



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Rehabilitación de elementos
estructurales de concreto
mediante inyección de resinas
epoxi**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Jorge Luis Abarca Juárez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Sergio M. Alcocer Martínez de Castro



Ciudad Universitaria, Ciudad de México, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONTENIDO

CONTENIDO	2
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABLAS.....	8
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	1
OBJETIVO	2
ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO.....	2
CAPÍTULO 1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA RESINA EPOXI	5
1.1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.2. CRONOLOGÍA DE LA RESINA EPOXI	5
1.2.1. La resina.....	5
1.2.2. Resinas sintéticas.....	6
1.2.3. Tipos de resinas sintéticas.....	7
1.2.4. Resinas Epoxi.....	8
1.3. DESCRIPCIÓN DE LAS RESINAS EPOXI	8
1.4. COMPOSICIÓN DE LAS RESINAS EPOXI	9
1.5. PROPIEDADES DE LAS RESINAS EPOXI	12
1.5.1. Propiedades físicas de la resina epoxi.....	12
1.5.2. Propiedades químicas de la resina epoxi.....	13
1.6. USOS DE LAS RESINAS EPOXI.....	14
1.6.1. Descripción de la resina epoxi como adhesivo.....	14
1.6.2. Reparación de concretos	15
1.7. CONCLUSIONES	22
CAPÍTULO 2 INYECCIÓN DE RESINA EPOXI COMO MÉTODO DE REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL	23
2.1. INTRODUCCIÓN.....	23
2.2. DESCRIPCIÓN DE LOS ALCANCES DE LA INYECCIÓN DE RESINA EPOXI.....	23
2.3. TIPOS DE GRIETAS A INYECTAR	25
2.4. EVALUACIÓN DE GRIETAS	31
2.4.1. Ubicación y magnitud de la grieta	32
2.4.2. Ensayos no destructivos	34
2.4.3. Ensayos en testigos o núcleos de concreto	35
2.4.4. Revisión de planos e información constructiva.....	36
2.5. ELECCIÓN DE UN MÉTODO DE REHABILITACIÓN.....	36

2.6. PROPIEDADES DE LA FORMULACIÓN DE RESINA EPOXI PARA LA INYECCIÓN	37
2.6.1. Norma ASTM C881 (2002)	37
2.6.2. Resistencia a la compresión	39
2.6.3. Resistencia de Adherencia	39
2.6.4. Resistencia a la tensión	41
2.6.5. Módulo de elasticidad	42
2.6.6. Resistencia a la fluencia	42
2.6.7. Temperatura de deflexión térmica.....	42
2.6.8. Resistencia química.....	42
2.6.9. <i>Pot-life</i> o vida útil.....	43
2.6.10. Tiempo de curado	43
2.6.11. Viscosidad	43
2.6.12. Temperaturas permitidas	44
2.6.13. Coeficiente de expansión térmica	44
2.6.14. Tolerancia a la humedad.....	44
2.7. MÉTODOS DE INYECCIÓN	45
2.7.1. Método de inyección mediante vacío	45
2.8. CONCLUSIONES	48

CAPÍTULO 3 PROCEDIMIENTO DE INYECCIÓN A PRESIÓN 49

3.1. INTRODUCCIÓN	49
3.2. MÉTODO DE INYECCIÓN A PRESIÓN	49
3.3. ACCIONES PREVIAS A LA INYECCIÓN	50
3.3.1. Localización, ubicación y retiro de recubrimientos	50
3.3.2. Limpieza de las grietas	51
3.3.3. Sellado de grietas	52
3.3.4. Instalación de las boquillas/puertos de inyección.....	57
3.4. PROCEDIMIENTO DE INYECCIÓN	63
3.4.1. Revisar el sellado.....	64
3.4.2. Forma de inyección.....	64
3.4.3. Presión de inyección.....	65
3.4.4. Tiempo de inyección	66
3.4.5. Posibles fallas en el proceso de inyección	67
3.5. ACTIVIDADES POST-INYECCIÓN	70
3.5.1. Retiro del sello	70
3.6. CONTROL DE CALIDAD	71
3.6.1. Observación directa	72
3.6.2. Prueba de los materiales	72
3.6.3. Obtención y evaluación de núcleos de grietas inyectadas	75
3.6.4. Métodos no destructivos para el aseguramiento de la calidad	77
3.6.4.1. Velocidad de pulso ultrasónico.....	77
3.6.4.2. Impacto Eco.....	79

3.6.4.3. Análisis espectral de ondas superficiales	80
3.7. CONCLUSIONES	81

CAPÍTULO 4 RECUPERACIÓN DE ELEMENTOS DE CONCRETO REPARADOS CON INYECCIÓN DE RESINA EPOXI EN LABORATORIO... 83

4.1. INTRODUCCIÓN.....	83
4.2. DOCUMENTACIÓN EXPERIMENTAL.....	83
4.3. TÉCNICAS DE REPARACIÓN CON EPOXI PARA DAÑOS MODERADOS.....	84
4.3.1. Especímenes de las pruebas	84
4.3.2. Propiedades de los materiales	85
4.3.3. Historial de carga	86
4.3.4. Procedimiento de reparación	87
4.3.4.1. Procedimiento de inyección a presión.....	87
4.3.4.2. Procedimiento de inyección mediante vacío	87
4.3.5. Resultados.....	88
4.3.5.1. Ciclos iniciales 1-2	88
4.3.5.2. Ciclos de amplitud de desplazamiento 6-7	89
4.3.5.3. Ciclos de baja amplitud 8-9.....	92
4.3.6. Conclusiones	93
4.4. EFECTO DE LA INYECCIÓN DE RESINA EPOXI EN COLUMNAS DE CONCRETO DE BAJA RESISTENCIA DAÑADAS	94
4.4.1. Esquema experimental	94
4.4.2. Método de reparación	96
4.4.3. Resultados experimentales.....	96
4.4.3.1. Patrones de agrietamiento	96
4.4.3.2. Curva de histéresis carga-distorsión	98
4.4.3.3. Cambios de rigidez.	100
4.4.3.4. Deformación por flexión	100
4.4.3.5. Evaluación de la reparación	101
4.4.3.6. Disipación de la energía.....	102
4.4.4. Conclusiones	102
4.5. CUANTIFICACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA REPARACIÓN EPOXI DE ARTICULACIONES PLASTICAS DE CONCRETO ARMADO.....	103
4.5.1. Metodología utilizada	104
4.5.2. Pruebas experimentales	104
4.5.3. Conjunto de datos de todos los experimentos importantes	107
4.5.4. Efecto de las deformaciones residuales antes de la reparación	109
4.5.5. Evaluación de daños posteriores	110
4.5.6. Conclusiones	115
4.6. COMENTARIOS DE LA INFORMACIÓN.....	116
4.7. CONCLUSIONES	117

CAPÍTULO 5 APLICACIÓN DE LA INYECCIÓN DE RESINAS EPOXI COMO TÉCNICA DE REHABILITACIÓN EN LA CIUDAD DE MÉXICO 119

5.1. INTRODUCCIÓN.....	119
5.2. REHABILITACIÓN DE EDIFICIOS EN LA CDMX.....	119
5.3. SITUACIÓN DE LOS EDIFICIOS EN REHABILITACIÓN EN LA CIUDAD DE MÉXICO DESPUÉS DEL SISMO DE 2017	122
5.4. USO DE LA INYECCIÓN DE RESINA EPOXI EN LA CDMX.....	124
5.4.1. Inyección de resina epoxi en columnas del Metro de la Ciudad de México 126	
5.5. VARIANTES ENCONTRADAS EN LA APLICACIÓN DE LA INYECCIÓN DE RESINA EPOXICA EN LA CIUDAD DE MÉXICO.....	129
5.5.1. Errores más comunes en el procedimiento de inyección.....	133
5.6. ELABORACIÓN DE UN VIDEO EXPLICATIVO DE LA TÉCNICA DE REPARACIÓN	134
5.7. CONCLUSIONES	136

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 139

6.1. INTRODUCCIÓN.....	139
6.2. INYECCIÓN DE RESINA EPOXI COMO TÉCNICA DE REHABILITACIÓN	139
6.3. DOCUMENTACIÓN EXPERIMENTAL DE LA INYECCIÓN DE RESINA EPOXICA.....	140
6.4. APLICACIÓN DE LA INYECCIÓN DE RESINA EPOXICA EN MÉXICO.	141
6.5. RECOMENDACIONES GENERALES	142
6.6. RECOMENDACIONES PARA NORMAS.....	143
6.6.1. Reparación de grietas en estructuras de concreto mediante fluidos.....	143
6.6.2. Deficiencia por corregir	143
6.6.3. Descripción de la técnica	143
6.6.3.1. Acciones previas a la inyección	144
6.6.3.2. Acciones durante el procedimiento de inyección.....	145
6.6.3.3. Acciones post-inyección.....	145
6.6.4. Consideraciones de diseño.....	146

Referencias y Bibliografía 147

Anexos 149

A. Comparador y clasificación de grietas.....	149
B. Resinas comerciales más utilizadas.....	150
C. Manual de inyección Sika	155
D. Guion del Video de rehabilitación.....	156

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

FIGURA 1 CLASIFICACIÓN DE RESINAS	5
FIGURA 2 PROCESO GENERAL DE LA POLIMERIZACIÓN DE ETILENO A POLIETILENO	6
FIGURA 3 ESTRUCTURA MOLECULAR DE UN GRUPO EPÓXICO (TROUT, 2006)	6
FIGURA 4 PROCESO DE POLIMERIZACIÓN DE UNA RESINA EPOXI (TROUT, 2006).....	7
FIGURA 5 COMPONENTES PRINCIPALES DE LAS RESINAS EPOXI	11
FIGURA 6 CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO DE LA PROBETA DE VIGA (FERNANDEZ, 1966).....	17
FIGURA 7. ESPÉCIMEN DE VIGA MOSTRANDO LA SECCIÓN DE FALLA (FERNÁNDEZ, 1966)	18
FIGURA 8. ENSAYOS EN PROBETAS DESPUÉS DE SU REPARACIÓN (FERNÁNDEZ, 1981).....	20

CAPÍTULO 2

FIGURA 9 PATRONES DE AGRIETAMIENTO TÍPICOS (ACI 224.1R, 2007).....	30
FIGURA 10. COMPARADOR PARA MEDIR ANCHO DE GRIETAS (ACI 224-R01, 2001)	33
FIGURA 11. TARJETA MEDIDORA DE GRIETAS (SMIE, 2017).....	33
FIGURA 12. MONITOREO DE MOVIMIENTO DE GRIETAS (ACI 224-R01, 2001)	34
FIGURA 13 PRUEBA DE ULTRASONIDO EN UNA GRIETA (COTTIER, 2020).....	35
FIGURA 14 PROCEDIMIENTO DE IMPREGNACIÓN A VACÍO (FRENCH ET AL., 1990)	46
FIGURA 15 PROCEDIMIENTO DE IMPREGNACIÓN A VACÍO (FRENCH ET AL., 1990)	46
FIGURA 16 PROCEDIMIENTO DE IMPREGNACIÓN POR VACÍO (C) (FRENCH ET AL., 1990)	47
FIGURA 17 RETIRO DE ACABADOS DE LAS GRIETAS	51

CAPÍTULO 3

FIGURA 18 LIMPIEZA DE LAS GRIETAS CON UN COMPRESOR DE AIRE (ABARCA, 2021)	52
FIGURA 19 MORTERO EPÓXICO COMO SELLADOR DE GRIETAS (ABARCA, 2021)	53
FIGURA 20 GRIETA SELLADA MEDIANTE SU RELLENO (TROUT, 2006)	54
FIGURA 21 PERFILADO Y SELLADO DE GRIETA (TROUT, 2006)	55
FIGURA 22 SELLADO DE LA GRIETA EN FORMA DE CAPAS (TROUT, 2006)	56
FIGURA 23 COLOCACIÓN DE PUERTOS DE INYECCIÓN CON EL SELLO (ABARCA, 2021).....	57
FIGURA 24 DIFERENCIAS DE SEPARACIÓN DE PUERTOS SEGÚN EL CONSTRUCTOR	59
FIGURA 25 INSTALACIÓN DE PUERTO CON PINZAMIENTO (TROUT, 2006)	59
FIGURA 26 COLOCACIÓN DE BOQUILLA POR EL MÉTODO DE INSERCIÓN (TROUT, 2006)	60
FIGURA 27 COLOCACIÓN DE BOQUILLAS CON EL MÉTODO DE SUPERFICIE (TROUT, 2006).....	60
FIGURA 28 COLOCACIÓN DE BOQUILLAS PLÁSTICAS CON BASE, UTILIZANDO EL MÉTODO DE SUPERFICIE (PSC MÉXICO, 2020)	61
FIGURA 29 DIAGRAMA DE PERFORACIÓN DE GRIETA (FERNÁNDEZ, 1981).....	62
FIGURA 30 COLOCACIÓN DE PUERTOS MAESTROS (TROUT, 2006).....	63
FIGURA 31 CORRECTA FORMA DE INYECCIÓN (ALCOCER, 2020).....	65
FIGURA 32 RETIRO DEL SELLADO (ABARCA, 2020).....	71
FIGURA 33 PRUEBA DE ULTRASONIDO (ALCOCER, 2019)	78

FIGURA 34 EQUIPOS PARA PRUEBAS DE ULTRASONIDO (NEODEX, 2018)	78
FIGURA 35 NÚCLEOS QUE MUESTRAN LA PENETRACIÓN DE LA RESINA EPOXI BAJO LUZ NEGRA (GOODWIN ET AL., 2016)	76
FIGURA 36 PRUEBA DE TENSIÓN INDIRECTA. (GOODWIN ET AL., 2016).....	76
FIGURA 37 EJEMPLO DE LA PRUEBA DE IMPACTO ECO IE (GOODWIN ET AL., 2016).....	79
FIGURA 38 PRUEBA DE IMPACTO ECO. GRIETA TOTALMENTE RELLENA EN UN SOLO ECO O PICO (DER) Y PARCIALMENTE RELLENA CON MÁS DE UN ECO O PICO (IZQ).....	79
FIGURA 39 MÉTODO DEL ANÁLISIS ESPECTRAL DE ONDAS SUPERFICIALES (GOODWIN ET AL., 2016)	80

CAPÍTULO 4

FIGURA 40 SISTEMA DE PRUEBA Y SECCIÓN TRANSVERSAL DE VIGA Y COLUMNA (FRENCH ET AL., 1990).....	85
FIGURA 41 CURVA DE HISTÉRESIS CARGA-DESPLAZAMIENTO EN LOS CICLOS 1-2. DE LOS ESPECÍMENES PI Y RPI (FRENCH ET AL., 1990)	88
FIGURA 42 CURVA DE HISTÉRESIS CARGA-DESPLAZAMIENTO EN LOS CICLOS 1-2. DE LOS ESPECÍMENES RPI Y RVI (FRENCH ET AL., 1990)	89
FIGURA 43 CURVA DE HISTÉRESIS CARGA-DESPLAZAMIENTO EN LOS CICLOS 6-7. DE LOS ESPECÍMENES PI Y RPI (FRENCH ET AL., 1990)	90
FIGURA 44 CURVA HISTÉRESIS CARGA-DESPLAZAMIENTO EN LOS CICLOS 6-7. DE LOS ESPECÍMENES VI Y RVI (FRENCH ET AL., 1990)	90
FIGURA 45 RELACIÓN DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA ENTRE LOS MODELOS REPARADAS Y ORIGINALES (FRENCH ET AL., 1990)	91
FIGURA 46 CURVA DE HISTÉRESIS CARGA-DESPLAZAMIENTO EN LOS CICLOS 8-9. DE LOS ESPECÍMENES PI Y RPI (FRENCH ET AL., 1990)	92
FIGURA 47 CURVA DE HISTÉRESIS CARGA-DESPLAZAMIENTO EN LOS CICLOS 8-9. DE LOS ESPECÍMENES VI Y RVI (FRENCH ET AL., 1990)	92
FIGURA 48 DIMENSIONES Y ARMADO DE LOS ESPECÍMENES (ARAKI E IZAKI, 2012).....	95
FIGURA 49 AGRIETAMIENTO EN LAS COLUMNAS ANTES Y DESPUÉS DE LA REPARACIÓN.....	97
FIGURA 50 CURVAS DE HISTÉRESIS FUERZA CORTANTE- ÁNGULO DE DESPLAZAMIENTO ANTES Y DESPUÉS DE LA REPARACIÓN (ARAKI E IZAKI, 2012).....	99
FIGURA 51 GRÁFICAS DISIPACIÓN DE ENERGÍA-ÁNGULO DE ROTACIÓN	102
FIGURA 52 PROTOCOLO DE CARGA APLICADO A LOS ESPECÍMENES (A)CYC, (B) LD-1 & LD-1R (c) LD-2 & LD2-R (D)CYC-NOEQ (MARDER ET AL., 2020)	105
FIGURA 53 : ESTADOS DE DAÑO INMEDIATAMENTE ANTES DE LA REPARACIÓN DE LAS TRES PROBETAS DE VIGAS REPARADAS (FILA SUPERIOR) Y COMPARACIÓN CON LOS ESTADOS DE DAÑO EN EL MISMO PUNTO DE LA PRUEBA PARA LAS PROBETAS EQUIVALENTES SIN REPARAR (FILA INFERIOR) (MARDER ET EL., 2020)	107
FIGURA 54 RELACIONES DE ELONGACIÓN AXIAL VERSUS DISTORSIÓN PARA LAS MUESTRAS LD-2, LD-2-R Y CYC-NOEQ (CICLOS DE HASTA 3.3% DE DISTORSIÓN)	110
FIGURA 55 ESCENARIOS POSIBLES EN CUANTO A LA REPARACIÓN DE LAS ARTICULACIONES PLÁSTICAS	111
FIGURA 56 DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA CICLO A CICLO DE LOS TRES ESPECÍMENES (MARDER ET AL., 2020).....	114

CAPÍTULO 5

FIGURA 57 CLASIFICACIÓN DE DAÑO A) DICATAMENES ESTRUCTURALES ISC-CDMX B) MAGNITUD DE DAÑO GENERAL II-UNAM (ALCOCER Y MURCIA, 2020)	123
FIGURA 58 USO DE LAS TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN EN LA CDMX DESPUÉS DEL SISMO DE 2017(%) (ALCOCER Y MURCIA, 2020).....	123
FIGURA 59 REPARACIÓN DE GRIETAS EN COLUMNAS (ABARCA, 2020).....	124
FIGURA 60 REPARACIÓN DE GRIETAS EN VIGAS (ABARCA, 2020)	125
FIGURA 61 BOMBA DE INYECCIÓN MEDIANTE PISTONES UTILIZADA EN LA L12 DEL METRO DE LA CDMX (ABARCA, 2021)	126
FIGURA 62 IDENTIFICACIÓN Y LIMPIEZA DE LAS GRIETAS EN COLUMNAS DE LA L12 DEL METRO DE LA CDMX (ABARCA, 2021)	127
FIGURA 63 PREPARACIÓN Y COLOCACIÓN DEL SELLO EN COLUMNAS DE LA L12 DEL METRO DE LA CDMX (ABARCA, 2021)	127
FIGURA 64 MEZCLADOR DE RESINA Y ENDURECEDOR, SERPENTÍN. (ABARCA, 2021)	128
FIGURA 65 PROCEDIMIENTO DE INYECCIÓN EN COLUMNAS DE LA L12 DEL METRO DE LA CDMX (ABARCA, 2021)	128
FIGURA 66 DIFERENTES BOMBAS DE INYECCIÓN (CHILE, 1996).....	131
FIGURA 67 BOQUILLA CONVENCIONAL PARA INYECCIÓN DE RESINAS EPOXI (ALCOCER Y MURÍA, 2020)	131
FIGURA 68 DIFERENTES TIPOS DE BOQUILLAS (ABARCA, 2021)	132
FIGURA 69 ILUSTRACIÓN DE UN MORTERO DE TIPO EPÓXICO	133
FIGURA 70 VIDEO "REPARACIÓN DE GRIETAS MEDIANTE LA INYECCIÓN DE RESINA EPOXI"	135

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 RELACIÓN ENTRE PROPIEDADES Y CARGAS (FERNÁNDEZ, 1981).....	10
TABLA 2. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA A FLEXIÓN PARA UN CONCRETO DE 30 MPA (300 KG/CM ²) (FERNÁNDEZ, 1966).....	18
TABLA 3. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA A FLEXIÓN PARA UN CONCRETO DE 40 MPA (400 KG/CM ²) (FERNÁNDEZ, 1966).....	19
TABLA 4. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA A FLEXIÓN PARA UN CONCRETO DE 50 MPA (500 KG/CM ²) (FERNÁNDEZ, 1966).....	19
TABLA 5 NIVELES DE RECUPERACIÓN DE DIFERENTES MATERIALES (ABARCA, 2020)	24
TABLA 6 ANCHOS DE GRIETA TOLERABLES, SEGÚN SU CONDICIÓN DE EXPOSICIÓN (ACI 224-R01, 2001)	32
TABLA 7 REQUERIMIENTOS FÍSICOS DE SISTEMAS DE UNIÓN (ASTM C188, 2002)	40
TABLA 8 REQUISITOS PARA EL USO DE RESINAS (TROUT, 2006)	41
TABLA 9 LISTA DE ESPECÍMENES (ARAKI & IZAKI, 2012).....	94
TABLA 10 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO (ARAKI & IZAKI, 2012).....	95
TABLA 11 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA RESINA DE REPARACIÓN (ARAKI E IZAKI, 2012).....	95
TABLA 12 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO DE REFUERZO UTILIZADO (ARAKI & IZAKI, 2012).....	96
TABLA 13 RECUPERACIÓN DE LA RIGIDEZ DE LOS TRES ESPECIMENES.....	100
TABLA 14 LÍMITE ELÁSTICO MÁXIMODISTORSIÓN Y FACTOR DE AMPLIFICACIÓN (ARAKI & IZAKI, 2012).....	102
TABLA 15 PRUEBAS REALIZADAS POR MARDER ET AL. (2020).....	104

<i>TABLA 16 CONJUNTO DE DATOS EXPERIMENTALES DE ARTICULACIONES PLÁSTICAS REPARADAS MEDIANTE INYECCIÓN DE RESINA EPOXI (MARDER ET AL., 2020)</i>	108
<i>TABLA 17 BASE DE DATOS EXPERIMENTAL DE REPARACIÓN DE ARTICULACIONES PLÁSTICAS MEDIANTE LA INYECCIÓN DE RESINAS EPOXI (MARDER ET AL., 2020).</i>	108
<i>TABLA 18 NIVELES DE RECUPERACIÓN DE DIFERENTES MATERIALES (ABARCA, 2020)</i>	146

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

Debido a que México se encuentra en una región sísmica, nuestro país ha experimentado una gran cantidad de sismos de diferentes magnitudes a lo largo de los años. Algunos de éstos han marcado la memoria de quienes los han vivido, como es el caso de los sismos del mes de septiembre de 2017. El 7 de septiembre de 2017 a las 23:49 horas ocurrió un sismo de M8.2 en la escala de Richter a 133 km al sur del estado de Chiapas, siendo el sismo más intenso en los últimos 100 años. Este sismo ocasionó una cantidad de daños enormes en la zona sur del país (INIFED, 2020).

Días después, el 19 de septiembre de 2017 ocurrió un sismo de M7.1 en la escala de Richter con epicentro a 60 km al sur de Puebla y cerca del estado de Morelos, el cual causó graves daños en la infraestructura de la Ciudad de México, Morelos, Puebla y algunas zonas del Estado de México. Las principales afectaciones se presentaron en edificaciones de uso habitacional, de oficinas, comercial y escolar (Alcocer y Murcia, 2020a).

Una gran cantidad de edificaciones fue afectada por lo que se realizaron visitas de campo con la finalidad de evaluar la seguridad estructural y la funcionalidad de los inmuebles. Estas revisiones se realizaron por parte del Instituto para la Seguridad de las Construcciones en la Ciudad de México (ISC-CDMX). De esta manera se observó que una cantidad importante de edificios necesitaba ser intervenida debido a que presentaron daños y a que no cumplían con las Normas Técnicas Complementarias emitidas en diciembre de 2017 (NTC-2017).

Dependiendo del nivel de daño que había sufrido el inmueble y para cumplir con las NTC-2017, se utilizaron diferentes técnicas de rehabilitación, como: encamisados de concreto y acero en columnas, encamisado de concreto y acero en vigas, adición de muros de concreto, encamisado de muros con malla de alambre soldado e inyección de resinas epoxi en elementos de concreto, por mencionar las más destacadas. En esta tesis se usará indistintamente el término “epóxico” y “epoxi”. Si bien este último es el correcto, el primero es el más utilizado en la construcción en México.

La inyección de resinas epoxi en elementos de concreto es una técnica de rehabilitación utilizada para recuperar la capacidad estructural de los elementos en términos de resistencia, rigidez y deformación. En México, en el informe *Evaluación de edificios de concreto rehabilitados sísmicamente tras el sismo de 2017 en la Ciudad de México*, elaborado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, se presentan los resultados de haber revisado 208 edificaciones que fueron rehabilitadas.

En este estudio se observó que en 28% de las edificaciones fueron reparadas las grietas. De ellas, sólo 42% se realizaron mediante el método de inyección de resinas epoxi. En 58% restante se desconoce el método usado para la reparación de grietas. La falta de una especificación detallada tal vez se deba al desconocimiento del tema por parte de los diseñadores y/o constructores que llevan a cabo proyectos de rehabilitación como los ejecutados en la Ciudad de México después del sismo de 19 de septiembre de 2017.

OBJETIVO

Este trabajo tiene como objetivos generales:

- 1) Mostrar la importancia de la inyección de la resina epoxi como método de rehabilitación para la reparación de grietas en elementos de concreto.
- 2) Revisar la información proveniente de experimentos sobre la reparación de grietas mediante inyección de resinas para dar a conocer los parámetros de recuperación para su consideración en nuevos diseños.
- 3) Dar a conocer la forma correcta de realizar el procedimiento y documentar los errores más comunes identificados en visitas de campo.
- 4) Contribuir de una manera documentada a la divulgación del método de rehabilitación e incentivar su uso adecuado del procedimiento.

Los objetivos particulares son:

- a) Revisar la información documental que permita el desarrollo de parámetros que se puedan aplicar en proyectos de rehabilitación.
- b) Incentivar el uso de dicha técnica mostrando su efectividad.
- c) Visita de edificaciones para detectar los errores más comunes en el procedimiento.
- d) Dar a conocer cómo se observó la aplicación de la técnica en la Ciudad de México.

ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

La tesis consta de seis capítulos, los cuales explican de forma detallada cada uno de los aspectos más relevantes para entender la importancia de la inyección de resina epoxi como material de rehabilitación. A continuación, se describe el contenido de cada uno de los capítulos:

En el Capítulo 1 se describen las propiedades generales, sus componentes, la formulación y diversos usos que puede tener la resina epoxi. Además, se explica el método de inyección para reparación de grietas de concreto.

En el Capítulo 2 se presenta el método de reparación de grietas mediante inyección de resinas epoxi en elementos estructurales de concreto. Se describe el alcance que se tiene en cuanto a la recuperación estructural de la resistencia, la rigidez y la ductilidad. Además, se definen los tamaños y tipos de grietas que se pueden reparar, así como la evaluación previa a la elección de un método de reparación. Finalmente, en este capítulo se describen las propiedades que necesita tener una formulación epoxi para poder ser inyectada.

Los pasos a seguir para poder realizar una correcta inyección de resina epoxi con el método de inyección a presión se desarrollan en el Capítulo 3. Este método será estudiado en tres grandes pasos, *acciones previas a la inyección, el procedimiento de inyección y las actividades post inyección*. Se describen cada uno de los pasos, las consideraciones, las actividades que requieren mayor atención y se dan recomendaciones específicas.

En el capítulo 4 se comenta la información documentada en diferentes laboratorios a lo largo del mundo acerca de la experimentación realizada en elementos de concreto dañados y reparados mediante la inyección de resinas epoxi. Se muestran los resultados obtenidos, las hipótesis hechas y finalmente los parámetros de recuperación encontrados como resultado de los procedimientos experimentales.

La aplicación del método de inyección de resinas epoxi en México, principalmente en la ciudad de México en la rehabilitación de edificios dañados por el sismo de 2017 se describe en el Capítulo 5. Se mencionan las visitas de campo realizadas por el Instituto de Ingeniería y la aplicación de la técnica de inyección en la rehabilitación de columnas de la L12 del metro de la CDMX. También se mencionan las variantes encontradas en campo, la estadística del uso de la técnica y, finalmente, los aciertos y errores en la implantación de la misma.

En el Capítulo 6, se presentan las principales conclusiones y recomendaciones para lograr que la rehabilitación de resinas epoxi sea una técnica de rehabilitación efectiva.

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA RESINA EPOXI

1.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se ofrece un primer acercamiento a la resina epoxi como material de construcción. Se relata, brevemente, la historia del surgimiento de la resina epoxi y su evolución hasta su aplicación actual como material de rehabilitación. Se describen los componentes que puede contener una formulación de resina epoxi (la resina, endurecedores, diluyentes, cargas, entre algunos otros). Se mencionan las propiedades base que puede alcanzar la resina epoxi por sí sola. Por último, se enlistan las principales ventajas del uso de resina epoxi en la construcción y, en especial, para la rehabilitación de estructuras de concreto.

1.2. CRONOLOGÍA DE LA RESINA EPOXI

1.2.1. La resina

La resina es un compuesto orgánico formado por una sustancia viscosa que se solidifica mediante un proceso químico. Las resinas se clasifican en naturales y sintéticas. Las resinas naturales son polímeros que se forman en algunas coníferas, mientras que las resinas sintéticas son sustancias artificiales que sufren un proceso de polimerización dando lugar a un producto sólido con propiedades específicas como se muestra en la Figura 1 (Soto, 2008).



a) Resina Natural (Pinillos et al., 2009)



b) Resina Sintética (Plaremesa, 2020)

Figura 1 Clasificación de resinas

1.2.2. Resinas sintéticas

Las resinas sintéticas son creadas a partir de un proceso de polimerización. La polimerización es una reacción química por la cual los compuestos reactivos, llamados monómeros (compuestos químicos de partida, de los cuales se sintetiza el polímero) forman enlaces químicos entre sí, con el fin de dar lugar a una molécula de gran peso, como se muestra en la Figura 2. Se observa que del lado izquierdo se tiene el compuesto etileno (monómero) que al reaccionar químicamente consigo mismo logra formar un compuesto llamado polietileno (polímero). Este tipo de reacción química puede generarse en largas cadenas de forma lineal o tridimensional como es el caso de las resinas sintéticas.

