1542.

Resultados:

El ensayo se realiza por quintuplicado, obteniéndose los siguientes valores medios:

MBrace® Laminate Adhesive HT	Resistencia al arrancamiento	Tipo de rotura	Resultado Según CEB -FIB
Soporte Seco	3.79± 1.06 N/mm <sup>2</sup>	100% hormigón	Rotura 100% hormigón
Soporte Húmedo	3.44 ± 1.11 N/mm <sup>2</sup>	100% hormigón	Rotura 100% hormigón

**Tabla 5 – Adherencia por tracción directa MBrace LAMINATE**