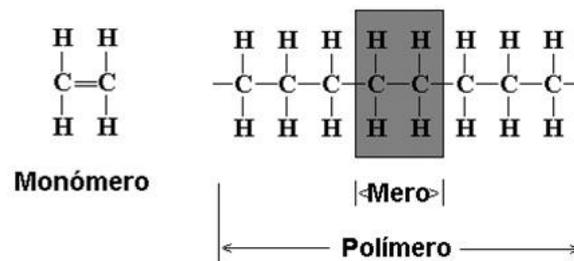


Figura 2 Proceso general de la polimerización de etileno a polietileno

Para el caso de la resina epoxi que se estudia en esta tesis se sabe que cuenta con un grupo importante de moléculas epoxi llamado así por sus raíces griegas “epi” que significa “fuera de” y “oxi” que se refiere a oxígeno. De esta forma coincide con la forma del grupo químico epoxi, representado en la Figura 3.

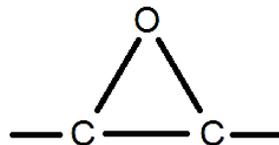


Figura 3 Estructura molecular de un grupo epóxico (Trout, 2006)

La resina epoxi comúnmente usada en construcción reacciona con un agente de curado que suele ser a base de aminas o poliaminas. Una vez mezclados estos compuestos comienza la reacción química de polimerización y endurecimiento de la resina como se muestra en la Figura 4. Antes de este proceso la resina más común utilizada en construcción es líquida, de color ámbar y cuenta con una viscosidad parecida a la del aceite de un auto.

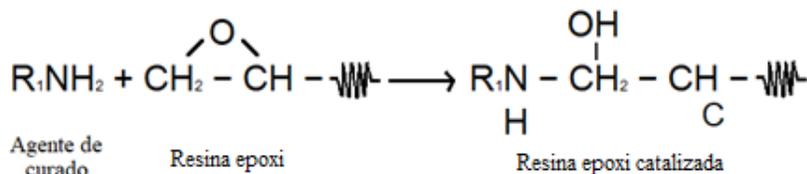


Figura 4 Proceso de polimerización de una resina epoxi (Trout, 2006)

Una vez que comienza el proceso de polimerización, las moléculas comienzan a generar enlaces fuertes que producen un material sólido con diferentes características que dependen directamente de la formulación empleada y de las condiciones de diseño para las cuales será utilizada. En el caso de la inyección de resina epoxi, se requerirán ciertas características que se obtienen de diversos compuestos químicos como se explica en las secciones 1.3 y 1.4.

1.2.3. Tipos de resinas sintéticas

Las resinas que se utilizan en la industria de la construcción son las sintéticas. Dentro de las resinas sintéticas podemos encontrar las resinas acrílicas, poliéster, de poliuretano y epoxi. A continuación, se describen algunos usos de las resinas acrílicas, poliéster y poliuretano. Las resinas epoxi se describen en el inciso 1.2.4 y en la sección 1.6.

- **Resinas Poliéster.** Las resinas poliéster se utilizan como sellador o adhesivo, anclaje, sellador de grietas para la inyección de resina epoxi, aglutinante para morteros, recubrimientos delgados, pinturas de protección de metales y como protección de revestimiento. Este tipo de resina tiene un mayor coeficiente térmico que el concreto y sus propiedades varían con la formulación utilizada. De forma general, las resinas poliéster tienen una alta estabilidad química y eléctrica, pero no cuentan con buenas propiedades mecánicas en comparación con la resina epoxi.
- **Resinas Acrílicas.** De las aplicaciones más comunes que se le suelen dar a las resinas acrílicas encontramos que se utilizan para dar adherencia al concreto fresco con concreto endurecido. También se utilizan en recubrimientos y procedimientos de resane con materiales como el cemento y el yeso. Sus propiedades varían dependiendo de su formulación. En general, estas resinas disponen de una buena adherencia, resistencia al agua, resistencia a los rayos ultravioleta y baja permeabilidad.
- **Resinas Poliuretano.** Las resinas de poliuretano son un material utilizado comúnmente en impermeabilizantes, pegamentos de control de agua, pinturas de aislamiento, anclaje en revestimientos de pisos, barnices, entre otros usos. De forma general, este tipo de resinas cuenta con una buena resistencia a los agentes químicos, es fácil de usar, es impermeable y exhiben una contracción mínima en comparación con la del concreto.

1.2.4. Resinas Epoxi

Las resinas epoxi fueron descubiertas en 1881 por el químico Lindeman en Noruega. Posteriormente, el químico Pierre Castán, en Suiza, logró desarrollar la primera aplicación de este tipo de material en prótesis dentales. Las primeras investigaciones sobre el uso de las resinas epoxi en otros campos, como su empleo de adhesivo en aparatos eléctricos, fueron presentados en la Feria Industrial de Suiza, en 1946.

Simultáneamente, en los Estados Unidos de América la investigación sobre el uso de la resina epoxi en pavimentos data de 1954. Esta es la primera aplicación importante de resinas epoxi en el campo de la construcción. Se utilizó como adhesivo en carreteras para pegar señales de tránsito a las superficies de rodamiento.

Posteriormente, las resinas epoxi se utilizaron como un adhesivo estructural en las industrias aeronáutica y de la construcción. En años más recientes las resinas epoxi se han utilizado en pinturas, morteros epóxicos, concretos epóxicos y otros adhesivos estructurales (Fernández, 1981).

El uso de las resinas epoxi en diferentes industrias y aplicaciones se debe principalmente a las excelentes propiedades físicas y químicas que pueden llegar adquirir con la formulación adecuada. En principio las resinas epoxi no tienen una aplicación por sí solas, sino que requieren un “agente endurecedor” para reaccionar y pasar a su estado sólido adquiriendo las propiedades necesarias.

1.3. DESCRIPCIÓN DE LAS RESINAS EPOXI

Las resinas epoxi son resinas sintéticas que pasan de un estado líquido de baja viscosidad a un estado sólido con un alto punto de fusión. Se caracterizan por tener en sus moléculas más de un grupo químico llamado “epoxi”, que es una molécula de oxígeno unida a dos carbonos por un enlace covalente, lo cual le permite poder polimerizarse a través de estos grupos cuando se emplea un agente de enlace llamado “agente de curado” o “endurecedor”(Fernández, 1981).

Este tipo de resinas son reconocidas por la gran cantidad de propiedades que pueden adquirir, entre las que se distinguen: su elevada resistencia a la compresión, la tensión, el esfuerzo cortante, choque, abrasión etc., además de la gran velocidad a la que adquieren sus propiedades. Gracias a esto, se les ha podido dar diferentes usos, que incluyen los de adhesivo estructural, morteros de reparación, bacheos, pinturas anticorrosivas, entre otros.

Como se mencionó, las resinas epoxi no pueden trabajar por sí solas en ninguna de sus aplicaciones, sino que se deben mezclar con otro tipo de productos que, al reaccionar químicamente con ellas, les permite desarrollar las propiedades necesarias para desempeñar

alguna de sus aplicaciones. Al conjunto de por lo menos una resina y un endurecedor se le conoce como formulación epoxi base (Fernandez, 1981).

1.4. COMPOSICIÓN DE LAS RESINAS EPOXI

Una formulación epoxi que consta de una resina y un endurecedor será siempre la base sobre la cual se pueden desarrollar diferentes tipos de formulaciones con propiedades distintas. Para cualquier tipo de aplicación, lo importante no es la resina, sino la formulación que se empleará para que la resina logre alcanzar las propiedades necesarias acorde con su uso.

Existe una diversidad de endurecedores capaces de dar diferentes propiedades a las resinas una vez que se concluye con el proceso de polimerización. Además, existen otros productos conocidos como “agentes modificadores” que son capaces de conseguir formulaciones rígidas o flexibles, con determinada característica de adherencia, mayor resistencia mecánica, mayor resistencia química e, incluso, para reducir los costos de una formulación sin alterar otro tipo de propiedades.

En el mercado se puede encontrar una amplia gama de agentes modificadores, entre los que se encuentran diluyentes, flexibilizadores, cargas y agentes tixotrópicos. También, es posible agregar algunos materiales de refuerzo como son fibras de vidrio, acero o materiales plásticos.

A continuación, se describe de forma general, el uso de los diferentes agentes modificadores (Fernández, 1981):

- a) *Endurecedores*: Estos agentes son capaces de reaccionar con los grupos epóxicos de la resina y son los encargados de que cambie de su estado líquido a sólido. Existen diferentes tipos de endurecedores los cuales cambian su composición para ajustarse al tiempo de aplicación que sea necesario. Es decir, algunos endurecedores pueden lograr que la resina tarde más o menos tiempo en fraguar, según sea necesario.

Las reacciones que se producen son exotérmicas, tal que se pueden alcanzar temperaturas hasta de 523.5 K (250 °C). Las temperaturas ocasionan cambios en las propiedades físicas de la resina, por lo que es necesario encontrar un endurecedor que proporcione las condiciones y propiedades solicitadas en el proyecto.

- b) *Diluyentes*: Son agentes que se agregan con la finalidad de disminuir la viscosidad de una formulación epoxi, lo cual permite una mayor versatilidad en la aplicación. También se utilizan para modificar el tiempo de aplicación, exotermismo y algunas propiedades mecánicas. Uno de sus usos principales es en la formulación de resina para inyección de grietas estructurales.

- c) *Flexibilizadores*: Se agregan a la formulación con la finalidad de disminuir la rigidez final de la resina permitiendo que se desarrollen en ella grandes deformaciones cuando es sometida a cargas; también logra mantener las propiedades de la formulación ante diferentes choques térmicos.
- d) *Cargas*: Se emplean principalmente para reducir el coste de las formulaciones y mejorar algunas de sus propiedades. Este tipo de agentes también ayudan a reducir la retracción por curado, disminuye la temperatura de reacción, aumenta la dureza superficial y aumenta la resistencia a la compresión y la resistencia eléctrica.

Entre las desventajas de usar las cargas se encuentra un aumento considerable de peso, pérdida de transparencia y una disminución de la resistencia a la tensión y al impacto. Además, puede haber variaciones en la viscosidad. Las cargas pueden ser a base de sílice, cuarzo, caliza, grafito y otros metales. Dependiendo de la propiedad que se desee resaltar se usará el tipo de carga como se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1 Relación entre propiedades y cargas (Fernández, 1981)

PROPIEDAD	CARGA A UTILIZAR
Abaratamiento	Sílice, carbonato cálcico.
Aislamiento eléctrico	Amianto (asbesto), mica, sílice.
Coefficiente de dilatación	Silicato de aluminio, litio.
Conductividad eléctrica	Polvo de aluminio, carbón, grafito.
Conductividad térmica	Sílice, polvos metálicos.
Densidad	Micro esferas de vidrio.
Estabilidad dimensional	Sílice, polvos metálicos.
Resistencia a la flexión	Fibra de vidrio, nylon.
Resistencia a la humedad	Carbón en polvo, mica, sílice.
Resistencia a la tensión	Fibra de vidrio, nylon.
Resistencia al calor	Carbón, amianto (asbesto).
Resistencia al impacto	Fibra de vidrio, nylon.
Resistencia química	Amianto (asbesto), polvo de carbón.
Retardadores de fuego	Materiales inorgánicos.
Trabajabilidad	Polvo de aluminio, carbonato de calcio.

- e) *Agentes tixotrópicos*: Estos agentes son un tipo de carga que aumenta la viscosidad de la formulación empleada y le proporciona la capacidad de resistir esfuerzos cortantes relativamente altos antes de que falle su estructura.

Las formulaciones también pueden incluir la adición de materiales de refuerzo, pigmentos e, incluso, se han realizado formulaciones con combinaciones de resinas como es el caso de la resina epoxi con la resina vinílica. Sin embargo, esto es más común en la reparación de pavimentos o trabajos que no corresponden a la edificación.

En resumen, podemos decir que para poder hacer uso de las resinas epoxi es necesario conocer las propiedades que se necesitan en el proyecto y, de esta manera, diseñar la formulación más adecuada dependiendo el caso. Por ejemplo, para hacer uso de la inyección de resina epoxi es necesario que se cuente con una viscosidad adecuada, baja temperatura de reacción, que el tiempo de fraguado sea el adecuado y cumpla con las propiedades mecánicas que mejoren el comportamiento de los elementos de concreto.

En la Figura 5 se resumen, de forma esquemática, los principales componentes de las formulaciones epoxi.

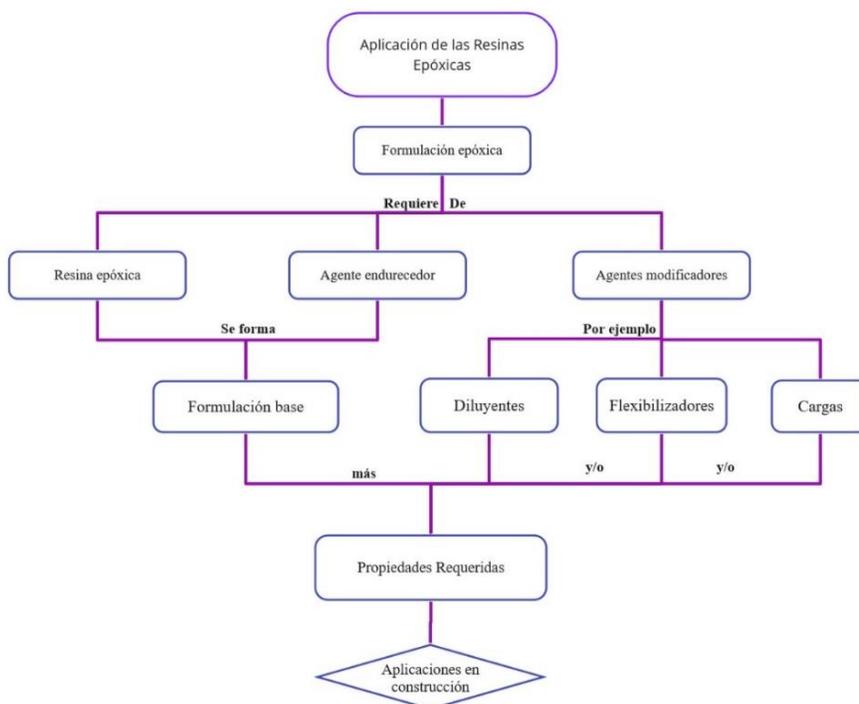


Figura 5 Componentes principales de las resinas epoxi

miro

1.5. PROPIEDADES DE LAS RESINAS EPOXI

Las propiedades de las resinas epoxi dependen completamente de la formulación empleada. Como ya se señaló, la formulación base está compuesta por la propia resina y un agente endurecedor. Además, se pueden agregar agentes modificadores para mejorar o resaltar propiedades específicas. De esta forma, el usuario tiene la posibilidad de diseñar o modificar las propiedades según le convenga al tipo de aplicación que se le dará.

A pesar de que cada formulación tendrá propiedades diferentes, existen ciertos parámetros que permiten conocer, de forma general y numérica, las propiedades que se pueden llegar a alcanzar. De acuerdo con Fernández (1981), las principales propiedades que las resinas epoxi pueden alcanzar para fines de la industria de la construcción son las siguientes:

- ✓ Fuerte adherencia a casi todos los materiales.
- ✓ Una pequeña retracción durante el curado.
- ✓ Estabilidad dimensional después del curado.
- ✓ Excelentes características mecánicas.
- ✓ Elevada resistencia a agentes químicos.

Para el uso de las resinas en el campo de la construcción, las propiedades que nos interesa conocer se dividen en dos tipos: propiedades físicas y propiedades químicas. Gracias a estos parámetros podemos elegir la formulación que mejor se adapte al trabajo necesario, en este caso, a las actividades de rehabilitación de estructuras de concreto. En el inciso 1.5.1 se discuten las propiedades físicas de las resinas; en 1.5.2, las propiedades químicas.

1.5.1. Propiedades físicas de la resina epoxi

Dentro de las propiedades físicas, las resinas exhiben una gran resistencia a tensión y compresión, una amplia variabilidad en cuanto a su viscosidad, una buena adherencia, adquieren sus propiedades en un tiempo corto, desarrollan un módulo de elasticidad bastante bueno, además de ser un material tenaz y resiliente, por mencionar algunas.

Este tipo de material cuenta con una gran resistencia tanto a tensión como a compresión. Se conoce que es capaz de alcanzar una resistencia a tensión que se encuentra desde 30 MPa (300 kg/cm²) hasta 90 MPa (900 kg/cm²), mientras que su resistencia a la compresión oscila entre 120 y 210 MPa (1200 y 2100 kg/cm²).

También se conoce que, dependiendo el uso, se puede obtener una viscosidad que va desde 1 hasta 15 kg/ms (1000 a 15000 centípoise). Cuenta con un módulo de elasticidad que varía desde 1.5 GPa (15,000 kg/cm²), hasta 35GPa (350,000 kg/cm²). Posee una deformación de rotura que oscila entre 2 y 5% en formulaciones que no cuenta con cargas. Además, adquiere una alta tenacidad y resistencia a la abrasión y al desgaste.

En cuanto a la velocidad de fraguado, ésta depende totalmente de la formulación empleada. El tiempo inicia en el instante que se mezclan los componentes de la resina base. Al tratarse de una reacción exotérmica, el aumento de la temperatura acelera la reacción de modo que se debe considerar la temperatura ambiente del lugar (Fernández, 1981).

Es importante conocer que durante este proceso se cuenta con un tiempo límite de utilización, el cual comienza durante la mezcla de la resina y el endurecedor, y concluye en el momento en el que la resina comienza a gelificarse y posteriormente, a endurecerse. Este tiempo dependerá del modo de aplicación y suele ser indicado por el fabricante.

Posterior a esto, comienza el tiempo de endurecimiento final, en el cual la resina adquiere todas sus propiedades. Si bien en muchos casos se ha proyectado un tiempo de 28 días, igual que el concreto, la realidad es que la resina es capaz de alcanzar entre 90% y 100% de su endurecimiento en siete días.

Las resinas epoxi cuentan con un coeficiente de dilatación térmica que suele oscilar entre 4.0 y 5.8×10^{-5} m/m•K y muy buena conductividad térmica. Al mismo tiempo, este material posee una estabilidad térmica muy buena. Sin embargo, a temperaturas altas se presenta una disminución de las propiedades mecánicas y existe un aumento en su capacidad de deformación. Estos fenómenos comienzan a ocurrir a partir de 333 K (60°C) en formulaciones normales y hasta 373 K (100°C) en formulaciones modificadas para soportar una mayor temperatura.

1.5.2. Propiedades químicas de la resina epoxi

Dentro de las propiedades químicas más importantes destaca su termoestabilidad, es decir, que al elevarse la temperatura las cadenas moleculares del polímero se compactan aún más formando una estructura resistente a la degradación, una vez que se ha solidificado. Asimismo, tienen una gran facilidad de reacción, por lo que es posible agregar ciertos modificadores para conseguir las propiedades deseadas según su uso.

Las resinas poseen una gran resistencia a los agentes químicos lo que la hace útil para aplicarse en lugares que puedan estar expuestos a la intemperie. De acuerdo con Fernández (1981), se han realizado pruebas en donde se sumergían algunas formulaciones de resina epoxi en compuestos químicos como el hidróxido sódico o ácidos como el sulfúrico y nítrico. Se observó que la mayoría de las muestras no fue afectada o presentó solamente pérdida de coloración.

1.6. USOS DE LAS RESINAS EPOXI

Dentro del campo de la construcción, las aplicaciones de las resinas epoxi se pueden dividir en cuatro grupos:

1. Adhesivos.
2. Protecciones y revestimientos superficiales.
3. Refuerzo y reparaciones estructurales.
4. Otras aplicaciones que no entran en las categorías anteriores.

En las aplicaciones más comunes podemos encontrar las siguientes:

- Membranas impermeabilizantes.
- Morteros para reparaciones.
- Pinturas anticorrosivas.
- Reparación de grietas mediante la inyección de resina epoxi.
- Revestimientos de depósitos destinados a contener productos agresivos al concreto.
- Unión de acero, bronce y otros metales entre sí.
- Unión de acero con concreto.
- Unión entre concreto fresco y endurecido.
- Unión entre sí de elementos prefabricados.

Gracias a sus propiedades y a su gran flexibilidad en cuanto a sus formulaciones y a los agentes modificadores, las resinas epoxi han ido adquiriendo cada vez mayor importancia en la construcción, principalmente en la rehabilitación y reparación de elementos de concreto que han resultado dañados después de un sismo.

Se entiende por rehabilitación, el proceso de intervención estructural para recuperar las condiciones originales (reparación) o para mejorar el comportamiento de los elementos y sistemas estructurales con el fin de cumplir con los requisitos de seguridad contra colapso y de limitación de daños establecidos en el reglamento (Alcocer y Murià, 2021).

En los incisos 1.6.1 y 1.6.2, se describen las principales aplicaciones que se les da en la rehabilitación de elementos estructurales de concreto.

1.6.1. Descripción de la resina epoxi como adhesivo

Una de las principales aplicaciones de las resinas epoxi es como adhesivo, ya que es capaz de unir entre sí dos materiales iguales o distintos. Este uso es característico en la unión de elementos metálicos, ya que disminuyen la aparición de esfuerzos concentrados comúnmente generadas en uniones soldadas o atornilladas.

Los adhesivos epóxicos proporcionan uniones muy fuertes con materiales de la misma naturaleza como el vidrio, la madera, el concreto, los metales y algunos tipos de plásticos. Esta propiedad se debe a su composición química que permiten una unión mecánica y a nivel molecular.

Algunas ventajas que podemos destacar del uso de la resina epoxi como adhesivo son:

- Una unión rígida o flexible, según se requiera.
- Alta resistencia de la unión.
- Baja temperatura de curado.
- Unión de superficies impermeables.
- Uniones en fluencia reducida bajo cargas prolongadas.

En el campo de la ingeniería civil, principalmente en la rehabilitación de estructuras de concreto, se ha utilizado para la unión de un concreto endurecido con algún concreto fresco, para unir o reparar concretos ya endurecidos entre sí, en la unión de dovelas y elementos prefabricados, de acero de refuerzo con concreto previamente endurecido, de pilotes prefabricados, de señales de tránsito y reparación de pavimentos. Gracias a sus propiedades adhesivas, se ha utilizado en la reparación de grietas en elementos de concreto en puentes, carreteras y edificios ocasionadas por algún fenómeno natural o desgaste por el paso del tiempo.

Debido a esto surgió la necesidad de conocer si la resina epoxi es un material adecuado para la reparación de concretos. Por ello en 1.6.2 se explican las primeras bases para el uso de la resina en elementos estructurales antes de llegar al procedimiento actual de inyección de resinas epoxi para rehabilitación de estructuras de concreto el cual se presenta en el Capítulo 2.

1.6.2. Reparación de concretos

1.6.2.1. Unión entre concreto fresco y concreto endurecido

En construcción, es frecuente la necesidad de unir un concreto que ya ha endurecido con un concreto fresco. Sin embargo, se tienen que utilizar diferentes técnicas para evitar el deslizamiento entre ellos, como es el dejar embebido acero de refuerzo en ambos concretos para que funcione como un sistema de anclas de cortante por fricción (Fernández, 1981). Este tipo de técnicas se utiliza principalmente en colados que no se pueden terminar en un solo día como carreteras de concreto hidráulico, losas, columnas de edificaciones, etc.

De acuerdo con Fernández (1981), es usual la reparación de elementos en los cuales no es posible colocar algún tipo de acero de refuerzo que funcione como anclaje, como es el caso

de la reparación de grietas y la reparación de edificaciones históricas que no pueden ser modificadas por su importancia arquitectónica. En estos casos, el uso de la resina epoxi es muy eficaz.

La resina epoxi logra evitar una discontinuidad, por ende, un punto débil de los elementos lo cual le proporciona una eficacia en la transmisión de cargas y adquiere una gran resistencia a la tensión y compresión.

Este tipo de aplicación ha conducido a estudios experimentales en diferentes partes del mundo para lograr su aplicación de una manera segura. El Instituto Eduardo Torroja (desde 1961), en sus publicaciones "*Informes de la Construcción*", se ha dedicado a realizar experimentación que corrobora la resistencia, efectividad y seguridad del uso de la resina como adhesivo.

En este instituto se unieron secciones de vigas de concreto, una de ellas ya endurecida y la otra colada en sitio, con resina epoxi y se ensayaron a flexión. Los resultados mostraron que la falla en las vigas se producía fuera de la zona de unión, es decir, se mostraba que la unión era más resistente que el propio concreto.

Como se ha señalado las formulaciones empleadas para realizar este tipo de uniones entre concretos deben considerar un tiempo de utilización y endurecimiento lento con el propósito de darle tiempo suficiente al concreto para que comience su fraguado antes que la resina comience a endurecerse. Por eso es necesario conocer el tiempo de fraguado del concreto. Además, debe considerarse una formulación que sea capaz de ser insensible a la humedad para tener mejores resultados.

Un factor muy importante es la preparación de la superficie del concreto endurecido. Debe ser una superficie limpia, sana y libre de cualquier tipo de recubrimiento o mortero. Antes de la aplicación hay que cerciorarse que no tenga polvo o humedad.

Ya que la zona de aplicación ha sido limpiada, se procede a aplicar la resina mediante pinceles o cepillos sobre el concreto endurecido en capas aproximadamente de 0.015 mm hasta llegar a un espesor de 0.25 mm. En general, se presenta un rendimiento de la resina de 1 a 2 kg/m².

Una vez colocada la capa de resina, se procede a colocar la cimbra y colocar el concreto fresco. Se recomienda que el concreto no se encuentre muy húmedo cuando se aplique la resina, ya que esto podría afectar sus propiedades.

También, se han llevaron a cabo algunos ensayos para estimar la calidad de las uniones efectuadas con formulaciones epoxi (Fernández, 1966). Los ensayos se realizaron en especímenes prismáticos de sección rectangular de 100 x 150 mm con una longitud de 1.2 m, conformados por dos partes de 600 mm de longitud cada una unidos mediante una

formulación epoxi. Para estos especímenes se utilizó una formulación epoxi tipo Araldit GY-250, un agente flexibilizador 13123 y un agente endurecedor HY-960.

Lo primero que se realizó fue el colado de la primera parte que se mantuvo en una cámara de curado por 28 días. Posteriormente se retiró de la cámara de curado y, una vez seco, se aplicó la formulación de resina epoxi, colocándose después el concreto de la otra mitad de la probeta. Después se metió a la cámara de curado por 28 días más.

Una vez que la probeta estaba lista, se sometió a una prueba a flexión hasta llevarse a la falla. Esta prueba se realizó sobre apoyos cilíndricos separados 900 mm aplicándose una carga progresiva a través de dos apoyos cilíndricos separados entre sí 300 mm (Figura 6).

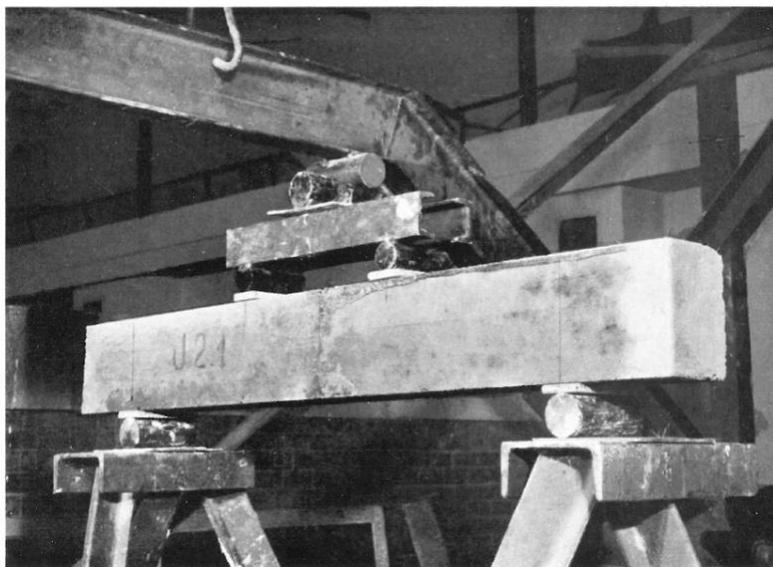


Figura 6 Configuración del ensayo de la probeta de viga (Fernandez, 1966).

Se probaron concretos de tres resistencias diferentes, 30, 40 y 50 MPa (300, 400 y 500 kg/cm²)¹. Las probetas fueron cargadas progresivamente hasta llevarlas a la falla. De este procedimiento se obtuvo la velocidad de falla y la distancia a la que este se encontraba de la unión realizada con la formulación epoxi.

Se observó que al utilizar un concreto con $f_c' = 30$ MPa (300 kg/cm²) la resistencia mínima a la falla a tensión se alcanzó a 1.6 MPa (16 kg/cm²), mientras que la máxima se midió en 2.34 MPa (23.4 kg/cm²), con un promedio de 1.94 MPa (19.4 kg/cm²) como se muestra en la Tabla 2. Cabe resaltar que las fallas se presentaron en el concreto más joven y no en la unión como se muestra en la Figura 7.

¹ La conversión entre MPa y kg/cm² se ha aproximado por facilidad. De manera exacta 1 MPa = 9.81 kg/cm².

Tabla 2. Resultados obtenidos de la prueba a flexión para un concreto de 30 MPa (300 kg/cm²) (Fernández, 1966)

Núm. Probeta	Dosificación de cemento (kg/m ²)	Esfuerzo de falla (kg/cm ²) ^[1]	Posición de la falla
1	300	17.1	Concreto nuevo
2		16.0	Concreto nuevo
3		20.0	Concreto nuevo
4		18.8	Concreto nuevo
5		21.2	Concreto nuevo
6		23.4	Concreto nuevo
Promedio		19.4	Concreto nuevo

^[1] 1.0MPa = 9.81 m/s²

Para el caso de las probetas con $f_c' = 40$ MPa (400 kg/cm²) y 50 MPa (500 kg/cm²) se alcanzaron resistencias más altas, llegando a un promedio, en el primer caso, de 3.38 MPa (33.8 kg/cm²) y 3.68 MPa (36.8 kg/cm²) para el último, como se muestra en la Tabla 3 y Tabla 4, respectivamente. Se observó que para el caso de un $f_c' = 40$ MPa (400kg/cm²), dos especímenes presentaron la falla en la unión. Los resultados muestran que en esta probeta la resistencia alcanzada fue menor que la máxima, lo cual se atribuye a una deficiencia constructiva.

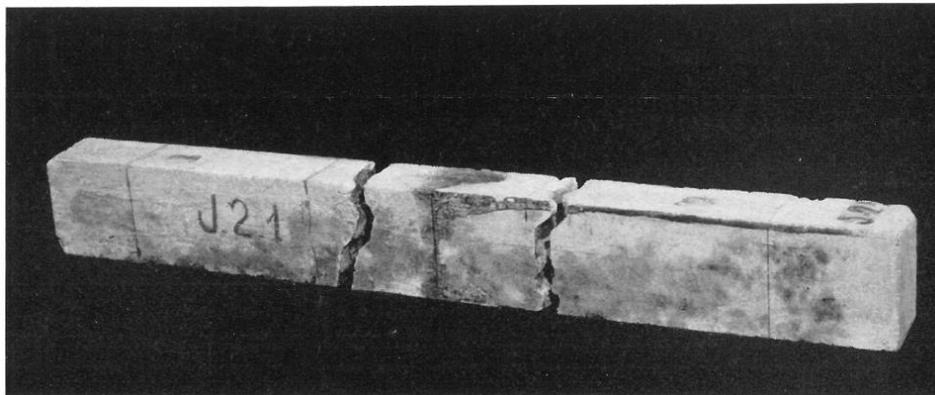


Figura 7. Especimen de viga mostrando la sección de falla (Fernández , 1966)

En el último caso de probetas de $f_c' = 50$ MPa (500 kg/cm²), se observó que todas las fallas ocurrieron en el concreto nuevo, por lo que se considera que el procedimiento constructivo es muy importante al llevar a cabo este tipo de trabajos. Además, se ensayaron probetas testigo las cuales se unieron sin ningún tipo de adhesivo y se probaron de la misma forma. Para los ensayos de los testigos el esfuerzo promedio de falla fue de 1.74 MPa (17.4 kg/cm²) y en las seis probetas ensayadas la falla ocurrió en la junta que no llevó ningún tratamiento.

Tabla 3. Resultados obtenidos de la prueba a flexión para un concreto de 40 MPa (400 kg/cm²) (Fernández, 1966)

Núm. Probeta	Dosificación de cemento (kg/m ³)	Esfuerzo de falla (kg/cm ²) ^[1]	Posición de la falla
1	400	35.3	Concreto nuevo
2		29.0	Junta
3		37.0	Concreto nuevo
4		36.5	Concreto nuevo
5		36.2	Concreto nuevo
6		29.0	Junta
Promedio		33.8	Concreto nuevo

^[1] 1.0MPa = 9.81 m/s²

Tabla 4. Resultados obtenidos de la prueba a flexión para un concreto de 50 MPa (500 kg/cm²) (Fernández, 1966).

Núm. Probeta	Dosificación de cemento (kg/m ³)	Esfuerzo de falla (kg/cm ²) ^[1]	Posición de la falla
1	500	37	Concreto nuevo
2		36.5	Concreto nuevo
3		37	Concreto nuevo
4		35.6	Concreto nuevo
5		39.1	Concreto nuevo
6		35.9	Concreto nuevo
Promedio		36.85	Concreto nuevo

^[1] 1.0MPa = 9.81 m/s²

1.6.2.2. Unión entre concretos endurecidos

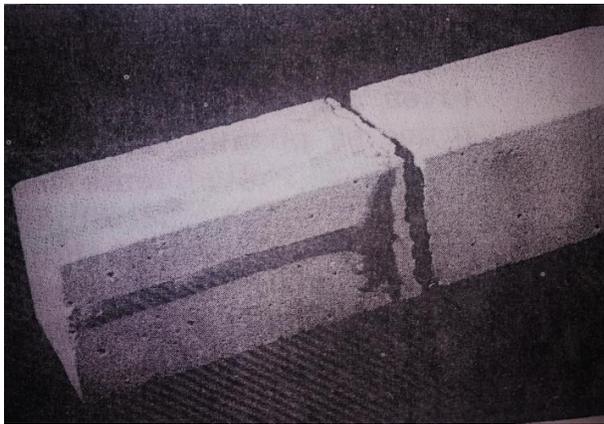
La unión entre concretos endurecidos es una de las aplicaciones más importantes, debido a que es la base sobre la cual se realizan procedimientos de rehabilitación, como es el caso de la inyección de resinas epoxi en grietas de elementos de concreto. Un primer paso antes de llegar a la inyección como tal es observar el comportamiento de una formulación epoxi al unir dos concretos previamente endurecidos. Lo que se busca con estos procedimientos es regresarles a los elementos la continuidad y un adecuado mecanismo de transmisión de cargas.

Se pueden utilizar las mismas formulaciones que para el caso anterior. Se debe prestar atención al tiempo de endurecimiento de formulaciones utilizadas en la unión de concretos endurecidos que debe ser más corto.

Para esta aplicación se debe considerar la porosidad de los elementos a unir, ya que es posible que la formulación sea absorbida por los poros, lo que ocasionaría una falla por deficiencia del procedimiento constructivo. Se debe realizar una preparación previa a la aplicación, mediante la verificación de que no cuente con polvo y de ser posible, se recomienda que se sople mediante aire seco. Si se sopla con aire se debe asegurar que la línea de aire no lleve partículas de aceites o agua que puedan retrasar el fraguado.

La aplicación en este caso puede hacerse a mano, con pinceles, cepillos medianos o rodillos. Se debe colocar la formulación en los dos elementos a unir extendiéndolo lo más uniforme posible. Posterior a ello, los elementos se ponen en contacto y se presionan para evitar cualquier tipo de movimiento entre ellas. El tiempo mínimo que deben permanecer presionadas es de 24 h, mientras que la resistencia final puede alcanzarse entre cuatro y siete días. Este tipo de aplicación se utiliza en la unión de elementos prefabricados, unión de dovelas, uniones en puentes, uniones de pilotes y reparación de grietas.

Para verificar este tipo de unión, se han ensayado probetas a flexión y a tensión (Fernández, 1981). Una vez falladas se procedió a unir las por medio de una formulación epoxi. Una semana después se volvieron a probar y se observó que las fallas aparecían fuera de las secciones pegadas como se muestra en la Figura 8.



a) Probeta sometida a flexión



b) Probeta sometida a tensión pura

Figura 8. Ensayos en probetas después de su reparación (Fernández, 1981)

1.6.2.3. Adherencia entre concreto y acero

La unión entre concreto y acero es una de las aplicaciones más comunes en la industria de la construcción, principalmente en la rehabilitación de estructuras dañadas después de un sismo. Las formulaciones de resinas epoxi tienen la propiedad de ser un buen adherente entre el concreto y el acero. Gracias a esto se han desarrollado un sinnúmero de aplicaciones desde el empleo de anclajes metálicos en concretos, la colocación de placas de acero en concreto, uniones entre sistemas estructurales de concreto y acero, entre otros.

Las uniones entre concreto y acero son eficaces frente a los esfuerzos cortantes, tensiones y compresiones producidas por momentos flexionantes, siendo en todos los casos, los resultados beneficiosos. Esto ha dado paso a la creación de nuevos métodos de rehabilitación de estructuras como es el caso de encamisados de elementos de concreto con placas o perfiles de acero.

El método consiste en adosar refuerzos de tensión, compresión y cortante a una viga o columna de concreto, es decir colocar estos refuerzos en formas de placas de acero pegadas a sus caras con una formulación epoxi. Los resultados de esta técnica han sido excelentes, (Fernández, 1981). Incluso se ha llegado a hablar de aplicaciones en vigas mixtas en donde se utilizan perfiles de acero doble T y la parte a compresión está constituida por una capa de concreto plana unida mediante una formulación epoxi.

Otra aplicación que se ha desarrollado en el campo de la rehabilitación de estructuras, consiste en el anclaje de nuevos elementos estructurales a los que ya existían. Un ejemplo es la adición de nuevos muros de carga a una estructura de marcos de concreto, el ensanchamiento de columnas, entre otras. Este anclaje se puede dar debido a que algunas formulaciones epoxi son capaces de soportar esfuerzos a cortante muy grandes. De esta forma, hoy en día, es común el uso de anclas de acero adheridas mediante resinas epoxi para unir algunos elementos estructurales.

Algunas de las consideraciones que se deben tomar en cuenta es la profundidad de anclaje, la resistencia del concreto, el tiempo de endurecimiento y la limpieza del lugar de la colocación del ancla. Para realizar la aplicación es necesario contar con inyectoras de resina o pistolas las cuales logren ingresar la resina al puerto de colocación.

De esta manera se muestra la variedad de aplicaciones que tienen las resinas epoxi en otro tipo de técnicas de rehabilitación como reforzamiento de vigas y columnas con refuerzos de placas de acero, colocación de muros de carga, entre otras. Dichas técnicas no son objeto de estudio en esta tesis.

1.7. CONCLUSIONES

De este capítulo se concluye que:

- a) Las resinas epoxi han tenido un desarrollo muy rápido y amplio.
- b) Se tienen formulaciones muy variadas para distintas aplicaciones.
- c) Las propiedades físicas y químicas de las resinas epoxi son muy favorables para la industria de la construcción, en general, y para la rehabilitación, en particular.
- d) Los resultados satisfactorios para el uso adhesivo entre diferentes materiales se han logrado gracias a una formulación química robusta y una instalación siguiendo mejores prácticas.
- e) Para lograr los resultados obtenidos en laboratorio se deben utilizar materiales normalizados establecidos en las normas ASTM y estándares NMX.
- f) Las resinas epoxi han mostrado tener el potencial para ser utilizadas y consideradas para su uso en la técnica de rehabilitación de reparación de grietas mediante la inyección de resinas epoxi.

CAPÍTULO 2

INYECCIÓN DE RESINA EPOXI COMO MÉTODO DE REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL

2.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se explica la técnica de rehabilitación de reparación de grietas en elementos estructurales de concreto mediante el uso de la inyección de resinas epoxi. Se describe el alcance de recuperación de los elementos estructurales de concreto en cuanto a rigidez, ductilidad y resistencia. Se menciona el tamaño y tipo de grietas que se pueden reparar mediante la inyección de resina epoxi, así como las propiedades que deben tener las formulaciones que serán inyectadas, tales como viscosidad, resistencia, tiempo de curado, entre otras.

Además, se muestran los principales métodos de inyección de resinas utilizados en laboratorio y se describe cuál de ellos es el mejor para ser aplicado en campo. Finalmente se concluye con las actividades del procedimiento en donde se debe poner mayor atención para garantizar una inyección de resina epoxi completa y funcional.

2.2. DESCRIPCIÓN DE LOS ALCANCES DE LA INYECCIÓN DE RESINA EPOXI

La inyección de resina epoxi es un procedimiento de rehabilitación que se utiliza en elementos de concreto que han tenido un deterioro bajo y no cuenta con desprendimientos (desconchamientos) importantes. Esta técnica se emplea para reparar elementos estructurales de concreto agrietado debido a las acciones sísmicas. Sólo en algunas ocasiones se ha utilizado para la reparación de muros de mampostería (Alcocer y Murià, 2019).

Esta técnica de rehabilitación busca la restitución de parte de la capacidad estructural con la que contaba el elemento en su estado original. Pretende regresar los elementos de concreto a un estado monolítico mediante la unión del concreto entre sí, además de brindar protección al acero de refuerzo del elemento que se haya descubierto o esté en contacto con el ambiente debido a las grietas.

Este método de rehabilitación se ha empleado principalmente en vigas y columnas de concreto, aunque también se ha aplicado en losas, muros, uniones viga-columna y cimentaciones, con la finalidad de restituir principalmente su resistencia, ductilidad y rigidez.

De acuerdo con León (1991), los primeros estudios en laboratorio mostraban que los elementos de concreto obtenían una resistencia de casi 90% de la resistencia original, mientras que otros estudios mostraban que, al repararse vigas con este método, exhibían un incremento en la resistencia en las zonas reparadas y un aumento general en la rigidez y el alargamiento de la zona de fluencia en los ciclos carga-desplazamiento.

La investigación de este método de rehabilitación no ha sido mucha, por lo que algunos autores mencionan diferentes porcentajes de recuperación en cuanto a las tres propiedades mencionadas; tal es el caso de Soto (2008) que muestra los siguientes niveles de recuperación de la Tabla 5 tomado de la información de Ramírez (1996).

Tabla 5 Niveles de recuperación de diferentes materiales (Abarca, 2020)

Material	Anchura de grieta (mm)	Niveles de recuperación			Características
		Resistencia (%)	Rigidez (%)	Ductilidad (%)	
Resinas epoxi	0.05 - 1.00	70 - 90	30 - 80	75 - 90	Sensibilidad a altas temperaturas. Difícil de utilizar con material poroso
Lechada	1.0 – 5.0	70 - 90	50 - 80	70 - 80	Para grietas limpias, sin impurezas
Mortero epóxico	> 5.0	70 - 90	30 - 80	75 - 90	Sensible a altas temperaturas
Mortero de cemento		80 - 120	50 - 100	80 - 90	Para elementos con pocas grietas grandes

Como se observa en la Tabla 5, los intervalos de porcentaje de recuperación para una inyección de resina epoxi son muy grandes, por lo cual se ha sugerido la implantación de otras técnicas que complementen el reforzamiento de las estructuras.

Actualmente, con la información presentada en el Capítulo 3 de esta tesis se busca una reducción de estos intervalos de recuperación con base en los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en diferentes países del mundo, con el fin de poder brindar datos más precisos y seguros y de esta manera generar edificaciones resilientes que al sufrir agrietamientos por sismos, la rehabilitación sea más segura, fácil, rápida y económica.

Se pretende que los diseñadores sean capaces de utilizar esta información para diseñar edificaciones que, al agrietarse, una inyección de grietas de manera acertada sea la única intervención que necesite para regresarla a su estado original.

Además, el objetivo de este capítulo es brindar una especificación más detallada del procedimiento de inyección como es el caso del tipo de resina a inyectar, el método a utilizar, los tipos de grietas que se pueden inyectar, grosores, etc.

Por ejemplo, las Norma para Rehabilitar Edificios de Concreto Dañados por el sismo del 19 de septiembre de 2017 (NTC- Rehabilitación, 2017), sólo mencionan que se podrá recurrir a la inyección de resinas o fluidos a base de polímeros únicamente por el método a presión y se pueden utilizar para grietas entre 0.02 y 5 mm de grosor.

2.3. TIPOS DE GRIETAS A INYECTAR

Para poder realizar el procedimiento de inyección es necesario conocer los diferentes tipos de grietas que existen en el concreto y cuáles son las causas más comunes que las originan (ACI 224.1R, 2007). Entre las causas más comunes se encuentran:

- Agrietamiento por contracción o secado.
- Agrietamiento por flexión de los elementos.
- Efectos de largo plazo.
- Microfisuración por compresión.
- Sobrecargas mecánicas (estáticas o dinámicas), como las que son producidas por sismos.
- Asentamientos diferenciales.

Las grietas se pueden clasificar como grietas activas y grietas inactivas (Soto, 2008). Las grietas activas son aquellas que registran movimiento, es decir que se abren y cierran periódicamente debido a ciertas cargas. Se forman como respuesta a movimientos continuos o a sobrecargas; su reparación es difícil y pueden variar su tamaño durante cambios de temperatura, por el contenido de humedad o como respuesta a la aplicación de más carga.

En contraste las grietas inactivas son aquellas que no presentan ningún tipo de movimiento; éstas no aumentan de tamaño ni longitud. Usualmente se generan por contracción del concreto, movimientos en los apoyos, sobrecargas estructurales y sismos.

Las grietas activas son difíciles de reparar debido a que se tiene que encontrar la fuente de su movimiento y cambiar las condiciones que la originan. Una vez que se controla esto, se puede reparar como las grietas inactivas. Las grietas inactivas se pueden reparar mediante la inyección de resinas epoxi sin complicaciones.

De acuerdo con el documento ACI 224.1R (2007) las grietas se clasifican en dos tipos: grietas en concreto en estado plástico y grietas en concreto endurecido. Las grietas en estado plástico pueden presentarse por las siguientes situaciones:

- a) *Fisuración por contracción plástica.* El agrietamiento por contracción plástica ocurre cuando está sujeto a una pérdida de humedad muy rápida provocada por una combinación de factores que incluyen las temperaturas del aire y el concreto, la humedad relativa y la velocidad del tiempo en la superficie del concreto. Estos factores pueden combinarse de manera de provocar niveles altos de evaporación superficial tanto en climas cálidos como fríos (ACI 224.1R, 2007).

Si la humedad se evapora a una velocidad mayor de la que puede ser remplazada por el agua en exudación, el concreto superficial se contrae. Debido a la restricción del concreto que se encuentra debajo, se desarrollan esfuerzos de tensión que provocan grietas de poca profundidad, pero de longitud variable, que pueden formar un patrón poligonal aleatorio o bien aparecer paralelas. Estas grietas suelen ser bastante anchas en su superficie. Su longitud lleva a variar entre pocos milímetros y más de un metro, mientras que su separación entre ellas puede ser de escasos milímetros hasta 3 m.

- b) *Fisuración por precipitación de los agregados.* Una vez que se realiza la colocación, compactación y acabado del concreto, éste tiende a continuar compactándose. En este punto el concreto puede estar restringido por el acero de refuerzo, algún colado previo o por la misma cimbra. Estas restricciones pueden provocar vacíos y/o fisuras en el lugar de la restricción.

Normalmente cuando este tipo de grietas se asocia al acero de refuerzo se conoce que el asentamiento de los agregados aumenta a medida que aumenta el diámetro de las barras. Este tipo de grietas suelen darse cuando el vibrado del concreto es insuficiente o si se emplean cimbras muy flexibles o con pérdidas de lechada, comúnmente llamado sangrado.

Teniendo en cuenta la clasificación del ACI 224.1R (2007), las grietas en concreto endurecido pueden presentarse por las siguientes razones:

- a) *Contracción por secado.* El agrietamiento del concreto es la restricción de la contracción por secado. Esta es provocada por una pérdida de humedad en la pasta de cemento la cual se puede contraer hasta 1%.

Los cambios de volumen inducidos por los cambios en la humedad son una característica propia del concreto. Si la contracción del concreto se realizara de manera no restringida este no se agrietaría. Es la combinación de la contracción y las restricciones lo que provocan el desarrollo de esfuerzos de tensión en el concreto. Cuando los valores de los esfuerzos de tensión superan la resistencia a tensión del concreto es cuando se produce el agrietamiento.

La magnitud de los esfuerzos inducidos por el cambio volumétrico está dada por una combinación de factores incluyendo la contracción, el grado de restricción, el módulo de elasticidad y la magnitud del flujo plástico. El grado de contracción por secado depende, en mayor medida, de la cantidad y tipo de agregado asimismo del contenido de agua.

El agrietamiento superficial e irregular de muros y losas, comúnmente llamada piel de cocodrilo, es un ejemplo de la contracción por secado, aunque también se puede presentar en colados de concreto masivos (ACI 224.1R, 2007).

- b) *Esfuerzos de origen térmico.* Los cambios de temperatura dentro de una estructura de concreto pueden ser provocadas por partes de la estructura que pierden calor de hidratación a diferentes velocidades o por condiciones climáticas que enfrían o calientan sólo una parte de la estructura. Estas diferencias de temperatura ocasionan cambios en el volumen del concreto.

Los cambios de temperatura provocados por la disipación del calor en la hidratación del cemento normalmente afectan a concretos masivos que pueden incluir columnas, vigas y zapatas de gran tamaño, además de presas. Mientras que la diferencia de temperatura provocada por el ambiente puede afectar cualquier estructura de concreto.

Una caída importante en la temperatura puede provocar el agrietamiento de elementos expuestos al ambiente, mientras que un aumento de temperatura podría generar agrietamiento en la parte protegida de la misma (ACI 224.1R, 2007).

- c) *Reacciones químicas.* Algunos compuestos químicos son capaces de generar reacciones que agrieten el concreto. Estas reacciones pueden ser producto de los materiales utilizados en la preparación del concreto o de los materiales que están en contacto con el concreto una vez que este ha endurecido.

Ciertos agregados que contienen sílice activa y álcalis derivados de la hidratación del cemento producen una reacción que genera un gel expansivo que tiende a extraer el agua de otras partes del concreto, lo que ocasiona expansiones locales, esfuerzos de tensión y eventualmente agrietamiento.

Las aguas sulfatadas también representan un problema para el concreto ya que se produce una reacción química con el aluminato de calcio hidratado. De esta manera se forma el sulfoaluminato de calcio, el cual provoca un aumento de volumen, altos esfuerzos de tensión y, finalmente, el agrietamiento del concreto.

Otro ejemplo claro del agrietamiento por reacciones químicas es cuando el hidróxido de calcio de la pasta de cemento hidratada se combina con el dióxido de carbono del aire para formar carbonato de calcio el cual, al tener un menor volumen, genera esfuerzos de tensión que genera agrietamiento irregular en las superficies y puede ser grave en el caso de superficies frescas recién coladas (ACI 224.1R, 2007).

- d) Los procesos de *meteorización* que pueden provocar agrietamiento incluyen el congelamiento, deshielo, humedecimiento, secado, calentamiento y enfriamiento del concreto.

Los principales daños que se presentan por el congelamiento se deben a la presión hidráulica ejercida por el crecimiento de los cristales de hielo. Otros procesos de meteorización que pueden provocar el agrietamiento del concreto son los ciclos de humedecimiento y secado, así como de calentamiento y enfriamiento. Ambos procesos generan un cambio de volumen en el concreto, lo que puede llegar a generar fisuración.

- e) *Corrosión del acero de refuerzo*. La corrosión del acero de refuerzo es un proceso electroquímico que requiere un agente oxidante, humedad y flujo de electrones dentro del metal. El acero de los armados de concreto generalmente no se corroe ya que el ambiente es altamente alcalino y produce un recubrimiento de óxido protector conocido como protección pasiva.

El acero de refuerzo se puede corroer si la alcalinidad se reduce o es destruida por iones agresivos de cloruros. La corrosión produce óxidos e hidróxidos de hierro, cuyo volumen es mucho mayor que el hierro original. Esto ocasiona una aparición de esfuerzos de tensión alrededor de las barras produciendo grietas paralelas a las mismas o descascaramiento o desprendimiento del concreto.

Una vez que inician este tipo de grietas, el acero de refuerzo tiene mayor exposición a la humedad y al oxígeno, produciendo una condición que acelera la corrosión y el agrietamiento.

- f) *Prácticas constructivas inadecuadas*. En el campo existe una gran cantidad de prácticas constructivas inadecuadas, cuyo resultado puede ser el agrietamiento del concreto. Una de las más comunes es el agregar mayor cantidad de agua al concreto para aumentar su trabajabilidad. Esta acción reduce la resistencia del concreto, aumenta el asentamiento del agregado y aumenta la contracción por secado.

Además, si se agrega más cemento para compensar el incremento de agua en la mezcla comenzará un proceso de reacciones químicas de diferentes temperaturas

entre el concreto previamente mezclado y el agregado lo que ocasiona una diferencia de temperaturas que genera esfuerzos de tensión y posteriormente un agrietamiento.

La falta de una buena técnica de curado influye mucho en la aparición de grietas. Otro problema constructivo común es el uso de apoyos inadecuados en la cimbra lo que puede provocar una segregación de los agregados y posterior agrietamiento. La falta de juntas de contracción en puntos de esfuerzos de tensión elevadas y la compactación inadecuada también pueden ser causantes de agrietamiento.

- g) *Sobrecargas durante la construcción.* Algunas veces, durante el periodo de construcción, las estructuras son sometidas a mayores cargas que las que soportara en servicio. Estas sobrecargas se producen en edades tempranas del concreto, cuando es más susceptible a ser dañado y generar agrietamientos permanentes.

Los elementos prefabricados, tales como vigas y paneles son los más expuestos a este tipo de sobrecargas, sin embargo, el concreto colado en sitio no está exento de ser afectado. Un error común que se produce con este tipo de elementos es la mala colocación durante su montaje y transporte ya que se pueden inducir cargas que no se consideran durante su diseño de servicio.

El clima puede ser un factor que involuntariamente genere cargas constructivas. En climas fríos el concreto colado en sitio puede ser sometido a cargas extras si se utilizan calentadores para lograr una temperatura de trabajo elevada dentro de una estructura. Si los calentadores están cerca de los elementos de concreto exteriores puede producirse un gradiente térmico inaceptable dentro de los elementos.

Durante la etapa de construcción, el almacenamiento de los materiales y la operación de maquinaria pueden generar carga mayores que aquéllas para las cuales se diseñó. Las grietas generadas por estas situaciones sólo pueden prevenirse si el diseñador proporciona la información acerca de las limitaciones de carga de la estructura.

- h) *Errores de diseño y detallado.* Equivocarse desde el diseño puede provocar estructuras no satisfactorias hablando de la estética hasta una falla en su servicio o situaciones más peligrosas.

Los errores de diseño y detallado pueden generar agrietamiento inaceptable, incluye el uso de ángulos rentrantes mal detallados en esquinas de muros, elementos y losas prefabricados, incorrecta selección y detallado de los armados, la falta de juntas de contracción y el incorrecto diseño de las cimentaciones que producen asentamientos diferenciales.

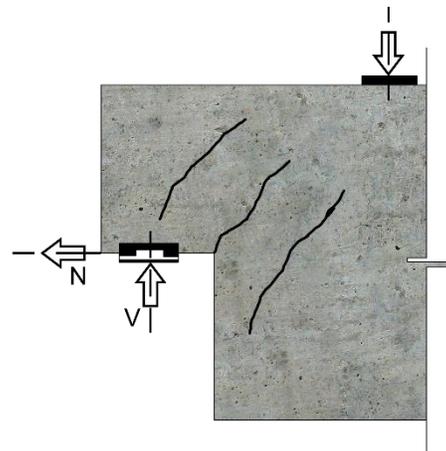
Los ángulos reentrantes crean concentración de tensiones y, por lo tanto, son los lugares preferidos para el inicio del agrietamiento. Los elevados esfuerzos de tensión son generados por cambios de volumen, cargas en su plano o flexión.

Algunos de los ejemplos más conocidos son los marcos de las puertas y las ventanas en muros de concreto y los extremos de las vigas entalladas (Figura 9).

Otro error común consiste en no colocar suficiente acero de refuerzo en aquellos elementos que se supone son “no estructurales”, pero estos terminan anclados a elementos que sí lo son, por lo que comienzan a soportar carga de manera proporcional a su rigidez. Debido a que este elemento no fue diseñado para soportar carga, se generan agrietamientos fácilmente.



a) *Patrones de agrietamiento en ángulos o esquinas*



b) *Patrón de agrietamiento característico en el extremo de una viga recortada o de peralte escalonado bajo carga de servicio*

Figura 9 Patrones de agrietamiento típicos (ACI 224.1R, 2007)

Una cimentación mal diseñada puede provocar asentamientos diferenciales excesivos dentro de la estructura. Si los asentamientos son pequeños, las grietas generadas serán meramente estéticas; sin embargo, cuando se presenta un asentamiento importante, es posible que la estructura no sea capaz de redistribuir las cargas con la velocidad suficiente para impedir la falla. Se debe tener especial cuidado en aquellas estructuras en las cuales el agrietamiento genere problemas de servicio.

- i) *Cargas aplicadas externamente.* Se conoce que las cargas de tensión provocan agrietamiento en los elementos de concreto. Este hecho permite que los diseñadores de concreto armado utilicen armados de acero para tomar dichas tensiones y generar la menor cantidad de grietas e imponer límites razonables.

Actualmente se sabe que, en elementos flexionados, las variables que controlan el agrietamiento son la fuerza de tensión de los armados, el espesor del recubrimiento y la dimensión de la sección de concreto que rodean las barras de refuerzo. Se sabe que el ancho de una grieta aumenta si se aumenta la fuerza a tensión.

El ancho de una grieta en la parte inferior de una viga aumenta a medida que aumenta el gradiente de deformación entre el acero y la cara a tensión máxima de la viga. Esto ha permitido desarrollar ecuaciones capaces de predecir el ancho máximo de grieta que se presentara a flexión. Se ha observado en pruebas que las grietas aparecidas son mayores que las predichas por dichas ecuaciones, aunque aún no se cuenta con suficiente información debido a los limitados datos disponibles en el tema (ACI 224.1R, 2007).

A pesar de que aún queda mucho que conocer acerca del agrietamiento, se conocen los principios básicos sobre el agrietamiento. Los armados bien distribuidas ofrecen la mejor protección contra la fisuración no deseada al igual que al reducir la tensión en el acero, utilizando mayor cantidad de acero de refuerzo, también se reduce la cantidad de grietas (ACI 224.1R, 2007).

2.4. EVALUACIÓN DE GRIETAS

Antes de iniciar cualquier proceso de reparación de grietas es importante identificar su ubicación y extensión. Se debe evaluar si la grieta representa un problema estructural actual o si podría ser un problema en el futuro, considerando las condiciones actuales y las consideraciones de carga que se pudieran presentar en un futuro.

Se debe realizar una revisión de planos, especificaciones y registros de construcción para conocer las condiciones y/o razones de que se hayan originado las grietas. Si estos documentos y una revisión exhaustiva en sitio no proporcionan las razones o información adecuada, será necesario realizar un análisis estructural completo.

Una vez que se identificó la causa del agrietamiento, que puede ser cualquiera de las descritas en la sección 2.3, tras una evaluación detallada y observación de las grietas en el sitio se debe decidir si reparar la grieta o no.

Se repararán las grietas si éstas reducen la resistencia, rigidez o durabilidad de un elemento estructural a niveles inaceptables o si la función de la estructura resulta seriamente perjudicada. Dependiendo del elemento de concreto a reparar se considerará pertinente la inyección, pues no es lo mismo el agrietamiento de una cisterna contenedora de agua, una losa de cimentación que un muro o una columna, ya que dichos elementos tienen diferentes funciones que los vuelven únicos para un mismo tiempo de grieta.

De acuerdo con el ACI 224-R01 (2001), en la Tabla 6 se muestran los anchos de grieta tolerables de acuerdo con su condición de exposición. Se menciona que estos lineamientos son generales para el diseño y deben ser utilizados aplicando el criterio profesional. Trout (2006) cuenta con una clasificación de grietas para su inyección, esta se puede encontrar en el Anexo A.

Tabla 6 Anchos de grieta tolerables, según su condición de exposición (ACI 224-R01, 2001)

Condiciones de exposición	Ancho de grieta	
	in	mm
Aire seco o membrana protectora	0.016	0.41
Humedad, aire húmedo, tierra (suelo)	0.012	0.30
Productos químicos descongelantes	0.007	0.18
Agua de mar y rocío de agua de mar, humedecimiento y secado	0.006	0.15
Estructuras para retención de agua	0.004	0.10

2.4.1. Ubicación y magnitud de la grieta

La ubicación y magnitud del agrietamiento, así como el estado general de los elementos de concreto se pueden determinar mediante observaciones directas en el sitio, observaciones indirectas, ensayos no destructivos y destructivos y ensayos de testigos obtenidos de la estructura.

Observación directa: Se deben registrar las ubicaciones o anchos de las grietas utilizando un esquema del elemento. Se puede marcar una cuadrícula sobre la superficie de la estructura para facilitar la ubicación y tener una mayor precisión. Los anchos de grieta que se pueden medir con una precisión elevada son de 0.025 mm utilizando un comparador, que es un pequeño microscopio de mano con una escala en el lente más próximo a la superficie agrietada (véase Figura 10). Los anchos de grieta también pueden ser estimados mediante una tarjeta de comparación, que es una tarjeta transparente con líneas previamente marcadas con diferentes anchos especificados (Figura 11).

El esquema debe incluir observaciones a detalle de los elementos tales como desconchamiento, acero de refuerzo expuesto, deterioro superficial, manchas de oxido, entre otros aspectos y de esta forma conocer las condiciones del agrietamiento.

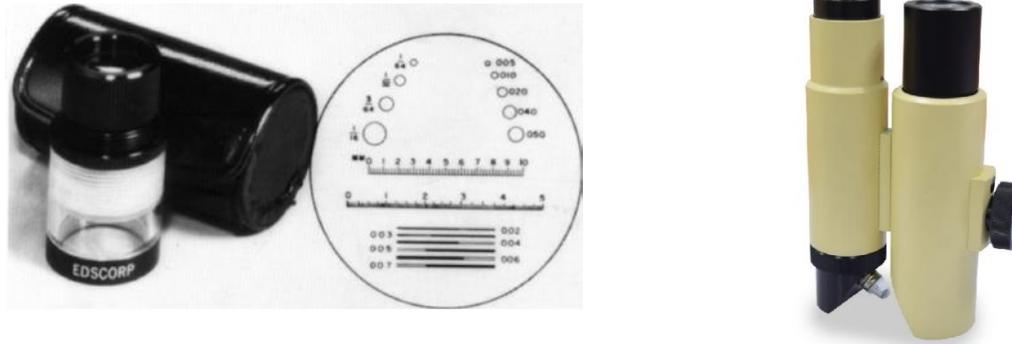


Figura 10. Comparador para medir ancho de grietas (ACI 224-R01, 2001)

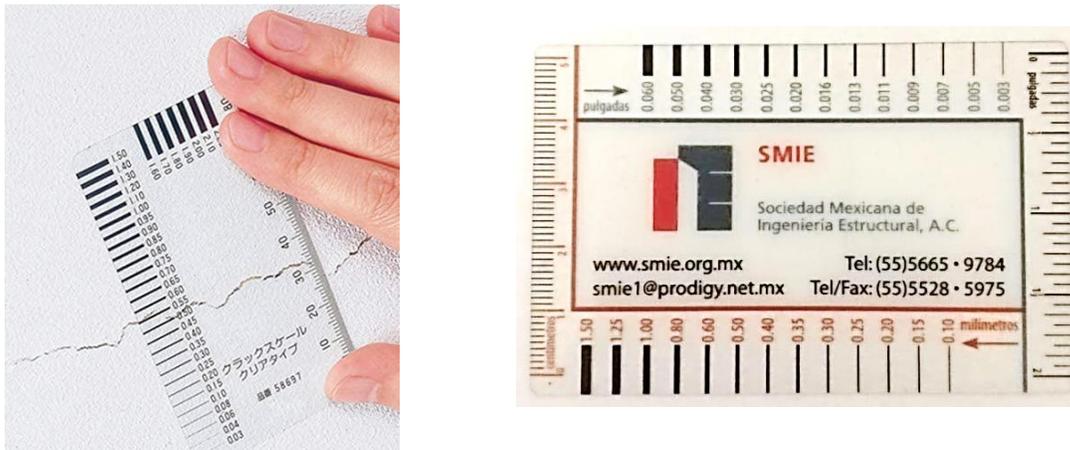
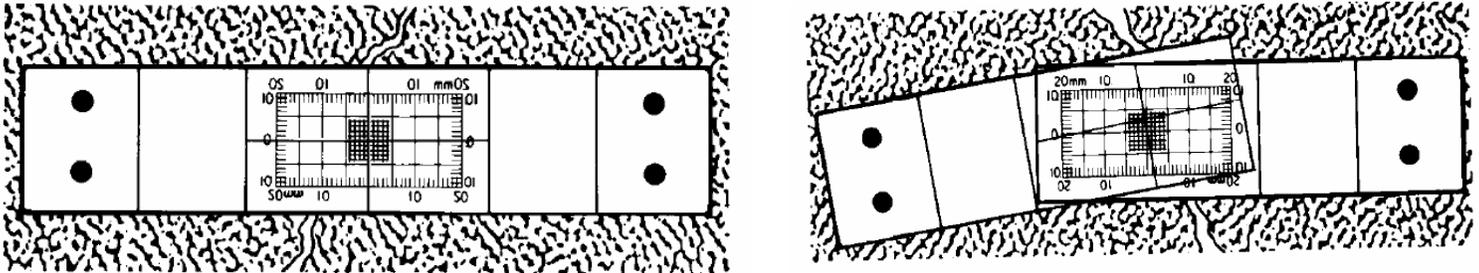


Figura 11. Tarjeta medidora de grietas (SMIE, 2017)

Es necesario conocer las condiciones internas de la grieta, para ver si no se presentan desplazamientos o movimientos. El movimiento en las grietas se puede supervisar mediante indicadores de movimiento mecánico llamados monitores (Figura 12). Consisten en la instrumentación de placas con cuadrículas en las grietas que permiten leer el desplazamiento y rotación en las grietas.

Otra forma de registrar el movimiento en grietas, puede presentarse mediante instrumentación que registra en tiempo real el movimiento del agrietamiento. Los indicadores mecánicos tienen la particularidad de no requerir protección en contra de la humedad. En caso de que se requieran historiales más detallados existe una gran variedad de transductores y sistemas de adquisición de datos cada vez a costos más asequibles.

Los esquemas del registro de la grieta se pueden completar con fotografías que documenten la condición de los elementos estructurales al momento de la investigación. Se sugiere consultar el Manual de Evaluación Postsísmica del INIFED (2020).



a) Monitor recién colocado

b) Monitor después del movimiento de la grieta

Figura 12. Monitoreo de movimiento de grietas (ACI 224-R01, 2001)

2.4.2. Ensayos no destructivos

Se pueden realizar ensayos no destructivos para determinar la presencia de grietas, vacíos y la profundidad de penetración de las grietas visibles. Golpear la superficie con un martillo o con una cadena de arrastre son formas muy prácticas para determinar si existe agrietamiento de tipo laminar cerca de la superficie.

La presencia de acero de refuerzo se puede determinar mediante el uso de un pacómetro (también llamado pachómetro). Estos instrumentos tienen la capacidad de indicar la presencia del acero e, incluso, hasta determinar la profundidad y el grosor de las barras dependiendo el tipo y modelo. En algunos casos es necesario retirar los recubrimientos para obtener información más precisa.

Si se observa que existe corrosión en la grieta, la forma más sencilla es retirar el concreto y observar que la barra este en óptimas condiciones.

Otra forma de detectar agrietamiento es realizando pruebas ultrasónicas no destructivas. Estas pruebas consisten en transmitir un pulso mecánico en una de las caras del concreto y recibirlo en la otra. El tiempo que tarda el pulso en atravesar el elemento se mide electrónicamente y si se conoce la distancia entre los transductores, se puede calcular la velocidad del pulso. Generalmente mientras mayor sea la velocidad del pulso mayor es la calidad del concreto.

Es posible que el transductor no reciba ninguna señal, lo cual significa que hay una discontinuidad importante en el elemento. Los equipos de ultrasonido deben ser operados por personas capacitadas ya que se puede tener una malinterpretación de los resultados por la existencia de humedad, armados de acero o elementos empotrados. También se puede confundir un gran número de pequeñas grietas muy cerca entre sí de una grieta muy importante (véase Figura 13).



Figura 13 Prueba de ultrasonido en una grieta (Cottier, 2020)

Además, existen equipos de rayos X y rayos gamma capaces de realizar radiografías y detectar discontinuidades en los elementos. Estos procedimientos son más adecuados para detectar planos de agrietamiento paralelos a la dirección de la radiación. Los equipos de rayos gamma suelen ser menos costosos y relativamente más compactos para ser utilizados en trabajos en sitio.

2.4.3. Ensayos en testigos o núcleos de concreto

Se puede obtener información relevante extrayendo testigos o núcleos de concreto de diferentes zonas seleccionadas de la estructura. Estos testigos y perforaciones permiten visualizar de mejor manera el ancho y la profundidad de las grietas. También es posible conocer la calidad del concreto mediante ensayos de resistencia a compresión, aunque para este tipo de pruebas no se deben utilizar muestras agrietadas.

Se puede realizar un análisis petrográfico para determinar las causas del agrietamiento, tales como reactividades alcalinas, ciclos de congelamiento y descongelamiento, agrietamiento

de borde, presencia de partículas expansivas, daños relacionados con incendios, retracción y contracción del concreto.

Este tipo de estudios también nos permite conocer factores de agrietamiento como son la relación agua-cemento utilizada en la mezcla, el volumen relativo de la pasta y la distribución de los componentes del concreto. Además de que se puede saber si existen indicios de corrosión en los armados de acero.

2.4.4. Revisión de planos e información constructiva

Se tendrá que hacer la revisión de diseño estructural, la disposición de los armados originales u otros planos que permitan confirmar que la calidad y el espesor de los elementos de concreto satisfacen y superan los requisitos de resistencia indicados en las normas de edificación aplicables a cada sitio.

Se deberá prestar especial atención a las cargas actuales a las que está sometido el inmueble y hacer la comparación con las cargas de diseño, para calcular los esfuerzos de tensión inducidos por la deformación del concreto.

2.5. ELECCIÓN DE UN MÉTODO DE REHABILITACIÓN

Una vez que se ha realizado una cuidadosa evaluación del agrietamiento de los elementos de concreto y se han identificado las causas y la magnitud del daño será posible elegir algún método de rehabilitación. De acuerdo con ACI 224.1R (2007) la selección del procedimiento se realizará para satisfacer los siguientes objetivos:

- 1) Restablecer y aumentar la resistencia.
- 2) Restablecer y aumentar la rigidez.
- 3) Mejorar la funcionalidad.
- 4) Mejorar la impermeabilidad.
- 5) Mejorar apariencia en la superficie del concreto.
- 6) Mejorar la durabilidad.
- 7) Impedir que se desarrolle un ambiente corrosivo.

Dependiendo el nivel de daño se puede utilizar algún procedimiento de rehabilitación. Por ejemplo, para restablecer la resistencia y rigidez de un elemento de concreto se puede realizar una inyección de resina epoxi. Si el daño es muy superficial bastará con aplicar algún tipo de mortero a base de cemento.

El objetivo de esta tesis es discutir la idoneidad de la inyección de resina epoxi en elementos de concreto para la restitución de sus propiedades originales, por lo que a continuación se explican las características que debe contar una formulación para poder ser inyectada y que ésta cumpla con los objetivos de una rehabilitación estructural de elementos de concreto.

2.6. PROPIEDADES DE LA FORMULACIÓN DE RESINA EPOXI PARA LA INYECCIÓN

Se sabe que existe una gran cantidad de resinas epoxi y endurecedores para realizar una formulación epoxi y satisfacer las necesidades de cualquier proyecto de inyección que se presente. Sin embargo, para los fabricantes no es factible diseñar una formulación de resina para cada proyecto en específico. En lugar de ello, los fabricantes se han dado a la tarea de producir formulaciones estándar que satisfagan las necesidades de los proyectos de inyección más característicos.

De esta manera, en el mercado existe una amplia oferta de formulaciones epoxi disponibles para la inyección de grietas. Para decidir cuál de ellas utilizar en un proyecto en particular, el diseñador y el constructor deben conocer las características del curado y de tipo ambiental que necesitaran.

El diseñador, primero, determinará cuales son las propiedades estructurales necesarias para el proyecto, como la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, la fluencia, etc. Posteriormente, el constructor debe definir las condiciones ambientales en las cuales se realizará el procedimiento de inyección tales como la temperatura, humedad, tiempo de exposición, tiempo de aplicación, entre otras.

Una vez definidos estos parámetros, el contratista especializado en la inyección de resina epoxi seleccionará la formulación de resina que cumpla con los requisitos, al mismo tiempo que proporcione la información del tiempo de aplicación, viscosidad y otras propiedades necesarias para facilitar el proceso de inyección.

La mayoría de los constructores que se especializan en la inyección de resinas epoxi utiliza las normas ASTM C881, *Especificación estándar para sistemas de resina epoxi para unión de concreto*, como guía. Ésta norma proporciona una clasificación de los sistemas de unión por tipo, grado, clase y color. En México no se cuenta con alguna norma de especificaciones para el uso de resinas epoxi como material adhesivo en construcción.

2.6.1. Norma ASTM C881 (2002)

La norma ASTM C881 (2002), reconoce siete tipos diferentes de resinas que se distinguen por sus requisitos en propiedades. Estos tipos se describen a continuación:

- **Tipo I:** Para uso en aplicaciones que no soportan carga para unir concreto endurecido con concreto endurecido y otros materiales, así como aglutinante en morteros y concretos epóxicos.

- **Tipo II:** Para uso en aplicaciones que no soportan carga, para unir concreto recién mezclado con concreto endurecido.
- **Tipo III:** Para uso en la unión de materiales antideslizantes con concreto endurecido y como aglutinante en morteros epóxicos utilizados en superficies de carpeta asfáltica (o sujetas a movimiento térmico o mecánico).
- **Tipo IV:** Para soportar carga, para unir concreto endurecido a concreto endurecido y otros materiales, así como aglutinante de morteros y concretos epóxicos.
- **Tipo V:** Para uso en aplicaciones con carga, para unir concreto recién mezclado con concreto endurecido.
- **Tipo VI:** Para unir y sellar elementos prefabricados a base de segmentos con tendones internos y para el montaje tramo a tramo cuando se aplica postensado temporal.
- **Tipo VII:** Para uso como sellador, no soporta cargas y se puede aplicar para sellado de juntas en elementos prefabricados.

En esta norma se describe también la clasificación de la resina en tres grados diferentes de acuerdo con sus características de flujo. Se distinguen por sus requisitos de viscosidad y consistencia. Estos grados son:

- **Grado 1.** Viscosidad baja (2000 cp, se usa para inyección de grietas).
- **Grado 2.** Viscosidad media (2000 a 10 000 cp, uso propósitos generales).
- **Grado 3.** Sin fluidez (más de 10 000 cp, uso para trabajos especiales).

En la tabla 7 se presentan los requisitos físicos de sistemas de unión con resinas epoxi.

La última clasificación que hace la norma ASTM C188 corresponde al intervalo de temperaturas para las que son adecuadas el uso de resinas. Dentro de las clases A, B y C se encuentran las resinas Tipo I a V, mientras que dentro de las clases D, E y F se encuentran las resinas tipo VI y VII. A continuación, se describen las clases y sus rangos de temperaturas:

- **Clase A:** Para uso por debajo de 4.0 °C (277 K) , mientras que la temperatura más baja se definirá por el fabricante del producto.
- **Clase B:** Para uso desde los 4.0 °C (277 K) hasta los 15.0 °C (288 K).

- **Clase C:** Para uso arriba de 15.0 °C (288 K), mientras que la temperatura máxima la define el fabricante del producto.
- **Clase D:** Para uso entre 4.0 °C (277 K) y 18.0 °C (291 K).
- **Clase E:** Para uso entre 18.0 °C (291 K) y 30.0 °C (303 K).
- **Clase F:** Para uso entre 25.0 °C (298 K) y 30.0 °C (303 K).

La temperatura en cuestión es la de la superficie del concreto endurecido al que se aplicará el sistema de unión. Se puede utilizar una clase de resina a una temperatura diferente a la especificada, sin embargo, esto cambiará la velocidad de endurecimiento. Por ejemplo: si se utiliza una resina Clase A, a temperatura ambiente ésta endurecerá mucho más rápido de lo que se especifica.

Las resinas que se utilizan para el procedimiento de inyección normalmente se clasifican como Tipo I y Tipo IV. Los diseñadores y el contratista que se basan en las normas ASTM C188 para la resina buscan resinas con las propiedades que se muestran en la Tabla 8.

Dentro de las propiedades más importantes antes del curado y después del curado se encuentra la resistencia a la compresión, la resistencia de adherencia, la resistencia a la tensión, el módulo de elasticidad E, la fluencia, la temperatura de deflexión térmica, la resistencia química y térmica, su vida útil antes de endurecer (pot-life), el tiempo de curado, la viscosidad, el coeficiente de expansión térmica y la tolerancia a la humedad.

2.6.2. Resistencia a la compresión

Esta propiedad suele ser a la que más importancia se le da por parte de los diseñadores y los constructores, aunque esta resistencia suele ser superior a la de los concretos a reparar. Por ejemplo, una resina Tipo I tiene una resistencia de 55 MPa (550 kg/cm²) mientras que el concreto tiene entre 25 MPa a 30 MPa (250 kg/cm² a 350 kg/cm²).

2.6.3. Resistencia de Adherencia

Es importante verificar que la resina cuente con una buena resistencia de adherencia por obvias razones. Esta resistencia se obtiene de realizar pruebas estandarizadas de cizallamiento o corte inclinado unidas mediante resina epoxi. En general, se requiere una fuerza de unión 10 MPa (100 kg/cm²). Para la inyección de resina epoxi esta propiedad no suele ser un problema ya que el modo de falla suele darse siempre en el concreto y no en la unión reparada.

Tabla 7 Requerimientos físicos de sistemas de unión (ASTM C188, 2002)

Propiedades	Tipo						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Viscosidad P, [Pa*s]							
Grado 1, máx.	20 [2.0]	20 [2.0]	20 [2.0]	20 [2.0]	20 [2.0]	-	-
Grado 2, mín.	20 [2.0]	20 [2.0]	20 [2.0]	20 [2.0]	20 [2.0]	-	-
Grado 2, máx.	100 [10]	100 [10]	100 [10]	100 [10]	100 [10]	-	-
Consistencia, in [mm]							
Grado 3, máx.	1/4 [6.0]	1/4 [6.0]	1/4 [6.0]	1/4 [6.0]	1/4 [6.0]	1/4 [6.0]	1/4 [6.0]
Tiempo Gel, minutos, mín.	30	30	30	30	30	30	30
Esfuerzo de unión psi [MPa]							
Mín. 2 días de curado	1000 [7.0]	-	-	1000 [7.0]	-	1000 [7.0]	-
14 días de curado	1500 [10]	1500 [10]	1500 [10]	1500 [10]	1500 [10]	-	1500 [10]
Absorción 24 h, % máx.	1	1	1	1	1	-	-
Temperatura de deflexión termica (°F)							
7 días, mín.	-	-	-	120 [50]	120 [50]	-	-
14 días, mín	-	-	-	-	-	120 [50]	120 [50]
Coefficiente lineal de contracción al curar % máx	0.005	0.005	-	0.005	0.005	-	-
Resistencia elastica por compresión, mín. psi [MPa]							
24 horas	-	-	-	-	-	2000 [14]	-
36 horas	-	-	-	-	-	-	1000 [7.0]
48 horas	-	-	-	-	-	6000 [40]	-
72 horas	-	-	-	-	-	-	2000 [14]
7 días	8000 [55]	5000 [35]	-	10 000 [70]	8000 [55]	-	-
Modulo de compresión, psi [MPa]							
Mín	150 000 [1000]	90 000 [600]	-	200 000 [1400]	150 000 [1000]	-	-
Máx	-	-	130 000 [896]	-	-	-	-
Esfuerzo de tensión 7 días mín psi [MPa]	5000 [35]	2000 [14]	-	7000 [50]	6000 [40]		
Alargamiento de rotura %, mín.	1	1	30	1	1	-	-
Esfuerzo de contacto psi [MPa]							
mín							
2 días	-	-	-	-	-	1000 [7.0]	-
14 días	-	-	-	-	-	-	1000 [7.0]

Tabla 8 Requisitos para el uso de resinas (Trout, 2006)

ASTM C881 Requisitos para el uso de resinas epoxi para unir concreto endurecido con concreto endurecido		
Tipo I: Para aplicaciones sin carga		
Tipo IV: Para aplicaciones con carga		
Propiedades	Tipo I	Tipo IV
Viscosidad [Pa*s]		
Grado 1 (viscosidad baja), máx.	2.0	2.0
Grado 2 (viscosidad media), mín.	2.0	2.0
Máx.	10.0	10.0
Consistencia, [mm]		
Grado 3, máx.	6.0	6.0
Tiempo Gel, minutos, mín.		
	30	30
Esfuerzo de unión [MPa]		
Mín. 2 días de curado	7.0	7.0
14 días de curado	10.0	10.0
Absorción 24 horas, % máx.		
	1	1
Temperatura de deflexión térmica (°C)		
7 días mín.	-	50
Coefficiente lineal de contracción al curar % máx.		
	0.005	0.005
Esfuerzo elástico por compresión, mín. [MPa]		
7 días	55	70
Módulo de compresión, [MPa]		
Mín.	1000	1400
Esfuerzo de tensión 7 días mín. [MPa]		
	35	50
Alargamiento de rotura %, min.		
	1	1

2.6.4. Resistencia a la tensión

La resistencia a la tensión debe ser mayor que la del concreto, la cual normalmente es de 3.4 MPa (34 kg/cm²). Mientras que la resina epoxi ha mostrado valores entre 35 MPa y 50 MPa (350 y 500 kg/cm²), de acuerdo con las pruebas realizadas por el ASTM D638, por lo que esta propiedad es fácil de satisfacer. Siempre que se realice una unión se debe cerciorar que la resina epoxi nunca sea la más débil.

Las altas resistencias no siempre son necesarias puesto que la gran mayoría de las resinas para inyección sobrepasan la resistencia a la tensión del concreto y no es necesario contar con una gran resistencia a la tensión para realizar un buen procedimiento de inyección. El ASTM C881 da un buen parámetro para elegir una resina adecuada sin excederse.

2.6.5. Módulo de elasticidad

La mayor parte de las aplicaciones de inyección de resinas requieren un módulo de elasticidad alto. Se prefiere utilizar resinas con módulo de elasticidad entre 1000 MPa y 1400 MPa (10,000 kg/cm² a 14,000 kg/cm²).

2.6.6. Resistencia a la fluencia

Dado que las resinas epoxi se encuentran normalmente en estado sólido una vez endurecidas, la resistencia a la fluencia es una propiedad a considerar. La fluencia es la capacidad que tiene un material para deformarse bajo una carga constante en un periodo de tiempo. Normalmente mientras más temperatura se tenga, más sujeto está un material a la fluencia. En el caso de la inyección de resina epoxi esto no suele ser un problema ya que, al inyectar la resina en capas muy delgadas, se minimizan los efectos de la fluencia.

2.6.7. Temperatura de deflexión térmica

Las resinas epoxi al igual que todos los polímeros tienden a ablandarse a medida que aumenta la temperatura. La temperatura a la que la resina muestra, por primera vez, señales de reducción de la resistencia se le denomina temperatura de deflexión térmica. Aunque es importante conocer esta propiedad, no significa que es la temperatura a la que los sistemas epóxicos fallen.

Aunque 50 °C (323 K) es una temperatura de deflexión térmica común para las resinas epoxi, éstas pueden tener hasta la mitad de su resistencia aún bajo 150 °C (423 K) y hasta 250 °C (523 K). Las resinas, por estar entre el concreto, no llegan a experimentar un aumento en la temperatura, aunque se presente en el ambiente. Por esta razón es muy rara la ocasión cuando éstas fallen por estar en presencia de calor. Las resinas epoxi para inyección deben tener por lo menos una temperatura de deflexión térmica de 40 °C (313 K).

2.6.8. Resistencia química

El ataque químico no representa un problema para un procedimiento de inyección, debido a que el área expuesta es muy pequeña, además de que las resinas epoxi cuentan con una excelente resistencia a los químicos. En caso de que se presente una exposición prolongada se puede optar por un recubrimiento especial después de la inyección.

2.6.9. Pot-life o vida útil

La “pot-life” o vida útil se refiere a la cantidad de tiempo con la que se cuenta desde que se inicia el mezclado de la resina con el endurecedor hasta que se termina la aplicación para que comience el proceso de endurecimiento. Se pueden agregar aceleradores o retardadores a la formulación epoxi para ajustarse a los tiempos de trabajo que se presenten. Otro ejemplo del uso de un retardador es cuando la inyección se realiza mediante una presión baja por lo que es necesario que la resina permanezca en estado líquido por más tiempo.

Por otro lado, existen situaciones en grietas estructurales que se necesite una reparación rápida lo que puede significar una vida útil de cinco minutos o menos. La vida útil se mide normalmente para una muestra de 60 g en una taza de 236 ml (8 onzas) a una temperatura de 22°C (295 K). Se expresa como una cantidad de tiempo en minutos; sin embargo, es solo una referencia ya que otros factores como la cantidad y la temperatura ambiente pueden cambiarla rápidamente.

2.6.10. Tiempo de curado

Que una resina haya endurecido no quiere decir que haya alcanzado su máxima resistencia. Por esta razón, el tiempo de curado debe distinguirse de la vida útil (tiempo de gelificación). El tiempo de curado es el tiempo en el cual la resina tarda en obtener sus propiedades máximas. Por practicidad se sabe que a los siete días la resina ha alcanzado entre 80% y 90% de sus capacidades máximas. El curado completo se presenta de manera general a los 28 días después de la aplicación.

2.6.11. Viscosidad

Como ya se mencionó, en la norma ASTM C881 clasifica a las resinas en tres grados (viscosidad baja, media y alta). Para realizar un proceso de inyección es conveniente que se cuente con una viscosidad baja pues penetra con mayor facilidad en las grietas.

En la actualidad, las resinas epoxi diseñadas para inyección se formulan con una viscosidad cercana a la del agua que es de 1 centípoise (0.001 Pa•s). Según Trout (2006), algunas resinas epoxi con viscosidad baja no siempre suelen ser la mejor opción para inyectar. Si bien la mayoría de las veces penetran casi todo ancho de grieta, en concretos porosos la resina puede ser succionada dejando espacios que no garantizan la unión.

Otro caso en especial se da al momento de realizar la inyección en grietas húmedas ya que la resina, al ser muy fina, no puede desplazar el agua de la grieta. Además de que al mezclarse con el agua no permite un correcto curado. De aquí surge una inquietud adicional sobre cómo seleccionar la viscosidad adecuada para un procedimiento de inyección.

Para poder seleccionar correctamente la viscosidad a utilizar se tiene de conocer bien el proyecto, así como los materiales y equipo de los que se dispone. Con un procedimiento correcto y equipo moderno, incluso las grietas más finas de 0.02 mm pueden ser bien inyectadas con cualquier tipo de resina de baja viscosidad (200 centipoises o 0.2 Pa•s). Para grietas de espesor entre 3.17 mm y 6.35 mm (1/8 y 1/4 pulg) que no se puedan sellar se pueden utilizar geles epóxicos.

No se puede dar una regla para elegir correctamente un tipo de resina, sin embargo, se puede comparar con la norma ASTM C881 y valorar las propias condiciones de trabajo.

2.6.12. Temperaturas permitidas

De acuerdo con el ASTM C881, las temperaturas permitidas dependerán de la clasificación que se le haya dado a la resina (Clase A, B y C), dando los parámetros en el inciso 2.6.1. Algunas de las temperaturas máximas o mínimas las determina el fabricante según sea el caso.

2.6.13. Coeficiente de expansión térmica

De manera general, se conoce que las resinas epoxi se expanden o contraen de cinco a diez veces más que el concreto, por lo que no es recomendable el uso de resinas epoxi en grandes masas. Sin embargo, para el caso de inyección de resina epoxi, dado que las cantidades son pequeñas, la expansión y contracción son insignificantes. De acuerdo con Trout (2006), no es recomendable utilizarse en gran masa para la reparación de concreto, puesto que al expandirse y contraerse terminaría dañando el concreto circundante.

2.6.14. Tolerancia a la humedad

No todas las resinas epoxi son capaces de tolerar la humedad. En el mercado existen algunas resinas que pueden tolerar en mayor medida la humedad presente en el concreto poroso. Esta tolerancia les permite adherirse completamente al concreto aun con agua en los poros y es gracias a este tipo de resinas que se pueden realizar sellados o tapones eficaces aun cuando se presente humedad.

Si se cuenta con condiciones de trabajo donde no sea posible realizar un buen secado de la grieta, es posible considerar algún tipo de resina que cumpla con estas características. En general, las resinas no están diseñadas para este tipo de trabajos, sin embargo, se puede optar por esta alternativa.

2.7. MÉTODOS DE INYECCIÓN

La reparación de elementos de concreto mediante la aplicación de resinas epoxi se realiza mediante un método de inyección. Existen dos métodos de inyección que se han utilizado para la reparación de grietas con resinas epoxi. La inyección a presión es recomendada en las Norma para Rehabilitar Edificios de Concreto Dañados por el sismo del 19 de septiembre de 2017 (NTC- Rehabilitación, 2017). La inyección mediante vacío no es recomendable para su aplicación en campo.

En esta tesis se describirá a detalle el método de inyección a presión en el Capítulo 3, mientras que en la sección 2.7.1 se explicará el procedimiento de inyección mediante vacío con el fin de explicar por qué no es recomendable su uso en campo, cuáles son las variantes a considerar, entre otros aspectos.

2.7.1. Método de inyección mediante vacío

Para poder llevar a cabo este método de inyección es necesario identificar las grietas en toda su longitud, quitando todos los recubrimientos que se encuentren a una distancia mínima de 300 mm para poder observar correctamente dónde comienza y dónde termina la grieta (French et al., 1990). Esto es muy importante ya que se tiene que sellar totalmente la grieta para generar el vacío necesario para la inyección.

Se debe cuidar que la grieta esté libre de polvo, humedad, grasa o cualquier tipo de impureza que pudiera mezclarse con la resina epoxi y generar que no se endurezca de manera adecuada.

Una vez que se ha preparado la o las grietas y están limpias, se procede a realizar el sellado del elemento. En algunos casos se opta por utilizar morteros epóxicos (tienen una consistencia arenosa similar a un mortero de cemento), masillas epóxicas (parecidas a las plastilinas utilizadas en plomería), entre otros materiales, además se coloca una malla plástica alrededor del elemento. Posteriormente, se pueden cubrir los elementos con una hoja de polietileno y así lograr un mayor vacío.

Se colocan los puertos de entrada, por donde se conectarán las mangueras que van hacia el depósito de la resina epoxi. También se coloca el puerto de succión mediante el cual se conectará la fuente de vacío, la cual normalmente es un compresor de aire. Ya que se realizó la instalación y se verificó que el sellado está correcto, se cierran los puertos de entrada y se procede a aspirar el aire al interior de la fisura como se muestra en la Figura 14.

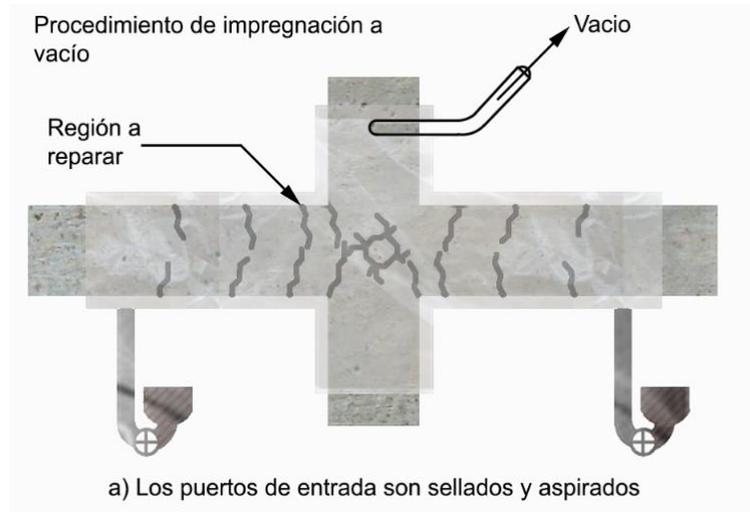


Figura 14 Procedimiento de impregnación a vacío (French et al., 1990)

Una vez aspirado se abren los puertos de entrada dejando fluir la resina al sistema hasta que se satura totalmente. Esto se puede observar esquemáticamente en la Figura 15.

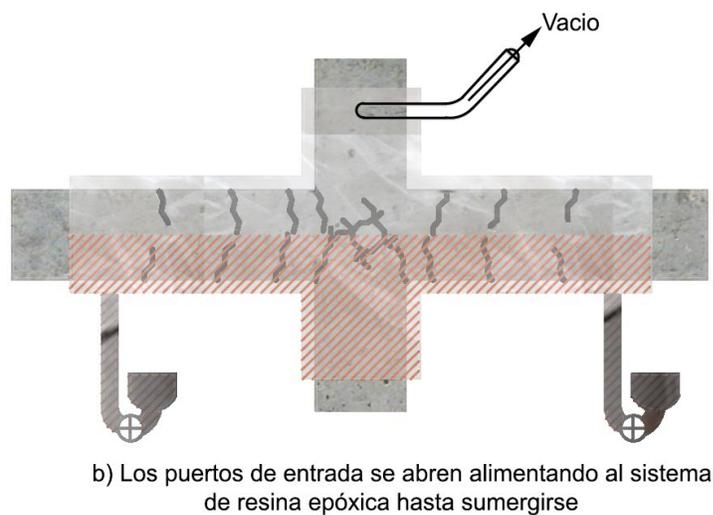
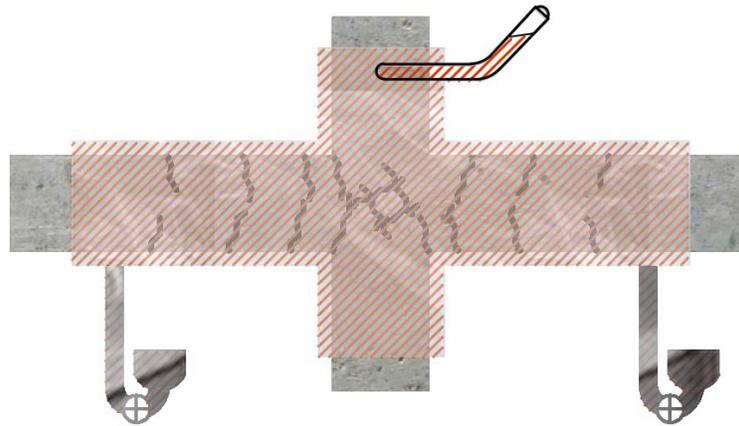


Figura 15 Procedimiento de impregnación a vacío (French et al., 1990)

En el momento en que el elemento se ha saturado completamente y comenzó el proceso de endurecimiento se puede retirar el vacío y dejar que la presión ambiental impregne totalmente los espacios de las grietas (Figura 16).



c) Los puertos de entrada son cerrados y el vacío retirado

Figura 16 Procedimiento de impregnación por vacío (c) (French et al., 1990)

Este procedimiento ha dado buenos resultados en laboratorio; sin embargo, como lo señalan French et al. (1990), se tiene que tener un completo control y cuidado en todo el procedimiento. Se debe cumplir con un sellado totalmente hermético, se deben controlar de manera precisa la presión al momento de generar el vacío y se deben cuidar que no haya fugas, entre otros aspectos.

En laboratorio bajo condiciones muy estrictas es posible llevar el procedimiento de inyección mediante vacío de manera adecuada. En campo surgen nuevas problemáticas, por no tener las mismas condiciones que en el laboratorio, de ahí que la *Guía técnica para la rehabilitación sísmica de edificios escolares de la Ciudad de México* (INIFED, 2020) y las *Norma para Rehabilitar Edificios de Concreto Dañados por el sismo del 19 de septiembre de 2017 (NTC- Rehabilitación, 2017)* no lo recomienden para su implantación en campo, ya que no se garantiza que el procedimiento se lleve de manera adecuada.

French et al. (1990) mencionan que este método es utilizado para daños medios a graves, en los cuales el procedimiento de inyección a presión no es eficaz ya que debido a la presión se tiende a “explotar” algunas secciones gravemente deterioradas.

Este procedimiento de inyección aún cuenta con muchas interrogantes ya que no se ha realizado experimentación que nos permita saber de manera estadística si funciona mejor para reparar elementos de concreto con daños graves con desprendimientos. Esta es un área de posible investigación en el futuro, principalmente en diseños por resiliencia².

² El diseño por resiliencia consiste en realizar un diseño con la capacidad de resistir, asimilar, adaptarse y recuperarse de los efectos de estar potencialmente expuesto a un peligro sísmico. (INIFED, 2020).

2.8. CONCLUSIONES

De este capítulo se concluye lo siguiente:

- a) La inyección de resina epoxi es un método útil para restituir las propiedades con las que contaba el elemento antes de ser agrietado.
- b) Las propiedades que se logran restituir son la resistencia, la ductilidad y la rigidez.
- c) Se pueden inyectar grietas con resina epoxi desde los 0.02 mm hasta los 5 mm.
- d) La viscosidad para llevar a cabo un procedimiento de inyección va 2.0 a 10.0 Pa•s (2000 a 10000 cp).
- e) Es importante conocer cómo se generó la grieta a reparar.
- f) Es necesario realizar una evaluación antes de realizar cualquier tipo de reparación.
- g) Las pruebas no destructivas nos ayudan a conocer el daño y afectación de las grietas sobre los elementos.
- h) La norma ASTM C881 brinda clasificaciones adecuadas que ayudan a la elección de una formulación epoxi.
- i) Aunque lo ideal sería tener una formulación de resina epoxi para cada caso en particular, existen formulaciones epoxi en el mercado diseñadas para las condiciones más comunes presentadas en campo.
- j) El diseñador y constructor deben tomar en cuenta la viscosidad, tiempo de aplicación, tiempo de endurecimiento, tolerancia a la humedad, entre otras propiedades para elegir la resina que mejor se adapte a su proyecto.
- k) De acuerdo con la norma ASTM C881 los tipos de resina utilizados para inyección son el Tipo I y IV.
- l) El método de inyección a vacío no es recomendado en campo por lo complicado que es mantener las condiciones necesarias vistas en laboratorio.
- m) Se requiere elaborar una norma mexicana (estándar) NMX equivalente al ASTM C881.

CAPÍTULO 3

PROCEDIMIENTO DE INYECCIÓN A PRESIÓN

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se expone la técnica de reparación de grietas en elementos de concreto mediante la inyección a presión de resinas epoxi; se menciona por qué este método de inyección es el más utilizado. Se explican detalladamente, cada uno de los pasos a seguir clasificando las actividades en tres partes importantes: *acciones previas a la inyección, el procedimiento de inyección y las actividades post-inyección*. Además, se dan a conocer algunas recomendaciones para realizar cada una de las etapas de manera adecuada.

3.2. MÉTODO DE INYECCIÓN A PRESIÓN

El método de inyección a presión ha sido utilizado desde los años 50 en distintos países para la reparación de elementos estructurales de concreto; sin embargo, en un principio no se contaba con la experiencia e investigación que se tiene hoy en día.

Esta técnica, a diferencia de la de vacío, requiere de un inyector manual o mecánico que le permita penetrar la resina a lo largo de las grietas, logrando así el cometido de restituir las propiedades de los elementos inyectados. Si bien la investigación al respecto ha sido poca en comparación con la realizada para otro tipo de técnicas de rehabilitación, se sabe que si se realiza correctamente se cumple con los objetivos previamente descritos.

De ahí que este método sea el más utilizado para reparar grietas a lo largo del mundo, además de que este procedimiento permite controlar las variables aparecidas en campo, y en caso de tener algún tipo de fallo se puede interrumpir, corregirlo y continuar con la inyección.

Para el estudio y documentación de este método de inyección, se optó por dividir las actividades de la técnica en las tres etapas antes mencionadas. En cada una de ellas se explican de manera detallada las actividades particulares a realizar, así como se dan recomendaciones y se identifican los eventos a los cuales se debe prestar atención.

Este método de reparación de grietas ha sido utilizado en diferentes elementos de concreto con diferentes formulaciones epoxi como columnas, muros, losas, cimentaciones, pilas y pilotes, vigas, cisternas, entre otros.

3.3. ACCIONES PREVIAS A LA INYECCIÓN

En esta sección se describen todas aquellas actividades que se tienen que realizar antes del procedimiento de inyección propiamente. Las actividades que se encuentran en esta etapa van desde la inspección visual, la evaluación de la o las grietas, el retiro de recubrimientos, la limpieza de las grietas, barrenado y perfilado de las grietas, colocación de boquillas para inyección y el sellado de las grietas.

Cabe resaltar que cada constructor tiene una manera propia de realizar el procedimiento de inyección, por lo que en esta tesis se describen las actividades que son consideradas indispensables para una correcta inyección. Si bien cada constructor cuenta con sus propias recomendaciones de acuerdo con su experiencia, lo planteado aquí son las buenas prácticas de aplicación general.

Como se mencionó en el Capítulo 2, antes de elegir reparar una grieta mediante cualquier procedimiento es necesario realizar una evaluación del agrietamiento y determinar las causas por las cuales aparecieron las grietas y las condiciones en las cuales apareció. De esta forma se elige la inyección a presión de resina epoxi como técnica de reparación.

De acuerdo con Goodwin et al, (2016), si existe alguna duda de que la inyección de resina epoxi logrará los resultados previstos, se debe realizar un programa de pruebas antes de realizar el proyecto completo para determinar si los objetivos de reparación se pueden lograr con los materiales y equipo disponible. Se pueden utilizar secciones de prueba que representen áreas características donde se aplicará la inyección, confirmar si es posible inyectar totalmente la grieta y obtener muestras de resina de referencia.

Un programa de pruebas puede ser útil para determinar la presencia de contaminantes que inhiban la unión entre la resina y el concreto u otras condiciones que estén más allá de las capacidades del diseñador y el constructor. Si los trabajos de las pruebas resultan deficientes y no hay posibilidad de mejorarse es necesario optar por otras técnicas para la solución.

Si desde un inicio se observan las condiciones adecuadas para poder realizar el procedimiento de inyección y la evaluación como método de reparación podemos comenzar a identificar las grietas que serán intervenidas. A continuación, se describirán los pasos a seguir para una correcta inyección.

3.3.1. Localización, ubicación y retiro de recubrimientos

Se deben identificar todas las grietas que requieran ser inyectadas. De ser posible se puede llevar un registro de cada una de las grietas. Este registro puede contener: el elemento en donde se encuentra (viga, columna, losa, zapata, etc.), el espesor, la longitud de la grieta y si ésta atraviesa el elemento en cualquiera de sus caras.

Es importante resaltar que no se debe pintar las grietas para su identificación, ya que las pinturas pueden afectar el procedimiento de inyección, de aquí que se recomiende el uso de un registro de grietas con su ubicación en papel o en formato electrónico.

Al momento de la evaluación e identificación de las grietas se retiran los recubrimientos que pudieran estar obstruyendo la visión. Para inyectar la resina epoxi es necesario retirar cualquier tipo de recubrimiento (lechadas, morteros, pinturas, yeso, etc.) a una distancia no menor de 300 mm a cada lado de la grieta.

El retiro de recubrimiento a lo largo de una grieta se realiza con la finalidad de poder limpiar el lugar de trabajo, tener un campo de visión adecuado, tener identificadas las grietas con mayor precisión y poder determinar la longitud real de las mismas.



a) *Grieta antes y después del retiro del recubrimiento*



b) *Se muestra una grieta pintada. No es una buena práctica. (Abarca, 2020)*

Figura 17 Retiro de acabados de las grietas

3.3.2. Limpieza de las grietas

Uno de los factores más importantes para lograr un buen desempeño del procedimiento de inyección de resina epoxi es la limpieza de las grietas que se desean reparar. Esto debido a que la resina suele reaccionar con la mayoría de los materiales presentes en una grieta, tales como polvo, partículas de yeso, agua, aceites y pinturas.

Si la resina entra en contacto con cualquier tipo de contaminante, las propiedades finales de la resina podrían cambiar. Uno de los ejemplos más vistos en campo es la presencia de humedad. Si no se considera en la formulación de resina desde un inicio, está podría ocasionar que no tenga un correcto endurecimiento y adherencia al concreto.

De acuerdo con lo establecido en la Guía técnica para la rehabilitación sísmica de edificios escolares de México (INIFED, 2020), se debe limpiar la grieta del polvo por medios mecánicos (con compresores de aire, bombas de aire o aspiradoras de uso industrial) o de formas manuales (con brochas de cerdas finas o cepillos).

Se recomienda evitar el uso de compresores de aire operados por motores de combustión interna ya que pueden introducir partículas de aceite durante el proceso a menos de que se realicen pruebas antes de la limpieza y se esté completamente seguro de que no libera este tipo de partículas. Se puede realizar previo a la inyección una prueba sobre papel para identificar partículas de aceite. Se recomienda el uso de aspiradoras industriales para retirar partículas de polvo en los elementos de concreto y mampostería como se muestra en la Figura 18.



Figura 18 Limpieza de las grietas con un compresor de aire (Abarca, 2021)

Es común encontrar grietas con presencia de humedad en trabajos de reparación en los que la luz del sol no puede evaporar por completo el agua. En este caso se recomienda secar las grietas mediante un compresor de aire caliente. Si la grieta se vuelve a humedecer en menos de 24 h será necesario revisar la fuente de dicha humedad y detenerla.

En caso de no poder resolver el tema de la humedad se tendrá que considerar el uso de una formulación epoxi con tolerancia a la humedad para asegurar el correcto endurecimiento y adherencia de la resina con el concreto (Abarca y Cottier, 2020).

3.3.3. Sellado de grietas

Antes de realizar el procedimiento de inyección, los puertos para encauzar la resina deben ser establecidos para poder fijarlos mediante el sellado de la grieta. Las grietas deben ser selladas entre los puertos y la longitud total de la grieta, esto con la finalidad de contener la resina dentro del elemento mientras se endurece.

La colocación del sellado de la grieta es el procedimiento más importante antes de la inyección, pues si no se realiza correctamente la cantidad de fuerza ejercida por la resina al momento de inyectar puede desprender el sello y generar fugas, lo que ocasiona pérdidas económicas y por obvias razones, evita reparar la grieta.

Existe una gran variedad de productos que pueden ser utilizados como selladores de grietas, entre los cuales se encuentran compuestos de uretanos, resinas poliéster, poliuretanos, e incluso silicones. Sin embargo, las resinas epoxi y sus derivados (morteros y lechadas) son los más comúnmente utilizados (Figura 19).



Figura 19 Mortero epóxico como sellador de grietas (Abarca, 2021)

Trout (2006) menciona que todos los procedimientos de inyección que han resultado en un fracaso debido a las fugas son resultado de una mala mano de obra o desconocimiento total del procedimiento de inyección. Los sellos normalmente pueden resistir hasta 0.51 MPa (5.1 kg/cm²) pero muy rara vez se inyectarán a presiones arriba de los 0.28 MPa (2.8 kg/cm²).

De acuerdo con Trout (2006), existen tres técnicas para realizar el sellado correcto de una grieta. Estos son relleno de grieta (*packing*), perfilado de grieta (*routing*) y unión grieta-superficie (*capping*).

3.3.3.1. Relleno de grieta (*packing*)

Esta técnica puede ser utilizada si la grieta se encuentra libre de escombros, tiene un espesor mínimo de 1.6 mm (1/16 pulg) de ancho y que el concreto se encuentre sano, seco y limpio. Si se cumple con las condiciones, este método será el más sencillo y el más eficaz. Esta técnica consiste en rellenar la grieta compactando el sellado contra la grieta, de modo que el sello se adhiera. Sólo puede fallar si el concreto al cual se unió cede.

Para iniciar el sellado no se requiere ninguna preparación más que la limpieza de la grieta. Trout (2006), recomienda que la grieta debe estar limpia por lo menos a dos veces el espesor de la misma, es decir si la grieta es de 1.6 mm (1/16 pulg) esta tiene que estar limpia a una

profundidad no menor que 3.2 mm (1/8 pulg) como se muestra en la Figura 20. Si no se puede limpiar la grieta a esa profundidad mínima, no se recomienda el rellenar pues el sello podría fallar con la presión de la inyección. En este caso se optaría por alguna de las otras dos formas de sellar.

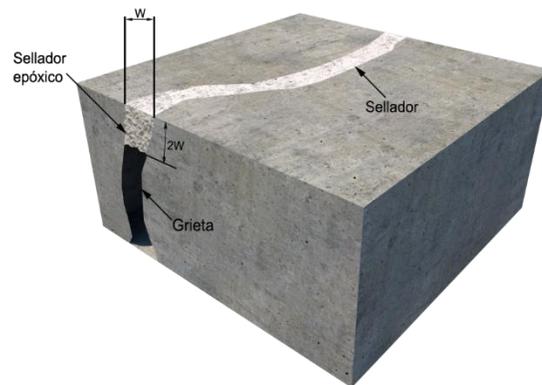


Figura 20 Grieta sellada mediante su relleno (Trout, 2006)

El sellador se coloca firmemente sobre la grieta con una espátula en las dos direcciones. Se continúa con la aplicación hasta que el sello no pueda penetrar y quede detrás de la espátula. Se intentará rellenar lo más dentro que se pueda. El sello tiene que lograr penetrar las dos veces el espesor de la grieta, esto se realiza de forma aproximada mediante la experiencia de los aplicadores.

Trout (2006) recomienda que si no se cuenta con la experiencia en este tipo de aplicaciones se puede realizar una prueba colocando dos arandelas entre dos tabiques firmemente sujetos con prensas de carpintería e intentar sellar la unión entre los dos tabiques con diferentes espátulas y ver cuál funciona mejor.

Cabe mencionar que una de las ventajas con las que cuenta este método de sellado es que no es necesario retirarlo una vez que se ha concluido el procedimiento de inyección.

3.3.3.2. Perfilado y sellado (routing)

De acuerdo con Trout (2006), esta técnica de sellado es la preparación ideal para la preparación de grietas que están contaminadas o pintadas porque en el proceso se busca exponer una superficie fresca, limpia, áspera y sana. Sin embargo, actualmente se sabe que al realizar un perfilado se afecta la superficie nueva mediante microgrietas producidas por el mismo procedimiento.

El procedimiento consiste en perfilar la grieta con un esmeril de rueda diamante con muescas de 10 cm (4 pulg) de diámetro. Las muescas tienen forma de letra “V” para un mejor perfilado de grietas estrechas. Esto le ayuda a retirar los desechos a medida que son producidos evitando que se queden atorados en la grieta.

La ranura debe contar por lo menos con 10 mm de profundidad para exponer por lo menos 13 mm de superficie para que el sellador se adhiera. La ranura debe quedar en forma de letra V, como se muestra en la Figura 21. La velocidad a la cual la herramienta avanza y la cantidad de presión utilizada determina la profundidad de la ranura, por lo que se habrá de ser muy cuidadosos. Siguiendo la longitud de la grieta es necesario ir removiendo los escombros utilizando compresores de aire.

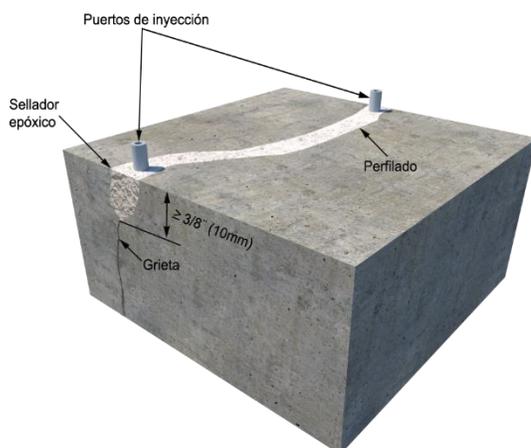


Figura 21 Perfilado y sellado de grieta (Trout, 2006)

Una vez que se ha perfilado la totalidad de la grieta, se puede colocar el sellador con una espátula amplia y flexible. El sellador se coloca hacia ambas direcciones de la grieta, empujando el sellador hacia ambas pendientes del perfilado. Se terminará de sellar una vez que se llegue al ras de la superficie sin protuberancias. Una vez inyectada la grieta, no es necesario retirar el sello.

En campo se ha visto que, al desbastar la superficie con un esmeril, al momento de inyectar la resina ésta comienza a brotar en las zonas circundantes al sello como consecuencia de las microgrietas generadas por el procedimiento. En algunos casos, los constructores utilizan algunas masillas epóxicas que, al momento de observar algún tipo de fuga, se colocan para tapar la zona.

3.3.3.3. Cubrir la grieta (*capping*)

Este procedimiento es la aplicación del sello sobre la superficie del concreto para que sirva de puente entre la grieta. Esta técnica puede ser utilizada en cualquier caso de aplicación para inyección de resinas epoxi; sin embargo, tiene la desventaja de que al ser una capa

superficial se requerirá más material, más trabajo para su colocación y, por ende, se tiene que retirar una vez concluida la inyección de resina.

Para poder implantar esta técnica de sellado, el concreto deberá estar sano, seco, limpio y libre de cualquier tipo de partícula de polvo. Todos los recubrimientos deben ser totalmente retirados debido a que el unión y el esfuerzo de la interconexión en una superficie dañada o pintada es de 0.006 MPa a 0.013 MPa (de 0.06 kg/cm² a 0.13 kg/cm²) cuando en la superficie sana y limpia es hasta de 0.52 MPa (5.2 kg/cm²).

Para limpiar la superficie, normalmente se utiliza un cepillo de alambre por ser fácil y económico, además de que no se requiere de mayor preparación. También existen otros métodos de limpieza de la superficie y las grietas como limpieza a chorros de arena (*sandblasting*), con cepillo de alambre eléctrico, limpieza química y martelinado.

En caso de que exista duda sobre la condición de la superficie de la grieta es posible colocar un poco de sello y posteriormente retirarlo. Si la superficie falla al retirar el sello, se considera como una superficie no adecuada para este tipo de sellado.

En caso de poder identificar un sistema de microgrietas, de manera precisa, alrededor de una grieta principal, se puede sellar en conjunto, colocando una capa de sellador de 12.7 mm (1/2 pulg) a cada lado de la grieta. El sello debe tener un ancho máximo de 24.5 mm (1 pulg) y un espesor mínimo de 4.7 mm (3/16 pulg), como se muestra en la Figura 22. El sello tiene que ser rígido para distribuir de manera uniforme la fuerza ejercida por la inyección.

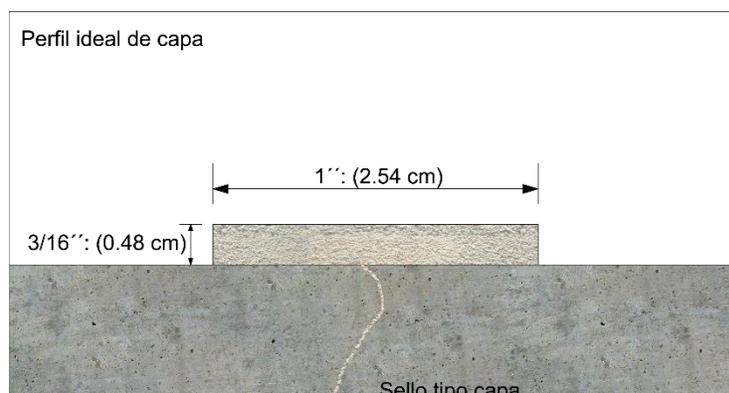


Figura 22 Sellado de la grieta en forma de capas (Trout, 2006)

Se recomienda que al colocar el sello no se caiga en la tentación de colocar más de lo adecuado, ya que no aporta más y suele ser un desperdicio muy costoso para los constructores. Sólo se recomienda la colocación de más material si se llegan a detectar micro fisuras alrededor de la grieta principal.

3.3.3.4. Elección de material para el sello

Para la elección de un tipo de material como sellado se habrá de tomar en cuenta las condiciones de las grietas que se quiere reparar. Normalmente los sellos a base de resina

epoxi son los más utilizados, pero se debe considerar que estos cuentan con una alta tolerancia a la humedad.

Si la aplicación será manual, es preferible buscar selladores que tengan proporciones fáciles de medir y mezclar en campo (como 2:1 o 1:2, es decir, dos porciones de resina por una de catalizador o viceversa) o si se administrará con un equipo especializado, cualquier relación está bien.

En cuanto a la resistencia del sellador, si es un sellador epoxi no existe problema ya que algunos pueden llegar a soportar inyecciones hasta de 7.0 MPa (70 kg/cm²). Las resinas epoxi no siempre son indispensables como selladores ya que se pueden utilizar otro tipo de materiales flexibles como silicones que son fáciles de aplicar ya que vienen en prácticos cartuchos. Este tipo de sellos son los favoritos, ya que son muy fáciles de retirar de la superficie si la capa tiene suficiente grosor para ser retirada. Otro factor a tomar en cuenta para la elección del tipo de sellador es la trabajabilidad, el tipo de suministro y el tiempo de vida.

3.3.4. Instalación de las boquillas/puertos de inyección

Los puertos o boquillas son los aditamentos que nos permiten ingresar la resina epoxi a las grietas que se desean reparar. Se colocan al mismo tiempo que el sellado con el fin de que queden unidos a las grietas (Figura 23). Estos puertos se distribuyen en toda la longitud de la grieta para asegurar que la resina penetre completamente en ella.



Figura 23 Colocación de puertos de inyección con el sello (Abarca, 2021)

En general, las boquillas suelen ser de diferentes materiales como cobre, aluminio, metal y plástico; las variantes encontradas en campo se presentan en el Capítulo 5. Cada constructor elige el tipo de boquilla dependiendo las herramientas de inyección, economía, practicidad o sólo por costumbre.

3.3.4.1. Separación entre boquillas

La separación de las boquillas de inyección dependerá del ancho y profundidad de la grieta, la viscosidad de la resina y la presión que se utilice en la inyección. Si bien no existe un método preciso que indique a que distancia deben colocarse, existen algunas consideraciones para definirla.

De acuerdo con Trout (2006), se puede comenzar con la colocación de las boquillas a una distancia no menor de 20 cm (8 pulg), pues esta separación permite una penetración de 10 cm (4 pulg) a cada lado de la boquilla. Dependiendo el tipo de grietas y sus características el constructor podría optar por separarlas un poco más. Trout (2006) recomienda que en los primeros 30 metros se observe y aprenda como ésta funcionando esta separación.

Otra opción que recomienda es mantener los puertos de inyección separados a la mayor distancia posible. Trout (2006), recomienda que se pueda iniciar a una distancia de 1.8 m, con el objetivo de ahorrar material y tiempo al momento de la instalación. Menciona que este tipo de decisiones se tomaran dependiendo las condiciones de la grieta y la experiencia del instalador.

Por otra parte Fernández (1981), menciona que para que se realice una correcta inyección se deben colocar las boquillas a una distancia no mayor de 50 cm, pues a esta distancia se puede observar de manera continua el flujo de la resina al llegar de una boquilla a la otra. El ACI 224 (2007) menciona que las distancias entre boquillas pueden ser de 1 a 1.2 veces la profundidad del elemento a inyectar.

Por esta razón en la *Guía Técnica para la rehabilitación sísmica de la infraestructura educativa de México* (INIFED, 2020), se recomienda dejar una separación no mayor que los 50 cm con una profundidad de 60 mm (Figura 24).

Otro detalle muy importante es la elección del sitio de colocación de los puertos. Muchas veces los constructores tienden a ser estrictos con la separación de las boquillas, que las colocan en lugares que son inadecuados, por ejemplo, un sitio impactado por escombros, en partes de la grieta que no pudieron ser limpiadas correctamente, o donde la grieta presenta un espesor mayor y la boquilla queda floja.

Aquí la recomendación es tomar en cuenta las condiciones de la grieta y tener criterio para la ubicación de las boquillas. Es preferible tener una boquilla bien colocada 5 o 10 cm más o menos de lo establecido que tener errores al momento de inyectar. Además de ser necesario se puede optar por colocar boquillas por ambas caras de un elemento como podría ser el caso de un muro de concreto en el cual la grieta lo atraviesa en si espesor.



(Cottier, 2019)



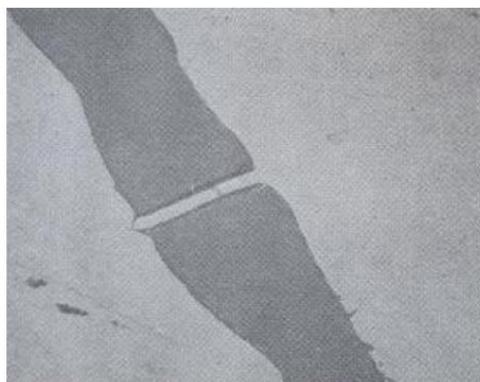
(PSC México, 2020)

Figura 24 Diferencias de separación de puertos según el constructor

3.3.4.2. Técnicas de colocación de boquillas

Como se ha ido observando a lo largo de esta tesis, las técnicas para realizar los diferentes procedimientos varían dependiendo del constructor, la experiencia y las herramientas y equipo con las que se cuenta. En cuanto a la colocación de las boquillas no hay una excepción. Trout (2006) menciona que existen las siguientes técnicas: choque, inserción, de superficie, enchufe (*socket*) y la colocación de puertos maestros. Estas técnicas se describen a continuación.

- a) *Choque*. Esta técnica es muy sencilla. Consiste en colocar una boquilla de plástico con una cinta de por lo menos $\frac{1}{4}$ de pulgada (6.35 mm) sobre la grieta antes de que se coloque el sello. Antes de que el sello se endurezca se retira la cinta dejando al descubierto la boquilla previamente colocada (Figura 25).

**Figura 25 Instalación de puerto con choque (Trout, 2006)**

- b) *Inserción*. Consiste únicamente en insertar un tubo de nylon en la grieta. Su aplicación es muy limitada porque depende de que la grieta sea lo suficientemente

ancha para poder insertarlo. El tubo más pequeño que se puede colocar es de 3.2 mm (1/8 pulg). El tubo se coloca antes de la instalación del sello (Figura 26). Una vez que el sello se ha endurecido, éste queda asegurado. El tubo tiene que ser forzosamente de nylon, pues es el material que más resiste y ofrece una mejor superficie de unión con los sellos, además cuenta con una resistencia nominal de 6.9 MPa (69 kg/cm²) a los 22 °C (295 K).



Figura 26 Colocación de boquilla por el método de inserción (Trout, 2006)

- c) *De superficie.* Este método utiliza adaptadores que son las bases que se fijan con el sellado mientras sostienen el tubo. Esta base cuenta con un vástago hueco que sobresale por la parte inferior. Esta parte se encuentra perforada.

Para la colocación del adaptador se coloca el sellado en la parte inferior (en la parte perforada) y luego se usa una barra delgada para guiar al adaptador a su lugar. La punta de la barra es muy importante ya que evita que el sellador se meta por el tubo y genere una obstrucción al momento de la inyección.

Este método no se recomienda si la grieta está muy estrellada, es decir, si cuenta con muchas ramificaciones en la misma, o cuenta con escombros que no pudieron ser retirados. Se utiliza para aquellas grietas que ofrecen un orificio limpio y de ancho aceptable como se observa en la Figura 27.

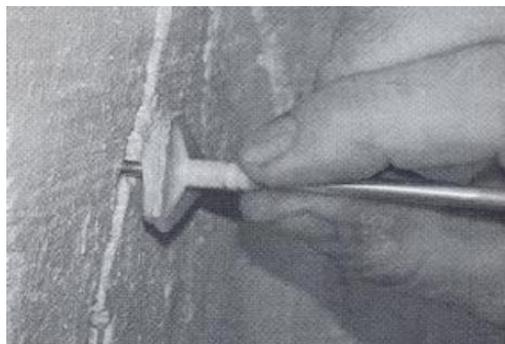


Figura 27 Colocación de boquillas con el método de superficie (Trout, 2006)



Figura 28 Colocación de boquillas plásticas con base, utilizando el método de superficie (PSC México, 2020)

- d) *De enchufe (socket)*. Este método consiste en colocar las boquillas en orificios perforados. Son la única opción de puerto si la grieta fue perfilada con esmeril o no es lo suficientemente ancha para insertar alguno de los tubos de nylon descritos anteriormente.

Estos puertos proporcionan un orificio más grande para que la resina pueda ingresar a la grieta de forma más rápida, en comparación con las boquillas de superficie. Los puertos de enchufe brindan hasta ocho veces más área para el flujo que los otros métodos.

Se tiene que tener especial cuidado al momento de realizar las perforaciones con la broca, pues si se realiza la perforación en un lugar que tiene escombros o no fue limpiada correctamente, la grieta corre el riesgo de taponarse y no funcionará la inyección.

Si bien se puede realizar una perforación mientras se realiza una aspiración, no es recomendable en los casos que la grieta este húmeda, pues el polvo con el agua genera una pasta que tapa las grietas. La perforación hidráulica es otra opción, pues mientras se va perforando se va limpiando con agua. Si se realiza esta técnica es necesario dejar que la grieta seque o secarla con compresores de aire caliente.

La opción más recomendada es el uso de un taladro que arroja aire comprimido a través de la broca, pues con estos las partículas de polvo salen, dejando las grietas libres.

Fernández (1981) recomienda realizar una perforación con un taladro en los lugares donde se colocarán las boquillas; la perforación habrá de tener una profundidad de 60 mm. Una vez concluidas las perforaciones, se deben limpiar y retirar todo tipo de escombros de la grieta.

Se colocan las boquillas sobre los orificios perforados y simultáneamente se coloca el sello para sostenerlas en su lugar. Una vez que el sello ha endurecido éstas permanecen fijas hasta el momento de la inyección. Este procedimiento se ilustra en la Figura 29.

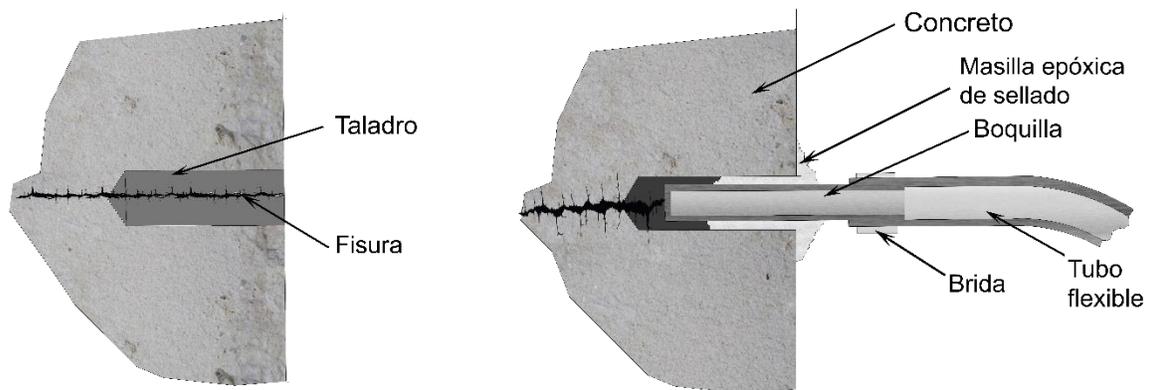


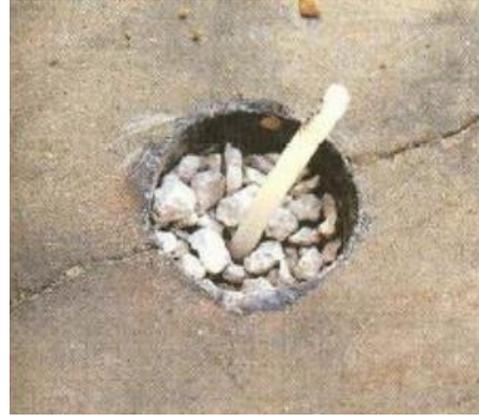
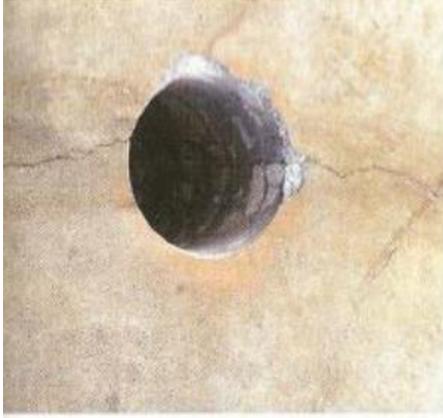
Figura 29 Diagrama de perforación de grieta (Fernández, 1981)

- e) *Puertos maestros*. Este método consiste en realizar una perforación en el concreto como en el caso anterior, la diferencia es que estos puertos son mucho más grandes, de 50 mm de espesor y 150 mm de profundidad. Se utiliza para inyectar volúmenes muy grandes de resina en elementos robustos.

En esta perforación se inserta un tubo de 100 mm (4 pulg) acompañado de agregado (generalmente se usa grava). Se aplica una capa de resina epoxi de baja viscosidad y se deja salir el tubo unos centímetros por la perforación. Una vez realizado esto, se procede al sellado de la grieta.

Cuando el sello esté totalmente endurecido se comienza a realizar el procedimiento de inyección de forma gradual hasta que la presión se estabilice. Para este tipo de puertos es recomendable utilizar una resina de viscosidad sumamente baja. El procedimiento de instalación se ilustra en la Figura 30.

Finalmente, en cualquiera de los métodos descritos anteriormente es necesario dejar que las boquillas y el sello queden totalmente fijos. El tiempo mínimo a esperar para que el sello se endurezca y queden bien anclados es de 24 h.



a) *Perforación del puerto maestro*

b) *Colocación del tubo nylon y agregado*



c) *Sellado de la grieta que conecta los puertos maestros*

Figura 30 Colocación de puertos maestros (Trout, 2006)

3.4. PROCEDIMIENTO DE INYECCIÓN

Una vez que el sello y las boquillas o puertos están bien sujetos a la grieta se puede realizar el proceso de inyección. Se debe cerciorar que han pasado las 24 h mínimas del secado del sello y que las boquillas no se muevan de su sitio. Además, se debe revisar que alrededor del sello no se encuentre ningún tipo de impureza, contaminante o polvo.

Si bien anteriormente se intentó limpiar la grieta de la mejor forma, en ocasiones la grieta queda con polvo fino, escombros u otros residuos. Si la grieta lo permite, se puede intentar

eliminar esos contaminantes al inyectar la grieta, dejar que la resina fluya hasta observar que no sale con ningún tipo de contaminante.

Si no se sospecha que la grieta aun cuenta con suciedad interna, antes de colocar las colocación de mangueras en los puertos, se habla de revisar a detalle el sello, para prevenir fugas al momento de la inyección.

3.4.1. Revisar el sellado

Para evitar cualquier tipo de contratiempos es posible realizar una prueba que permita saber si el sello funcionará correctamente. Primero se tienen que tapar todos los puertos de entrada, menos uno. De éste se conecta una fuente de aire seco a una presión aproximadamente de 0.34 MPa (3.4 kg/cm²), esta presión evitará que se afecte a las boquillas previamente tapadas.

Cualquier corriente de aire que se escape por el sello se puede sentir al pasar la mano sobre su superficie e incluso se podrá escuchar si el área se encuentra silenciosa. Si se detecta cualquier mínima fuga de aire, se tendrá que retirar el sello y reparar. Se esperará hasta que esta reparación esté completamente endurecida para comenzar la inyección. Si bien el proceso tiende a ser algo tedioso, éste puede ayudar a evitar grandes fugas y pérdidas económicas importantes.

Cuando el proceso de inyección tiene que realizarse de manera rápida y no hay suficiente tiempo para volver a sellar y esperar, se puede utilizar una resina epoxi de fraguado rápido o una masilla epoxi como la que usan los plomeros. Esta masilla puede funcionar bien pero no tendrá la resistencia de un sellador epóxico convencional.

Finalmente, se recomienda que la inspección del sello antes de cada inyección se vuelva un procedimiento de rutina, pues de acuerdo con Trout (2006), el costo de esperar y reparar el sello antes de la inyección es mucho menor si se inyecta y este falla.

3.4.2. Forma de inyección

De acuerdo con el ACI 224 (2007), la forma de inyección de una grieta dependerá de su posición. Normalmente se observan tres tipos de grietas: inclinadas, horizontales y verticales. Para una grieta vertical e inclinada se debe comenzar la inyección en la primer boquilla inferior que se haya colocado en la grieta.

Se comienza el proceso de inyección y se observa que la resina emerja en la boquilla inmediata superior. En ese momento se tapa la primera boquilla y se cambia la conexión a la boquilla por la cual salió la resina. Posterior a esto se continua la inyección en este puerto hasta que la resina salga en la boquilla superior siguiente. Este proceso se repite a lo largo de toda la grieta hasta que toda quede completamente inyectada (Figura 31).

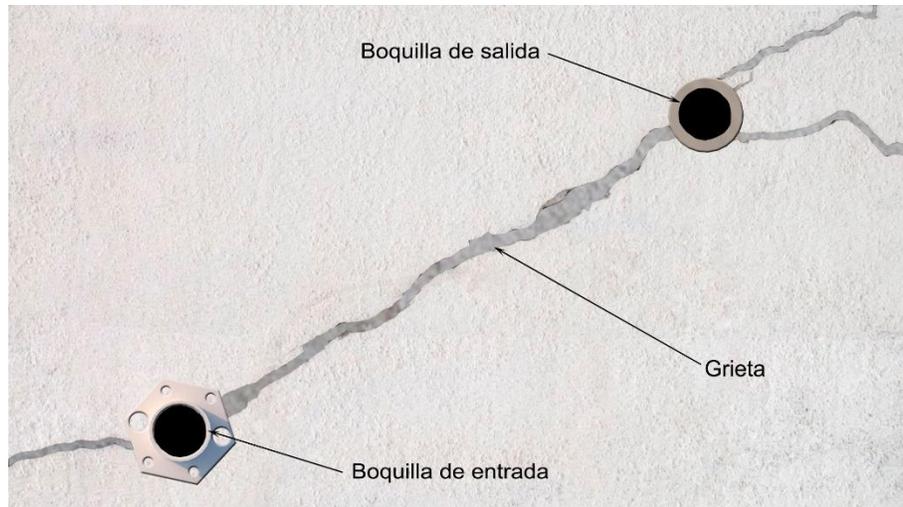


Figura 31 Correcta forma de inyección (INIFED, 2020)

En cuanto a las grietas horizontales se conoce que éstas se inyectan mejor del centro de la misma hacia sus extremos para garantizar que la resina penetre totalmente la grieta.

Trout (2006) menciona que estas recomendaciones no siempre se podrán cumplir, pues habrá ocasiones en las cuales el ancho de la grieta cambie en su longitud por lo que, si la grieta se inyecta desde su parte más angosta hacia su parte más ancha, esta tardará mucho más que si se hiciera, al contrario. Trout (2006), recomienda que antes de colocar el sello se revise si el ancho de grieta es uniforme y se defina una forma de inyección que nos garantice la inyección, pues si el tiempo de penetración es demasiado, la resina se puede gelificar.

En general, no se tiene problemas con la inyección como recomienda el ACI 224 (2007) ya que las presiones utilizadas suelen ser suficientes para lograr que penetre la resina.

3.4.3. Presión de inyección

Muchos diseñadores recomiendan que la inyección se realice con la presión más alta que permita el sello y las boquillas, pues consideran que de esta manera las grietas son rellenadas más fácilmente y a mayor velocidad.

Las presiones convencionales para un procedimiento de inyección van desde los 0.28 MPa a 3.45 MPa (40 psi a 500 psi o 2.8 kg/cm² a 35 kg/cm²). La mayoría de los constructores utilizan presiones entre los 0.7 MPa hasta los 2 MPa (100 psi hasta los 300 psi o 7 a 20 kg/cm²). Este intervalo de presiones es suficiente para que la inyección de resina epoxi se lleve de forma adecuada y brinde los beneficios prometidos.

En grietas con anchos muy pequeños se pueden incluso utilizar presiones de 2 MPa hasta 3.45 MPa (300 a 500 psi o 20 kg/cm² a 35 kg/cm²) ya que la fuerza ejercida en el sello es muy pequeña por el ancho con el que estas grietas cuentan. Mientras la resina fluya de

manera constante y no se acumule algún tipo de presión significativa el proceso será rápido y sin contratiempos. Aun así, se debe tener mucho cuidado con la presión porque en el momento en el que la resina comienza su endurecimiento, las presiones pueden aumentar de manera considerable.

En caso de no contar con el equipo de inyección a presión, también es posible realizar el procedimiento a presiones bajas que van desde 0.06 MPa a 0.10 MPa (1 a 15 psi o 0.06 a 1 kg/cm²). Estas presiones se pueden dar cuando la inyección se realiza de forma manual con pistolas. Para estos casos, la elección de un tipo de resina que tarde en endurecer es esencial.

3.4.4. Tiempo de inyección

La inyección de resina epoxi se debe detener en el momento en el que la grieta se niegue a aceptar más resina. Este rechazo se puede observar fácilmente si se utiliza una bomba de inyección que utiliza un pistón, porque el movimiento de bombeo del pistón se vuelve más lento e, incluso, se detiene.

En otro tipo de bombas, para saber si la grieta está rechazando la resina se puede observar el manómetro. Si se presenta una estabilización en la lectura quiere decir que la grieta ya entró en su etapa de rechazo. Hasta que aparezca este punto de rechazo, la inyección de resina debe continuar, aunque comience a aparecer en la o las siguientes boquillas.

Una vez que se produce este rechazo, Trout (2006) recomienda continuar con la inyección por un minuto más aproximadamente para permitir que la presión permita la dispersión de la resina dentro de la grieta. De acuerdo con él, este minuto garantiza la penetración de la resina en las microgrietas que pudieran existir, debido a la saturación de resina en las paredes del concreto.

A medida que aparezca la resina en los puertos adyacentes, se deben colocar tapas o tapones para no mover la conexión. Se debe aclarar que la aparición de la resina en estos puertos no es una confirmación plena de que la grieta ha sido inyectada completamente, sino que la resina fluye correctamente a lo largo de la grieta, pero no en su profundidad.

De acuerdo con Trout (2006), a menudo las grietas suelen ser más anchas en su superficie, pero en su interior se van haciendo más estrechas a menos que la grieta atraviese el elemento de lado a lado. Por esta razón se recomienda dejar acumular la presión antes de pasar a inyectar desde la siguiente boquilla.

Cuando se inyecta la resina en un elemento de concreto muy grande, como puede ser la columna de un puente o una cimentación, el punto de rechazo se presenta mucho después de la vida útil de la formulación epoxi. Trout (2006) menciona que esto no debe ser un motivo de preocupación, pues mientras no se detenga el flujo, la resina ya ingresada comenzará a

penetrar a lo más profundo de la grieta y comenzará a endurecer ahí, dejando que la resina que apenas ingrese fluya hacia la longitud de la grieta.

No se recomienda el método de puerto en puerto en grietas que se presentan por contracción del concreto, pues al ser grietas superficiales éstas tienden a llenarse de forma superficial muy rápido. La resina comienza a salir por el siguiente puerto y es muy poco probable que se pueda observar un punto de rechazo por lo que se pasará mucho tiempo sin certeza de que la resina haya penetrado a profundidad. Para este caso de grietas, es recomendable realizar una inyección con puertos más distantes en los cuales se pueda observar este punto de rechazo.

El tiempo de inyección será diferente dependiendo el tipo de grietas que se estén inyectando. Por ejemplo, si la grieta atraviesa el elemento, como puede ser el caso de un muro de concreto, la inyección se puede detener en el momento que la resina salga por un puerto opuesto a la cara que se está inyectando y que se pueda identificar el punto de rechazo.

En el caso de que no se pueda observar que la resina haya penetrado en toda la profundidad se puede optar por la experiencia de inyecciones previas. Se puede llevar un registro de tiempo que les tomó a las grietas alcanzar el punto de rechazo y determinar un tiempo idóneo en el cual se estime la grieta podría estar completamente llena.

Por ejemplo, Trout (2006) argumenta que es posible realizar una inyección de 5 a 10 minutos en una grieta que tiene 20 cm de profundidad con una resina de 200 cp de viscosidad a una presión de 1.72 MPa (17.2 kg/cm²).

Al inyectar grietas muy largas, un factor que es importante para el tiempo que toma la inyección es cuando la resina comienza a endurecer y por lo mismo obstruye las tuberías reduciendo el flujo y aumentando la presión. Por esta razón se debe considerar una purga cuidadosa, pues si se purga demasiada resina podría ser un gran desperdicio que afectará de manera económica. En contraste, sino se no se purga lo suficiente, existirán problemas al momento de la inyección para poder penetrar las grietas. Aquí Trout (2006) recomienda purgar un tercio de la resina que se encuentra en proceso de inyección al momento de cambiar de conexión.

3.4.5. Posibles fallas en el proceso de inyección

Siempre cabe la posibilidad de que pueda ocurrir una falla al momento de realizar la inyección. En general, estas fallas se dan en el sello, ya sea que exista una fuga de resina o que el sello se haya roto totalmente. A continuación, se describen las fallas, sus consecuencias y las medidas para repararlas.

- *Fugas en el sello*

Cuando ocurre una fuga importante en el sello se deben tomar medidas inmediatamente para minimizar la rotura y la pérdida de resina. Lo primero que se tiene que hacer al detectar una fuga es detener el procedimiento de inyección para evaluar el problema.

Si la resina escapa por debajo del sello, no es recomendable realizar una reparación temporal ya que es probable que el sello haya perdido la adherencia después de que éste se ha endurecido. En este caso es recomendable dejar que la resina se cure y continuar la inyección en los siguientes puertos. Mientras, se inyectan los demás puertos y si aún se presenta un poco de flujo, es posible tapar temporalmente sujetando un trapo contra el sello (Trout, 2006).

Si la fuga se da en un orificio menor es posible realizar una reparación temporal como la colocación de un clavo en ese orificio para taparlo un momento. Por otra parte, se ha mencionado anteriormente la existencia masillas epoxi de fraguado rápido que normalmente se utilizan en tuberías.

Se tiene que ablandar la masilla hasta que esté tibia y comience a endurecerse. Antes de colocar la masilla se debe limpiar la zona con un trapo seco, en este momento se debe colocar la masilla sobre la fuga para tapar el orificio. Después se presiona la masilla contra la fuga durante un minuto y esperar al menos cinco minutos antes de continuar el procedimiento de inyección.

Según Trout (2006), también es posible utilizar cementos hidráulicos o ceras calientes para detener las fugas. El cemento hidráulico se mezcla con agua hasta que comienza a endurecer luego se coloca con golpes y se cepilla. En el caso de la cera caliente, ésta se coloca sobre el área de la fuga donde se enfría rápidamente.

En caso de que la fuga sea pequeña y no se presente flujo a menos que la inyección se encuentre a una alta presión, el resultado final no se verá afectado. Generalmente la fuga desaparece cuando se reduce la presión o se termina la inyección. En este caso, si la inyección se realizará por un tiempo prolongado, el volumen de resina que saldrá será importante por lo que se debe detener la inyección y repararla. Si el tiempo de inyección es corto, bastara con terminar la inyección para detener la fuga.

Otro tipo de fugas se puede dar en el concreto. Muchas veces existen microgrietas que no podemos detectar a simple vista y es hasta el procedimiento de inyección cuando se observa la salida de resina por ellas. Este tipo de fugas se deben tratar de la misma manera que si existiera una fuga en el sello.

- *Agrietamiento en el sello*

Desde el punto de vista de Trout (2006), una de las causas más comunes es la falla del sello por agrietamiento, que generalmente se da por los cambios de temperatura del día y la noche. Si se coloca el sello en un día caluroso, el concreto tiende a expandirse y durante la noche al perder temperatura este tiende a contraerse. Si se coloca el sello y no se le ha dado el tiempo suficiente para que alcance su resistencia, éste puede fallar.

Incluso con el sello agrietado Trout (2006) menciona que se han podido obtener buenos resultados en la inyección. Normalmente las grietas generadas por este fenómeno son muy pequeñas y no permiten una fuga grande de resina y sólo se humedecen superficialmente.

Para minimizar la fuga de resina por estas pequeñas grietas se recomienda inyectar al final del día, después de que el sol haya calentado la superficie, cerrando la boca de la grieta, pues si se realiza temprano en el día, la grieta estará abierta y goteará más.

- *Grietas inyectadas con resina no catalizada*

Trout (2006) afirma que ésta es una circunstancia que ocurre pocas veces, pero puede pasar es la de inyectar una resina sin el endurecedor o que esté mal catalizada. Si se diera el caso es necesario realizar una reinyección. El éxito de este procedimiento depende del estado de la resina inyectada. Si la resina inyectada está parcialmente catalizada el material se encontrará de forma gomosa y más difícil de remplazar. Por esta razón si se desea reinyectar, se debe comenzar lo antes posible.

Para realizar la reinyección se tiene que utilizar una resina con la viscosidad más baja posible la presión más alta y el procedimiento de inyección de puerto en puerto. Se iniciará la inyección de la resina nueva hasta que la resina mal catalizada salga por los puertos y la remplace; esto se puede saber al comparar el color de ambas resinas. Esta comparación se hace de una mejor manera en un vidrio o acrílico transparente. El avance de la inyección entre puertos se debe realizar cuando se este seguro de haber remplazado la resina no catalizada.

Este procedimiento rara vez se concluye con una inyección totalmente exitosa, ya que no se puede garantizar el remplazo total de la resina previamente inyectada. A menudo, después de la inyección, se observa sangrar los elementos con resina que no fue catalizada. La única solución para este caso consiste en enrutar las grietas y llenarlas con un mortero epóxico (Trout, 2006).

Es necesario tener una buena supervisión de los equipos ya que no hay una razón válida para inyectar resina sin el endurecedor y este error puede ser sumamente grave si no se detecta a tiempo.

3.5. ACTIVIDADES POST-INYECCIÓN

Una vez que se ha realizado la inyección de forma adecuada y exitosa, es necesario dejar endurecer la resina por un mínimo 24 h. De acuerdo con Fernández (1981) la resina normalmente alcanza su resistencia a los 28 días, sin embargo, a los siete días se puede considerar una resistencia hasta de 90 %. Dejar endurecer 24 h garantiza que la resina alcance una resistencia razonable.

Pasado este tiempo se puede retirar el sello, si éste es considerado para ser retirado. Además, se debe realizar una prueba de ultrasonido para garantizar que la inyección se haya llevado de manera correcta.

3.5.1. Retiro del sello

El retiro del sello es un procedimiento que depende de dos factores fundamentalmente: la ubicación de la reparación y el método de sellado que se haya elegido. Por ejemplo, si no tiene gran importancia la apariencia del elemento, como debajo de un puente, se puede considerar incluso no retirar el sello del tipo que cubre la grieta (*capping*).

Lo que sí se debe retirar son los adaptadores o boquillas que se utilizaron para la inyección de la resina. Esta actividad se puede realizar con un martillo y un cincel afilado. Sin embargo, en ocasiones se prefiere golpear varias veces con una espátula. Esto depende totalmente de los puertos de inyección utilizados y su colocación.

Cuando la inyección se llevó a cabo en un elemento visible, normalmente se quita el sello tipo capa con una variedad de discos de lijado que desbastan la superficie hasta dejar la superficie completamente lisa, como se muestra en la Figura 32. Trout (2006) recomienda el uso de discos gruesos para evitar la gran cantidad de polvo que se genera en este procedimiento.

Otra forma de retirar el sello consiste en utilizar una espátula o raspador flexible. Estas herramientas funcionan bien en suelos lisos y muros. En general, toma un poco más de tiempo y es difícil utilizarla para quitar sellos en techos o trabajos sobre la cabeza.

De acuerdo con Trout (2006) se puede retirar el sello mediante calor. Dos personas son necesarias para este procedimiento, pues la primera se dedica a calentar el sello y la segunda a retirarlo. Sin embargo, este método no es recomendado en la *Guía técnica de rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México* (INIFED, 2020), porque el calor

podría influir de forma directa con la resina, ya que éstas son susceptibles al calor y los choques térmicos.

El retiro del sello está sujeto a las propiedades con las que se haya elaborado, al tipo de cargas y la formulación de resina, pero no es complicado su retiro y desprendimiento de los elementos. Si se desea no retirar el sello de los elementos es recomendable utilizar el método de empaçado (*packing*) descrito en el inciso 3.3.3.1 de esta tesis.



a) Antes del retiro del sello y las boquillas

b) Después del retiro del sello

Figura 32 Retiro del sellado (Abarca, 2020)

3.6. CONTROL DE CALIDAD

Para que el procedimiento de inyección se lleve de manera exitosa es necesario tener un buen control de calidad de los materiales, los equipos y los procedimientos. Existen diferentes métodos para evaluar las reparaciones realizadas con inyección de resina epoxi. A continuación se mencionan los métodos según Goodwin et al. (2016):

- Observación directa de la inyección.
- Pruebas de los materiales.

- Obtención y evaluación de núcleos de grietas inyectadas.
- Métodos no destructivos para el aseguramiento de la calidad. `

3.6.1. Observación directa

La observación visual del todo el proceso de inyección a menudo se utiliza como una herramienta de control de calidad. Se puede obtener información útil de la observación del procedimiento de inyección, por ejemplo, si la grieta atraviesa al elemento, si en el momento de la inyección se observa que la resina sale del otro lado del elemento se puede decir que la resina penetró en toda la profundidad.

Otro ejemplo es cuando se observa que la inyección secuencial de puerto a puerto fluye correctamente; si bien esto no garantiza que la resina esté penetrando en toda la profundidad, da una buena señal de que si se continúa con el procedimiento y presión adecuadas, la penetración será completa.

Las resinas epoxi con viscosidades bajas tienden a buscar un nivel de vacío por gravedad, excepto cuando existen fuerzas capilares que no lo permiten. El reconocimiento de este fenómeno es importante para determinar si la inyección logra una penetración total. De acuerdo con Goodwin et al., (2016) comenzar la inyección en la elevación más baja de la grieta y observar la progresión de la resina epoxi de un puerto a otro en los puertos de elevación sucesivamente más altos hasta que alcanza el último puerto, proporciona una medida de seguridad de que la grieta se ha llenado completamente.

También es posible garantizar la penetración de resina si se observa detalladamente que no existan fugas de resina en microgrietas que no hayan sido detectadas y selladas en su momento.

3.6.2. Prueba de los materiales

Las pruebas de calidad que se realizan tanto en laboratorio como en campo, son importantes porque determinan, con diversos grados de precisión, si el constructor ha proporcionado y mezclado correctamente la resina.

Pruebas en laboratorio

Se pueden utilizar pruebas físicas y químicas para determinar si una resina epoxi se ha mezclado y proporcionado correctamente. El método de prueba física más común es una prueba de resistencia a la compresión según la norma ASTM D695, la prueba química más utilizada es la discutida en ASTM E2160. Se utilizan estas normas debido a que no hay normas mexicanas, NMX, para este tipo de procedimientos.

La prueba ASTM D695 se utiliza para detectar diferencias indicadas por cambios de resistencia a la compresión a medida que avanzan las pruebas. Las muestras de resina se obtienen del puerto de descarga de mezcla o de la resina epoxi en lotes. La prueba ASTM E2160 mide el calor exotérmico de la reacción mediante calorimetría de barrido diferencial. La prueba compara los resultados con una muestra que se sabe que está completamente curada. Esta prueba confirma que las muestras de resina se han curado completamente y que el material de campo coincidió con lo establecido en el proyecto.

También es posible realizar pruebas de tensión (norma ASTM D638) pero se usa con menos frecuencia porque es muy difícil preparar las muestras en campo. En cuanto a las pruebas químicas se puede utilizar una prueba de espectroscopía infrarroja para verificar que el material entregado al laboratorio sea el mismo que el inyectado.

Pruebas en campo

En campo se pueden realizar las siguientes pruebas:

- *Prueba de resina mixta*

Esta es una prueba cualitativa que consiste en observar directamente la resina epoxi que se está inyectando. Si durante el trabajo se observa un cambio en el color de la resina epoxi o que la resina epoxi comience a verse defectuosa, se debe detener el procedimiento y buscar donde está el problema.

- *Tiempo en gel y revisión visual*

La prueba en gel es un procedimiento descrito en la norma ASTM C881 que se utiliza para confirmar si la resina inyectada endurecerá. En esta prueba se modifican las condiciones de temperatura para acelerar el curado y reducir sustancialmente el tiempo necesario para ver resultados. La información importante de esta prueba es conocer si la resina que se inyectó gelificará.

En esta prueba de curado a temperatura elevada se identifican los errores en la dosificación y mezcla de los componentes, pero no asegura que la resina se curará con las propiedades físicas esperadas. Es importante reconocer que una resina puede gelificarse, pero nunca curarse por completo debido a una mala proporción o mezcla de los componentes.

Mediante el uso de la prueba de tiempo de gelificación, en un recipiente transparente, se puede realizar una revisión visual. La mezcla se utiliza para identificar una proporción incorrecta o mal mezclado si aparecen rayas o una diferencia notable del color comparándola con una muestra estándar de resina.

Antes de iniciar cada trabajo, se debe establecer una muestra estándar a inyectar de cada lote de resina, que se utilizará mezclando cuidadosamente a mano 85 g con la proporción correcta. Se debe anotar la proporción, el tiempo de gelificación, el color y la temperatura ambiente de ese momento.

Las pruebas de gel deben realizarse por lo menos una vez durante los primeros 15 m de inyección y posteriormente cada 30 m de grietas inyectadas. También es posible recolectar muestras de resina que sale por los puertos de inyección.

- *Pruebas del equipo de inyección*

De acuerdo con Goodwin et al., (2016), es recomendable revisar frecuentemente el equipo de inyección que se utilizará, en especial si es un equipo de dos componentes, es decir que se encargue de la dosificación y mezclado de la resina. Se debe retirar, antes de cada inyección, algún tipo de sobrante que comienza a gelificar con un solvente especial dependiendo de cada marca. Esto se hace con la finalidad de confirmar que se está produciendo material bien mezclado con la proporción adecuada.

- *Prueba de proporción*

La prueba de proporción se realiza desconectando el dispositivo de mezcla, recolectando cada uno de los componentes y luego comparando la proporción de los componentes con la proporción deseada. La proporción de la mezcla de los componentes se especifica por volumen. En la prueba, los componentes deben ser tomados en recipientes transparentes graduados. Se mide el volumen de cada componente y se calcula la proporción que está proporcionando el equipo.

Si se quiere tener mayor exactitud, es posible medir las masas y calcular su volumen con el peso volumétrico especificado por el fabricante. Las muestras deben tomarse al inicio de cada inyección o cuando se realicen ajustes o reparaciones al equipo (Goodwin et al., 2016).

- *Prueba de presión*

Se recomienda realizar una prueba de presión en aquellos equipos de inyección de dos componentes. Cuando se utilizan para inyectar grietas muy estrechas, las bombas de inyección pueden detenerse a altas presiones sin producir flujo. Estas presiones pueden causar fugas en los dispositivos de medición.

Para probar fugas, se cierran los puntos de descarga más allá de lo que marcan los manómetros y se lleva la presión del sistema en cada línea de descarga al menos a 80% de presión de descarga máxima de la que es capaz la bomba, pero no más de 1.38 MPa (14 kg/cm²). Se observa la presión en cada línea por tres minutos; si la presión cae más de 0.034

MPa (0.34 kg/cm^2) hay una fuga interna y su relación de dos componentes puede no estar dentro del estándar de aceptación (Goodwin et al., 2016).

Si el equipo no está diseñado para realizar este tipo de pruebas, se debe revisar el manual de usuario para garantizar y confirmar la precisión en condiciones de alta presión y bajo flujo.

3.6.3. Obtención y evaluación de núcleos de grietas inyectadas

De acuerdo con Goodwin et al., (2016), se puede evaluar la calidad de la inyección obteniendo y probando núcleos perforados en áreas inyectadas para determinar las características y propiedades físicas de la inyección. Las muestras o testigos se extraen mediante perforación, ya sea en seco o húmedo, con brocas de punta de diamante.

Se debe tener especial cuidado al momento de extraer los testigos para no cruzarse con el acero de refuerzo de la estructura y causar algún tipo de daño. El diámetro mínimo de pruebas físicas de laboratorio lo dicta la norma ASTM C42 ya que no existen normas NMX. Esta requiere un diámetro mínimo de dos veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso del concreto. Además, se recomienda el uso de tres veces el tamaño máximo nominal del concreto del agregado grueso para ensayos de tensión y compresión.

Si el núcleo se va a utilizar en una prueba de resistencia a la tensión indirecta a lo largo de la grieta rellena, el núcleo debe tener un diámetro lo suficientemente grande (por lo general de 75 a 100 mm de diámetro) de modo que la trayectoria de la grieta quede dentro del cuerpo del núcleo en todo su diámetro.

Los núcleos de diámetros más pequeños (25 a 50 mm) son utilizados para realizar una inspección visual. La ventaja de este tipo de núcleos es que son más fáciles de reparar y causan menos daño a la estructura.

En general, es recomendable tomar uno o dos núcleos por cada 30 m de inyección. Sin embargo, las autoridades o supervisión pueden aumentar o reducir las muestras con frecuencia.

Estas muestras se examinan, por lo general, para observar la penetración y el aparente fraguado de la formulación epoxi. Aunque se espere una penetración del ciento por ciento en todas las grietas, se acepta como buena la inyección si por lo menos 90% de las grietas están rellenas con resina epoxi (Goodwin et al., 2016).

Es muy común el uso de luz negra para observar de mejor manera si la resina ha penetrado totalmente en los núcleos de concreto extraídos. Esto se puede gracias a la propiedad que tiene de brillar bajo este tipo de luz. Los anchos de grietas que se muestran en la Figura 33 varían desde 0.050 mm hasta 0.064 mm. Además, es posible agregar un tinte fluorescente a la formulación epoxi para hacer este procedimiento más evidente.



Figura 33 Núcleos que muestran la penetración de la resina epoxi bajo luz negra (Goodwin et al., 2016)

Es necesaria una prueba física para determinar la resistencia de la resina epoxi curada y la fuerza de unión a cada lado de la grieta. Se puede realizar una prueba en campo que consiste en golpear el núcleo de concreto con un martillo a un lado de la grieta. Si éste falla por la unión, será necesario hacer más pruebas. Ya en laboratorio se puede realizar una prueba a tensión indirecta como se describe en la norma ASTM C496.

En esta prueba se debe intentar crear un plano de tensión perpendicular al plano de falla de la grieta. En esta prueba la orientación del núcleo en las placas de la máquina de prueba es de modo que la línea de unión este alineada verticalmente bajo las placas de carga que producen esfuerzos de tensión (Figura 34).

En estas pruebas se ha logrado una resistencia media a la tensión indirecta de 90 % de la del concreto no fisurado. Dada la variabilidad de los resultados es conveniente obtener muestras suficientes para determinar la resistencia a la tensión antes y después de la reparación. La fractura en el concreto y no en la unión de la resina, indica un desempeño satisfactorio.

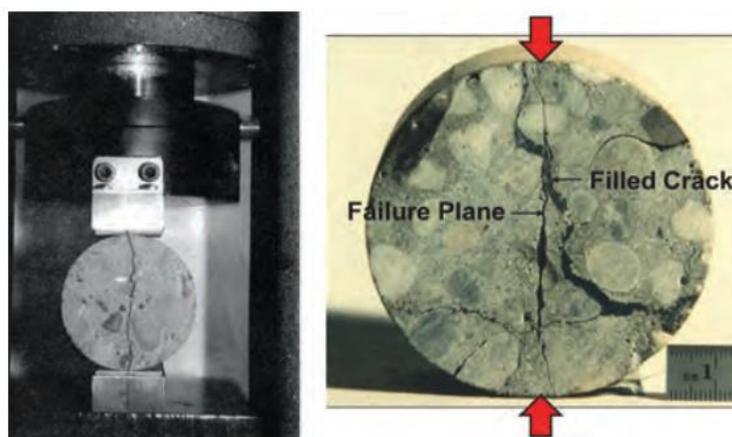


Figura 34 Prueba de tensión indirecta (Goodwin et al., 2016)

3.6.4. Métodos no destructivos para el aseguramiento de la calidad

Como se ha señalado en esta tesis las pruebas no destructivas de sonido o ultrasonido son válidas para evaluar reparaciones realizadas con resinas epoxi. Actualmente el International Concrete Repair Institute (ICRI) recomienda tres métodos para el aseguramiento de la calidad de la inyección de resina epoxi: velocidad de pulso ultrasónico (UVP), Impacto Eco (IE) y análisis espectral de ondas superficiales (SASW).

De estos métodos la UVP y el IE tiene estándar y prueba aprobados por las normas ASTM (ASTM C1383). El método SASW no cuenta con un estándar aprobado por las normas ASTM. Sin embargo, su aplicación está documentada en el ACI 228 2R (1998).

Estos métodos se utilizan generalmente en estructuras en las cuales se deben probar grandes áreas o cuando otras técnicas de aseguramiento de la calidad no pueden usarse. Las principales ventajas de este tipo de pruebas es que no producen ningún tipo de daño a las estructuras como lo hace la obtención de testigos o núcleos.

El método de velocidad de pulso ultrasónico se describió en el inciso 2.5.2, por lo que a continuación se describen el método de eco impacto y análisis espectral de ondas superficiales.

3.6.4.1. Velocidad de pulso ultrasónico

Después de la inyección, el retiro del sellado y el tiempo de endurecimiento de la resina, es necesario realizar una prueba de ultrasonido para confirmar la eficacia de la inyección. Con este método se pretende saber si la resina penetró completamente en el elemento.

Como ya se mencionó en 2.4.2, la prueba consiste en emitir un pulso ultrasónico a través del concreto y registrar el tiempo que tarda la onda en llegar de un lado a otro. Como se muestra en la Figura 35, se hacen dos mediciones. En la primera se coloca el emisor de onda antes de la grieta y el receptor después de la grieta.

Mientras que en la segunda medición se coloca el emisor en una zona en donde el concreto no esté dañado y a la misma distancia que la prueba anterior se coloca el receptor en un sitio de concreto visiblemente “sano”. De esta manera se pueden comparar los tiempos que le tomó a la onda pasar de un lado a otro y corroborar si la inyección fue exitosa.

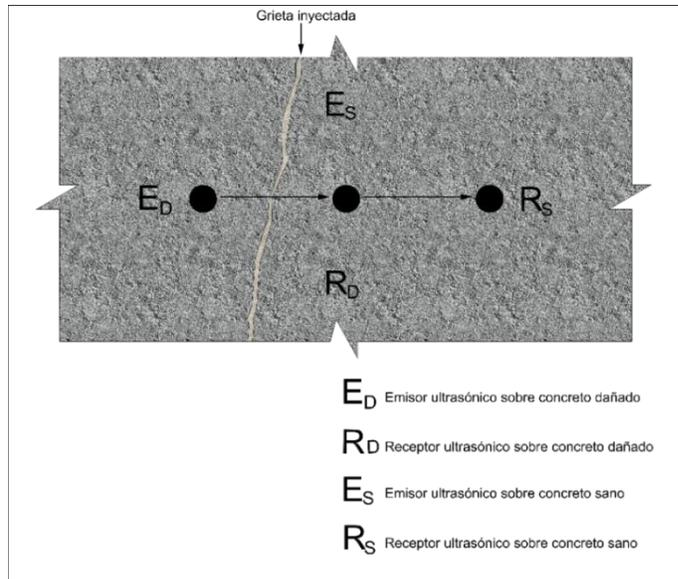


Figura 35 Prueba de ultrasonido (Alcocer, 2019)

De acuerdo con *Guía técnica de rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México* (INIFED, 2020), la inyección se considera exitosa si la diferencia de los tiempos de ambas pruebas no es mayor que 20%. Se considera exitosa la inyección porque la resina permite que la onda viaje por el concreto a la misma velocidad que si estuviera sano, lo que nos indica que ha recuperado su estado monolítico. Para realizar esta prueba existen diferentes equipos en el mercado como los que se muestran a continuación en la Figura 36.



Figura 36 Equipos para pruebas de ultrasonido (NEODEX, 2018)

3.6.4.2. Impacto Eco

En esta prueba la superficie es impactada por medios mecánicos por una masa pequeña que produce ondas como se ilustra en la Figura 37. Una vez que las ondas encuentran una discontinuidad en el concreto se reflejan de regreso a la superficie de prueba.

Las grietas sin relleno o parcialmente llenadas son las discontinuidades que reflejan las ondas o eco que son monitoreadas por un receptor colocado en la superficie del concreto. Debido a que tanto la fuente de impacto como el receptor se colocan en la superficie del concreto, sólo se necesita una sola superficie para probar los elementos de concreto a diferencia del método de pulso ultrasónico.

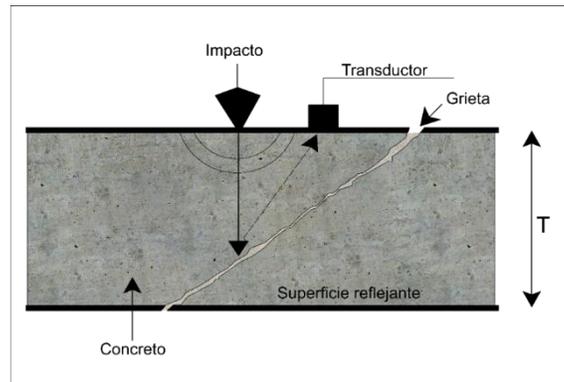


Figura 37 Ejemplo de la prueba de impacto eco IE (Goodwin et al., 2016)

En este método se dice que una grieta está bien rellena si sólo produce una onda de eco, mientras que si tiene vacíos o discontinuidades se pueden observar la presencia de diversos ecos resonantes y una frecuencia más baja (Figura 38). En esta grafica se comparan los espectros para un concreto agrietado (izquierda) y un concreto sano (derecha). En el concreto sano se aprecia un pico característico del concreto probado; en el concreto agrietado se observan varios picos asociados a las grietas.

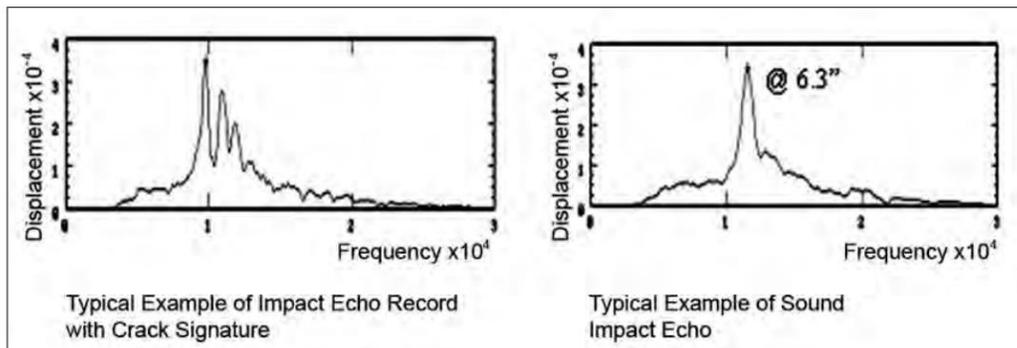


Figura 38 Prueba de impacto eco. Grieta totalmente rellena en un solo eco o pico (Der) y parcialmente rellena con más de un eco o pico (Izq). (Goodwin et al., 2016)

3.6.4.3. Análisis espectral de ondas superficiales

Este método se ha utilizado en estructuras y pavimentos para mediciones de velocidad de onda de corte sísmico en el suelo. Es útil para evaluar la inyección exitosa en grietas perpendiculares a la superficie del concreto y es efectivo para comparar la condición del miembro antes y después de la inyección.

El procedimiento se ilustra en la Figura 39. En este método se miden las velocidades que tardan las ondas en atravesar el elemento y se comparan con las del concreto sano. Si las velocidades son muy bajas y la longitud de onda es corta, entonces se considera al elemento como agrietado.

Si las velocidades de onda oscilan entre 2,100 y 2,400 m/s quiere decir que el concreto ha sido rellenado correctamente ya que se asemeja a la velocidad que recorrería la onda en un concreto sano.

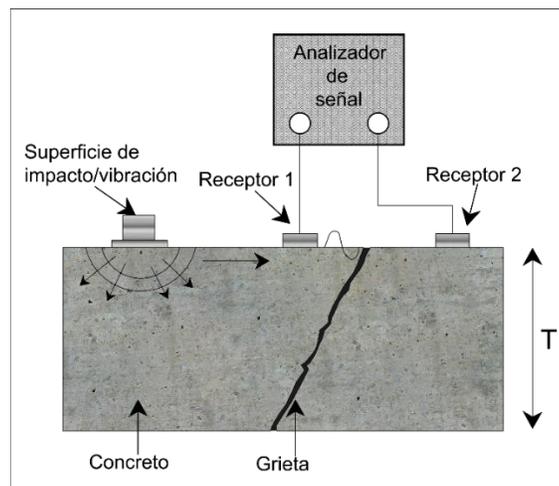


Figura 39 Método del análisis espectral de ondas superficiales (Goodwin et al., 2016)

3.7. CONCLUSIONES

De lo presentado en este capítulo, se concluye lo siguiente:

- a) El método de inyección a presión es el más utilizado por su facilidad de aplicación en campo y sus buenos resultados obtenidos en el mismo.
- b) Se identifican tres etapas importantes en el método de inyección de resinas epoxi a presión: acciones previas a la inyección, el procedimiento de inyección y las actividades post-inyección.
- c) La limpieza de las grietas es un factor determinante para un buen desempeño de la inyección y tiene que considerarse en todo momento.
- d) Es más conveniente utilizar el sellado mediante relleno (*packing*) y/o cobertura (*capping*) que el de perfilado (*routing*). De esta manera se evita la formación de micro agrietamientos en la proximidad de la grieta por reparar.
- e) Es conveniente utilizar un sello de preparación sencilla, con una proporción fácil de recordar y mezclar como 2:1 o 1:2. De esta manera, se ahorra tiempo y material en la aplicación.
- f) Es recomendable colocar las boquillas a una distancia no mayor de 50 cm para garantizar que la resina fluya bien de un puerto a otro.
- g) El método de colocación de boquillas más eficaz es el de enchufe (*socket*) ya que nos permite una rápida colocación, permite el correcto flujo de la resina hacia el elemento y se pueden retirar relativamente fácil.
- h) Se debe colocar las boquillas en conjunto con el sello para que la grieta quede totalmente hermética y no haya problemas de fuga en el momento de la inyección.
- i) Antes de realizar el procedimiento de inyección es sumamente importante revisar que el sello y las boquillas se encuentren correctamente colocadas y que se haya dejado el tiempo mínimo de 24 h para el secado correcto del mismo.
- j) La forma de inyección más adecuada en grietas inclinadas consiste en iniciar en la boquilla que se encuentre en el nivel más bajo, hasta que la resina emerja del puerto inmediato superior. Una vez que ocurre esto se cambia la conexión hacia ese puerto,

mientras se sella el anterior. Se continua con la inyección hasta terminar la grieta en la boquilla que se encuentra en el nivel más alto.

- k) La correcta forma de inyección en grietas horizontales consiste en inyectar del centro hacia los extremos.
- l) La presión convencional para el procedimiento de inyección va de los 0.28 MPa a los 3.45 MPa (3 kg/cm² a los 35 kg/cm²). Mientras que la mayor parte de los constructores sólo utilizan presiones hasta los 2 MPa (20 kg/cm²).
- m) El tiempo de inyección dependerá totalmente de la longitud y profundidad de la grieta. Un parámetro para detener la inyección es cuando la grieta se niega a recibir más inyección. A partir de este momento, se recomienda seguir inyectando un minuto más para asegurar la penetración total en las microgrietas.
- n) La aparición de fallas en el sello es muy común y se puede reparar con masillas epóxicas si las fugas son pequeñas. Si las fugas son grandes o no se detectan es recomendable detener el procedimiento de inyección y solucionar el problema.
- o) Se debe dejar gelificar y curar la resina por un tiempo mínimo de 24 h antes de realizar el retiro del sello.
- p) El retiro del sello se realiza por medios mecánicos y nunca con calor porque se podría afectar la resina inyectada. Además, es recomendable el uso de sellos tipo empaquetado (*packing*) para no tener que retirar el sello después de la inyección.
- q) Es importante confirmar la calidad de la inyección con una prueba de velocidad de pulso ultrasónico, de impacto eco o análisis espectral de ondas superficiales, para verificar la penetración de la resina en las grietas.
- r) Es necesario contar con un buen control de calidad al momento de realizar este procedimiento de inyección. Se tienen que tomar muestras de la resina, revisar los equipos, realizar pruebas en campo y verificar antes de realizar los procedimientos la limpieza y tiempos de colocación.

CAPÍTULO 4

RECUPERACIÓN DE ELEMENTOS DE CONCRETO REPARADOS CON INYECCIÓN DE RESINA EPOXI EN LABORATORIO

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describirán algunos ensayos de laboratorio encontrados en la literatura acerca de la reparación de grietas mediante inyección de resina epoxi a presión. Se discutirá su procedimiento experimental, las variables que utilizaron, la forma de inyección, los resultados esperados y, finalmente, los resultados obtenidos.

En este capítulo se presenta una tabla con los resultados de los experimentos que pudieron ser consultados directa o indirectamente.

4.2. DOCUMENTACIÓN EXPERIMENTAL

La información que se presentará en este capítulo fue encontrada mayormente en artículos científicos del ACI Structural Journal, además de artículos publicados en las bases de datos de Elsevier, Compendex y ResearchGate. Se complementó la información con las diversas fuentes y referencias encontradas al final de esta tesis.

Se realizó una búsqueda de información acerca de experimentación relacionada con la reparación de grietas utilizando el método de inyección a presión de resinas epoxi en diversas bases de datos científicas con acceso de la UNAM, el IINGEN y la UNIOVI.

Una vez identificados los artículos de interés se descartaron aquellos que no aportaban la información necesaria para el desarrollo de este capítulo. Desde el inicio de la búsqueda se observó que no existía mucha información al respecto por lo que al momento descartar se evidenció que la información de inyección de resinas epoxi es muy limitada en comparación con la de otras técnicas de rehabilitación.

La información y experimentación de este tema ha sido muy poca. Si bien esta técnica comenzó a utilizarse en los años 60, la información que se encuentra es de esa época, lo que indica que al principio existió un interés genuino en su estudio, pero al pasar los años este interés se fue perdiendo, quedando sólo un par de autores interesados en este tema.

En la actualidad se está comenzando a retomar el tema de la investigación y experimentación de la rehabilitación de estructuras de concreto mediante la inyección de resina epoxi, pues

con los eventos sísmicos recientes, la ingeniería civil está optando por diseños estructurales más rígidos y resistentes. Estas nuevas construcciones están diseñadas para sufrir daños menores (como agrietamientos) en futuros sismos, por lo que contar con una técnica de reparación de grietas que devuelva a los elementos dañados sus propiedades originales es la tendencia del futuro. Por esta razón es que en los años más recientes se comenzó a retomar el tema en lugares como Japón, Nueva Zelanda, Estados Unidos y, por supuesto, en México.

Los investigadores se han centrado en probar la efectividad de la resina epoxi en ensayos de laboratorio de vigas, columnas, conexiones viga-columna, marcos de concreto, entre otros elementos, con la finalidad de determinar cuáles son sus propiedades estructurales, antes y después de la reparación.

En estos ensayos se han comparado diferentes variables para observar qué ocurre con la capacidad de cada elemento. A continuación, se describen los principales artículos revisados.

4.3. TÉCNICAS DE REPARACIÓN CON EPOXI PARA DAÑOS MODERADOS

Este artículo fue escrito por Catherine W. French, Gregory A. Thorp, and Wen-Jen Tsai, en el año 1990 (French et al., 1990), y fue publicado en el ACI Structural Journal. French et al. (1990) describen el comportamiento de dos conexiones interiores viga-columna sometidas a cargas cíclicas hasta lograr un daño moderado.

Posteriormente las grietas se repararon mediante los dos métodos de inyección de resina epoxi: inyección a presión (RPI) y la inyección mediante vacío (RVI). Una vez reparados los especímenes se sometieron al mismo historial de carga con el que se ensayaron los especímenes originales.

Se le dio especial interés a la unión entre el armado y el concreto en la junta. Los resultados obtenidos se compararon entre sí y se llegaron a las conclusiones de que ambas técnicas de inyección funcionan bien bajo las condiciones establecidas en el laboratorio.

A continuación, se detalla las características, propiedades, historia de carga y el procedimiento de reparación y prueba que utilizaron French et al. (1990).

4.3.1. Especímenes de las pruebas

Los especímenes consistían en dos conexiones interiores de viga-columna. Se les dio el nombre de PI a aquellos que sería reparados mediante el procedimiento de inyección a presión, mientras que se nombró VI a aquellos que se repararon mediante la inyección a vacío. Después de la reparación pasarían a llamarse RPI y RVI.

French et al., (1990) mencionan que se eligió una junta interior de viga-columna porque dicha junta está sujeta a las condiciones más severas bajo cargas laterales. La columna contó con una sección transversal cuadrada de 380 mm (15 pulg) y una longitud de 2.4 m (94 pulg). Mientras que la viga tuvo con una sección transversal rectangular de 305 mm (12 pulg) de ancho, 510 mm (20 pulg) de alto y una longitud central de 2.4 m.

La columna fue armada con 4 barras del no. 8 (2.54 mm) y 4 barras del no. 10 (31.75 mm), tres barras en cada cara. Los estribos eran barras del no. 4 (12.7 mm) repartidos en la longitud a cada 50 mm (2 pulg) hasta llegar a los 460 mm (18 pulg); después de esta distancia se separaron a 100 mm (4 pulg).

El armado de la viga consistió de dos barras del no. 8 (24.5 mm) en la parte superior e inferior y estribos del no. 3 (9.5 mm) a 100 mm en toda la viga. Los armados y el diagrama del sistema de pruebas se muestran en la Figura 40.

French et al. (1990) mencionan que la relación entre el momento de la viga y la columna fue de 1.8 para asegurar el desarrollo de las articulaciones plásticas en las vigas en lugar de la columna.

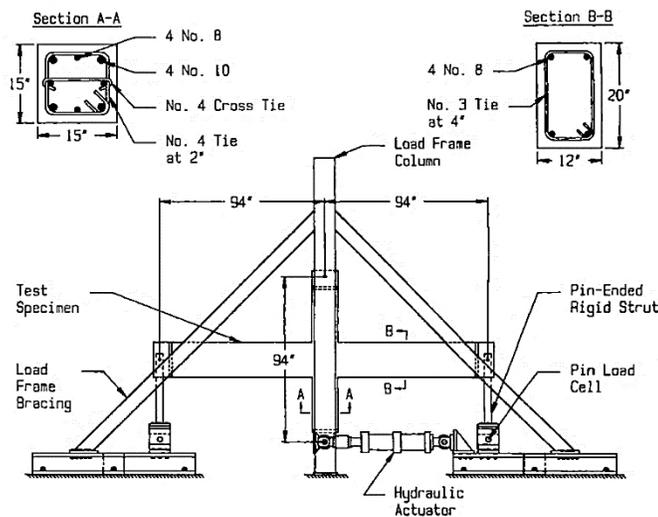


Figura 40 Sistema de prueba y sección transversal de viga y columna (French et al., 1990)

4.3.2. Propiedades de los materiales

El concreto utilizado en los especímenes tuvo una resistencia a la compresión de 41 MPa (410 kg/cm²) y una resistencia a la tensión del acero de refuerzo 410 MPa (4100 kg/cm²). Se midieron las resistencias del concreto de los especímenes PI y VI y se obtuvieron 61 MPa (6100 kg/cm²) y 65 MPa (6500 kg/cm²) respectivamente, mientras que la resistencia a la tensión real del acero fue 480 MPa (4800 kg/cm²).

La resistencia a flexión de la viga se calculó en 29 kN-m lo que correspondía a una carga lateral de 280 kN suponiendo que la articulación plástica se desarrollará en la unión viga-columna.

En cuanto a la resina se probaron tres formulaciones diferentes de resina epoxi para elegir cual sería utilizado en las reparaciones. Las formulaciones contaron con las siguientes viscosidades:

- Epóxico I: 5 poise con una vida útil de 10 h.
- Epóxico II: 2.4 poise con una vida útil de 80 min.
- Epóxico II: 1.4 poise con una vida útil de 30 min.

Se utilizaron diferentes viscosidades para observar si existe una gran diferencia en la penetración de las grietas de acuerdo con la viscosidad y el tiempo de vida. En este artículo se menciona que el epóxico III es el que se esperaba que tuviera una mayor penetración, sin embargo, con el tiempo los epóxicos I y II superaron la penetración del III ya que este endurecía a los 30 minutos.

Para la rehabilitación de los especímenes se optó por utilizar el epóxico II. En un principio se pensó en utilizar las tres formulaciones, sin embargo, fue deseable utilizar la misma formulación de resina epoxi para reducir las variables al tipo de técnica. La resina epoxi II exhibió las características más adecuadas en cuanto al tiempo de endurecimiento, ya que no tardaba tanto en endurecer (como la I), ni tampoco era lo hacía demasiado rápido (como la III), lo que permitió un buen tiempo de trabajo.

4.3.3. Historial de carga

French et al. (1990) señalan que se aplicaron una serie de cargas cíclicas estáticas para simular daños generados por terremotos. Los factores de ductilidad de desplazamiento pico (DDF= relación entre el desplazamiento extremo y el desplazamiento teórico) comprendieron tres ciclos a 1.3 (1.0), dos ciclos a 1.0 (0.5), dos ciclos a 4.0 (4.0) y tres ciclos a 2.2 (2.2); entre paréntesis se muestra el DDF en semiciclos negativos.

Al final de las pruebas, las estructuras reparadas fueron sometidas a ciclos de carga adicionales limitadas por la carrera del actuador. El desplazamiento de fluencia teórico fue de 24.5 mm suponiendo propiedades de sección agrietada.

Finalmente, el historial de carga completo correspondió a una ductilidad acumulada de 40, que es la suma de factores de ductilidad de desplazamiento a lo largo de la prueba.

4.3.4. Procedimiento de reparación

French et al., (1990) mencionan que se realizaron los dos tipos de reparaciones de grietas por los métodos de inyección a presión e inyección mediante vacío.

4.3.4.1. Procedimiento de inyección a presión

Para la inyección a presión se cepillo el área alrededor de las grietas a reparar para eliminar las partículas grandes en la superficie. Después se introdujo aire comprimido en las grietas que eliminó las partículas sueltas restantes. French et al. (1991), mencionan que se colocaron unas cintas pequeñas en tres partes de las grietas (superior, media e inferior) y sobre ellas se colocó un epóxico de secado rápido como sellador en toda la longitud de las grietas en aproximadamente 50 mm del ancho de las grietas.

Una vez que endureció la resina, se retiraron estas cintas para dejarlas como puertos para inyectar la resina epoxi. La inyección comenzó desde el puerto más bajo de cada grieta hacia arriba a lo largo de ellas. Cuando el epoxi emergió de cada puerto se supuso que la grieta ya estaba llena hasta ese puerto. Luego se tapó el puerto más bajo y la inyección a presión siguió en el puerto en el que se observó emerger. Esto se repitió para todas las grietas.

4.3.4.2. Procedimiento de inyección mediante vacío

Lo primero que se realizó fue cubrir la sección agrietada con una malla de plástico que proporcionó un camino por el cual la resina epoxi pudiera fluir hacia la región dañada. Después se cubrió con una hoja de polietileno de 0.3 mm de espesor para sellar el sistema y lograr el vacío.

Se colocaron tres puertos de entrada a lo largo de la región dañada. Uno en la parte inferior de cada viga y uno en la base de la región de reparación de la columna. Además, se conectó una manguera desde la parte superior de la región de la columna a una fuente de vacío, que consistió en un compresor de aire de 7.1 m³/s.

También, se conectaron tres mangueras adicionales desde los límites de la región de reparación hasta la fuente de vacío, con el objetivo de que el aire no volviera a ingresar al sistema, evacuando el aire en los límites de la región cerrada.

Una vez que se concluyó la instalación, se cerraron los puertos de entrada y se comenzó la generación de vacío. Se introdujo la resina epoxi hasta que el sistema estuviera completamente sujeto al vacío. La resina epoxi penetró por la presión ejercida por el vacío y cuando estuvo a punto de endurecer se retiró totalmente el vacío, tal que la presión atmosférica ayudó a penetrar en las partes de las grietas más alejadas. El procedimiento se puede observar en la Figura 16 del Capítulo 2 de esta tesis.

4.3.5. Resultados

Una vez que se probaron los especímenes y se realizó el procedimiento de reparación por ambos métodos, se volvieron a ensayar los especímenes ahora llamados RPI y RVI. Se examinaron y compararon los resultados de las pruebas antes y después de reparar.

Los resultados se presentan para los ciclos de interés y se dividen en ciclos iniciales (ciclo 1-2), ciclos de longitud de desplazamiento más amplio (ciclos 6-7) y ciclos finales de baja amplitud (ciclos 8-9).

4.3.5.1. Ciclos iniciales 1-2

En los ciclos de carga iniciales se pudo evaluar la restauración de la rigidez de los especímenes. En este ciclo se observa que los valores de rigidez máximos obtenidos para RPI y RVI alcanzaron 89% y 85% de las rigideces originales obtenidas en PI y VI, respectivamente. En la Figura 41 y Figura 412 se muestran las curvas de histéresis para los modelos, PI y VI, respectivamente. En ellas se incluyen las curvas de los especímenes reparados RPI y RVI. La línea sólida corresponde a PI y VI, mientras que la línea punteada a RPI y RVI.

De acuerdo con French et al., (1990) las pequeñas diferencias entre los valores de rigidez pueden atribuirse a los tres tipos de daños que se repararon intencionalmente o a las microgrietas generalmente menores que 0.1 mm que no se observaron en la región de reparación pero que ahí estaban. Además, se menciona que el recubrimiento de la columna sufrió daño por desconchamiento en los extremos por un apoyo inadecuado. En el espécimen RVI no se reparó bien una grieta principal de 6 mm por la dificultad del método de impregnación por vacío.

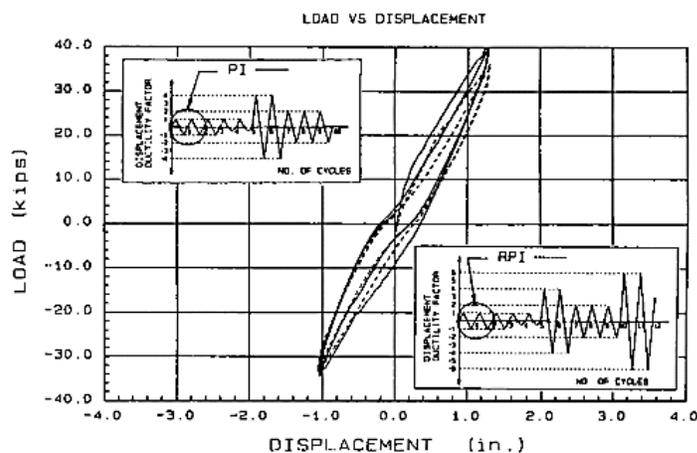


Figura 41 Curva de histéresis carga-desplazamiento en los ciclos 1-2. de los especímenes PI y RPI (French et al., 1990)

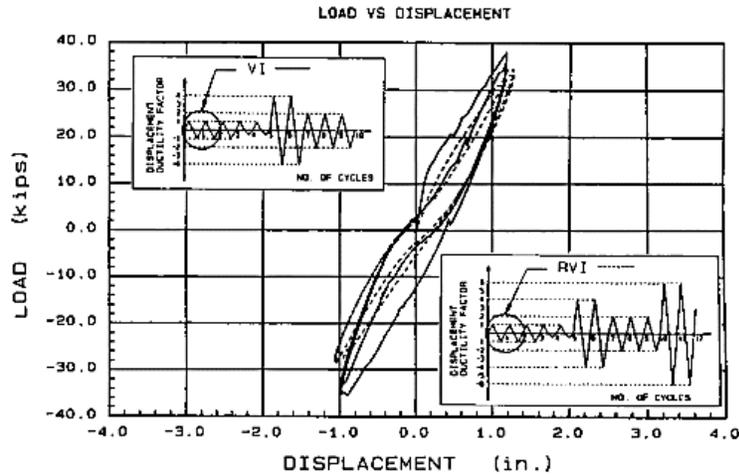


Figura 42 Curva de histéresis carga-desplazamiento en los ciclos 1-2. de los especímenes RPI y RVI (French et al, 1990)

La restauración de la rigidez fue ligeramente mejor en la prueba de RPI por dos razones: El modelo PI no sufrió tanto desconchamiento de la columna como el VI y la resina epoxi no escurrió de la grieta pues en RPI la grieta fue sellada.

French et al. (1990) compararon las rigideces finales de las pruebas PI y VI con las rigideces iniciales de las pruebas ya reparadas RPI y RVI. De esta comparación se observa que hay un incremento del 2.5 a 3 veces la rigidez si no se hubieran reparado por cualquiera de los dos métodos. Esto es prueba de la efectividad que tiene la resina epoxi para restaurar la rigidez de los elementos.

4.3.5.2. Ciclos de amplitud de desplazamiento 6-7

En los ciclos 6-7, que son los que muestran mayor amplitud de desplazamiento, brindan información sobre la efectividad de las técnicas para restaurar la resistencia, fuerza de unión y la capacidad de disipación de energía. Las curvas histeréticas de carga-desplazamiento se muestran en Figura 43 y Figura 44 para los especímenes PI/RPI y VI/RVI, respectivamente.

French et al. (1991), señalan que las resistencias de las cuatro pruebas fueron similares y se lograron durante el ciclo 6, con un $DDF=4$. Esto muestra que las técnicas de reparación fueron efectivas para restaurar la resistencia de los especímenes. Tanto la muestra VI y RVI alcanzaron una resistencia de 279 kN (28 t).

Mientras que la resistencia de PI fue ligeramente menor de 277 kN (28 t) la del modelo RPI logró la mayor carga registrada que fue de 290 kN (29 t) lo que representó un aumento de 5% en comparación con la conexión viga-columna original.

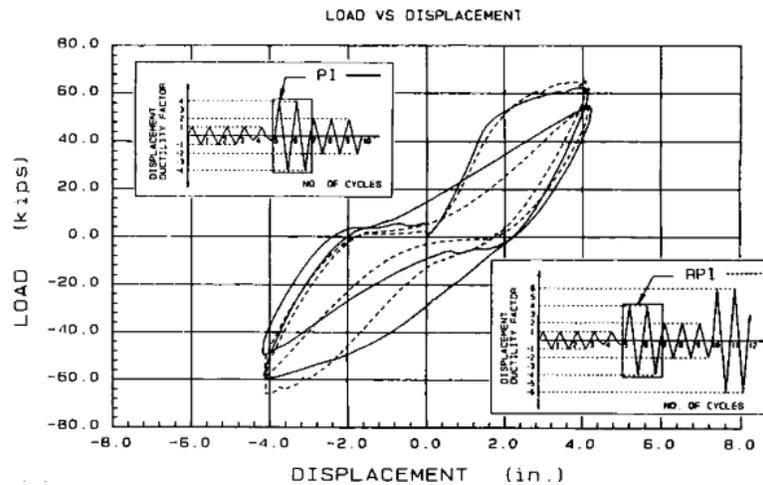


Figura 43 Curva de histéresis carga-desplazamiento en los ciclos 6-7. de los especímenes PI y RPI (French et al., 1990)

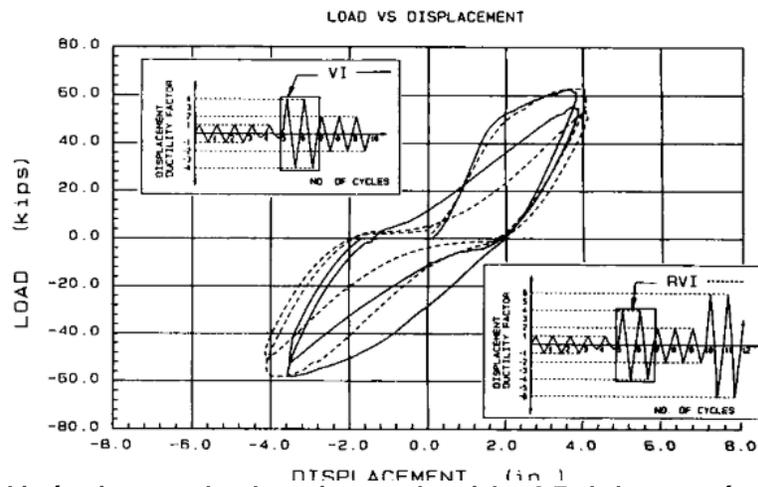


Figura 44 Curva histéresis carga-desplazamiento en los ciclos 6-7. de los especímenes VI y RVI (French et al., 1990)

French et al., (1990) atribuyeron este aumento de resistencia al desplazamiento de la articulación plástica lejos de la unión viga-columna, como resultado de la efectividad de la reparación de la grieta mediante la inyección de resina epoxi. El endurecimiento del acero de refuerzo es otro factor que ayudó a este ligero incremento de resistencia.

Para conocer acerca de la efectividad de las técnicas sobre la fuerza de unión se instrumentó el acero de refuerzo de la viga longitudinal para registrar la deformación del refuerzo longitudinal dentro del nudo. Las lecturas de deslizamiento medidas fueron una combinación de varios factores además del deterioro de la adherencia. Estos factores incluyeron, al deformación del acero de refuerzo y la rotación de la columna.

Los ensayos de las estructuras reparadas fueron ligeramente superiores a los ensayos de las originales; esto se atribuye al componente de rotación conjunta, es decir a la rotación presentada antes y después de la reparación. French et al. (1991), observaron que los desplazamientos de carga de los especímenes originales PI y VI contra los reparados RPI y RVI, fueron 25 veces mayores que los observados en ciclos anteriores.

Este aumento refleja una gran aumento del esfuerzo de tensión en el acero de refuerzo, resultado del aumento de la deformación conjunta y la rotación de la columna que se desarrolló durante estos grandes ciclos de amplitud-desplazamiento. Se registro un estrangulamiento de la curva carga-desplazamiento lo que indicó que la adherencia entre el acero de refuerzo y el concreto se deterioró.

El refuerzo longitudinal se deslizó con respecto al concreto lo que le impidió resistir carga. La pérdida de adherencia se reparó de manera adecuada con ambas técnicas. El deterioro apareció a la mitad inicial del ciclo 7 para PI y VI, mientras que comenzó en la última mitad del ciclo 6 para RPI y RVI. El daño severo de la adherencia en el modelo reparado se desarrolló medio ciclo antes que en las originales.

Le efectividad de la técnica de inyección a presión observada para restaurar la unión es atribuida a la penetración de la resina en las grietas conectadas entre sí. Al inyectarse las grietas visibles se observó que la resina fluía por otro tipo de grietas más pequeñas que no se observaban a simple vista.

En estos ciclos también se pudo conocer su capacidad de disipación de energía ya que 70% de la energía total disipada ocurrió ente los ciclos 6 y 7. La comparación se realizó observando la relación entre la energía disipada por las estructuras reparadas y las originales. La mayor parte de la disipación de energía se dio en el ciclo 6 que se dividió en dos gráficos de barras para indicar los semiciclos negativo y positivo (Figura 45).

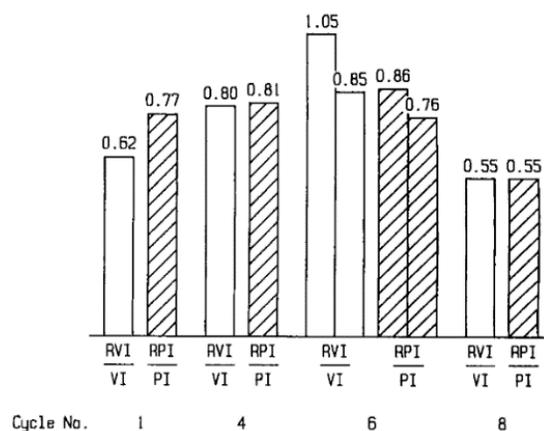
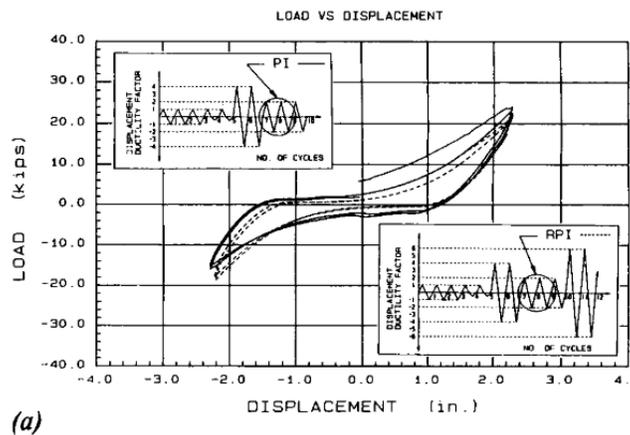


Figura 45 Relación de disipación de energía entre los modelos reparadas y originales (French et al., 1990)

De la gráfica se observó que en el ciclo 6 el modelo RVI tuvo incluso una mayor capacidad de disipación de energía que VI. El espécimen RPI disipó, en promedio, 80% de la energía disipada por PI.

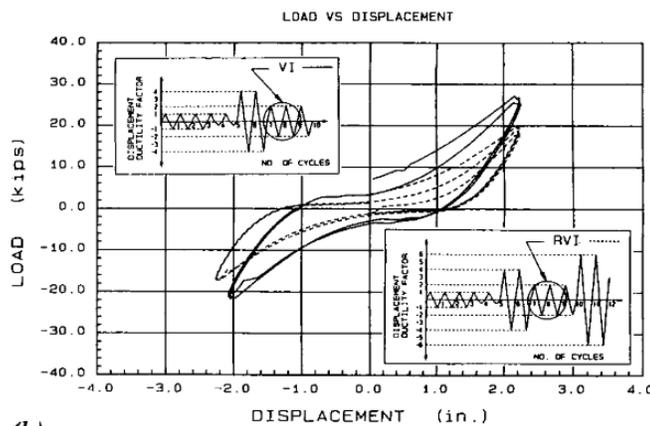
4.3.5.3. Ciclos de baja amplitud 8-9

Para estos ciclos se evidencia que las estructuras habían sufrido un daño severo. Se pueden observar sus curvas histeréticas carga-desplazamiento en la Figura 46 y Figura 47 para PI/RPI y VI/RVI, respectivamente. En estos ciclos, a pesar de que las estructuras fueron sometidas a ciclos de desplazamiento más pequeños, los deslizamientos de las barras con respecto al concreto fueron comparables a los medidos en los ciclos 6 y 7. El desplazamiento de las barras se evidencia mediante un severo estrangulamiento de la curva de histéresis y una rigidez casi nula en distorsiones muy bajas.



(a)

Figura 46 Curva de histéresis carga-desplazamiento en los ciclos 8-9. de los especímenes PI y RPI (French et al., 1990)



(b)

Figura 47 Curva de histéresis carga-desplazamiento en los ciclos 8-9. De los especímenes VI y RVI (French et al., 1990)

4.3.6. Conclusiones

Los autores de este programa experimental concluyeron lo siguiente:

- Las estructuras reparadas lograron más de 85% de la rigidez inicial de las estructuras originales no dañadas, lo que representó un aumento de 2.5 a 3 veces la rigidez final de las estructuras originales.
- Las grietas reparadas con resinas epoxi no volvieron abrirse en las pruebas de las estructuras reparadas. Se tendió a desarrollar nuevas grietas adyacentes a las ya reparadas.
- Se restablecieron las capacidades de resistencia y de disipación de energía en las estructuras reparadas.
- La adherencia entre el refuerzo y el concreto también fue restaurada por los procedimientos de reparación a distorsiones de entrepiso superiores a 4%. Se observó que el deterioro severo ocurrió medio ciclo de carga antes en las pruebas reparadas.
- Los sistemas epóxicos con viscosidades y tensiones superficiales más bajas pueden mejorar el rendimiento de los sistemas estructurales reparados.
- La inyección a presión ha demostrado ser un método eficaz para reparar daños estructurales moderados causados por sismos.
- Estas pruebas indican que la técnica de impregnación por vacío es igual de eficaz para reparar daños moderados, siempre que se sigan los cuidados que se aplican en laboratorio.
- Se recomienda el uso del método de impregnación por vacío para reparar grandes áreas dañadas. Se puede reparar toda la región a la vez en lugar de hacerlo grieta a grieta.

Como conclusiones de este estudio se puede observar que tanto los métodos de inyección a presión como impregnación al vacío son adecuados para la reparación de grietas estructurales y logran desempeños esperados. La diferencia radica en la dificultad de implantar el método de inyección a vacío en el campo.

4.4. EFECTO DE LA INYECCIÓN DE RESINA EPOXI EN COLUMNAS DE CONCRETO DE BAJA RESISTENCIA DAÑADAS

Este estudio experimental fue realizado por Hideo Araki y Seiya Izaki, en Japón, en el año 2012 (Araki e Izaki, 2012). En este artículo se describe la propuesta de reparación de columnas de concreto de baja resistencia mediante la inyección de resina epoxi a presión para mejorar el comportamiento a flexión de los elementos. Los experimentos se llevaron a cabo para aclarar el comportamiento sísmico de los miembros reparados mediante la inyección de grietas.

En este estudio Araki e Izaki (2012) se enfocan en el problema con el que cuentan algunas columnas, de que la resistencia a la flexión no se puede asegurar debido a una falta de adherencia y al deslizamiento entre el concreto y el acero utilizado, el cual ha sido el problema en una serie de estudios de elementos hechos con concretos de baja resistencia.

Al inyectar la resina epoxi es posible evitar que las barras deslicen antes de fluyan. La restitución de la adherencia parece recuperar e, incluso, aumentar la resistencia y la capacidad de deformación. Este experimento se caracteriza por tratar de aclarar el papel de la resina epoxi y el mecanismo de resistencia por flexión.

4.4.1. Esquema experimental

En la Figura 48 se muestra un esquema de los especímenes de prueba. Estos especímenes contaron con una sección transversal de 300 mm x 300 mm y una altura libre de 12 m. Todos los especímenes fueron diseñados para fallar por flexión.

Se probaron tres especímenes (NF15-30, LF15-30 y LF30-30), para los cuales la resistencia experimental del concreto es de 9 MPa y 18MPa como se muestra Tabla 9. La presencia o ausencia de reparación se indica con la palabra RE después del nombre de cada espécimen.

Tabla 9 Lista de especímenes (Araki & Izaki, 2012)

Nombre de los especímenes	Relación de fuerzas axiales	Sección transversal b x D, mm	Resistencia del concreto, MPa ^[2]
NF15-30	0.15	300x300	18
LF15-30			9
LF30-30	0.3		

^[2] 1 MPa = 0.0981 kg/cm²

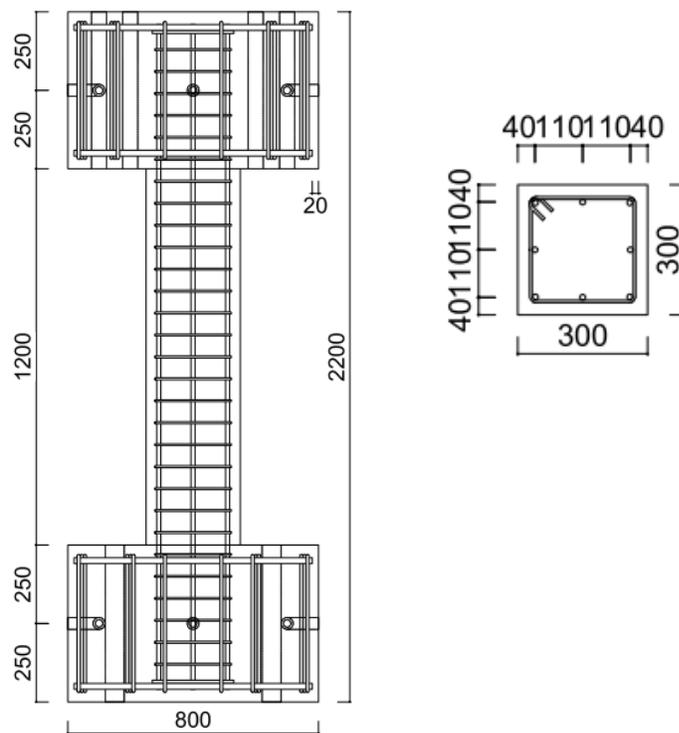


Figura 48 Dimensiones y armado de los especímenes (Araki e Izaki, 2012)

Para el armado, se utilizaron ocho barras de 13 mm de diámetro, tres en cada cara del elemento, mientras que para los estribos se utilizaron dos barras de 6 mm a cada 700 mm. En la Tabla 10, se muestran los resultados de los materiales utilizados para estas pruebas.

Tabla 10 Propiedades mecánicas del concreto (Araki & Izaki, 2012)

f_c' , MPa	Condiciones de curado	Resistencia a la compresión (MPa)	Esfuerzo Cortante (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
18	Sellado en sitio	17.8	1.96	24.6
9		11.5	1.45	22.7

^[2] 1 MPa = 0.0981 kg/cm²

Tabla 11 Propiedades mecánicas de la resina de reparación (Araki e Izaki, 2012)

Espécimen	Estado de la resina	Resistencia a la compresión (MPa)	Esfuerzo Cortante (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
NF15-30	Endurecida	13.2	1.71	7.22
LF15-30		9.3	1.73	6.19
LF30-30		9.9	1.35	6.01

^[2] 1 MPa = 0.0981 kg/cm²

Tabla 12 Propiedades mecánicas del acero de refuerzo utilizado (Araki & Izaki, 2012)

Diámetro	Esfuerzo de fluencia MPa^[2]	Módulo de elasticidad MPa^[2]	Resistencia a la tracción MPa^[2]	Rendimiento de distorsión (μ)
13 mm	327	194	426	1712
6 mm	310	178	455	1739

^[2] 1 MPa = 0.0981 kg/cm²

De manera inicial se produjo una deformación creciente gradual positiva y negativa. La deformación horizontal del espécimen llegó hasta 1/16 rad. Después este ángulo (deformación máxima) los especímenes se encontraban dañados por lo que se procedió a su reparación mediante la inyección de resina epoxi.

4.4.2. Método de reparación

La reparación mediante la inyección de resina epoxi se llevó a cabo de acuerdo con el siguiente procedimiento:

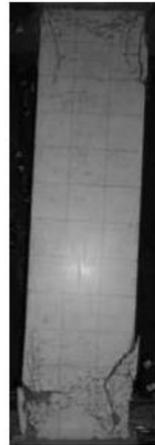
- 1) Las grietas a inyectar con resinas epoxi se determinaron mediante inspección visual.
- 2) Se taladró un agujero de 6 mm de profundidad en el punto de la inyección.
- 3) Se reparó el daño local de la sección transversal con un mortero epóxico.
- 4) Se colocó el puerto de inyección y se selló la grieta para evitar fugas.
- 5) Se inyectó la resina epoxi a baja presión con una máquina de inyección tipo resorte y se curó la resina.
- 6) Se retiró el inyector y el sello. De esta manera se consideró que la reparación estuvo completa.

Al reparar la sección transversal el recubrimiento de concreto agrietado se dejó como estaba; sólo se cubrieron las grietas mayores con un mortero epóxico.

4.4.3. Resultados experimentales

4.4.3.1. Patrones de agrietamiento

En la Figura 49 se muestra el agrietamiento y la deformación última de los especímenes antes y después de la reparación (deformación cuando la resistencia alcanza 80% de su resistencia máxima). En todos los especímenes el comportamiento estuvo controlado por la flexión. El agrietamiento se concentró en el extremo inferior de la columna hasta una distorsión de 4%



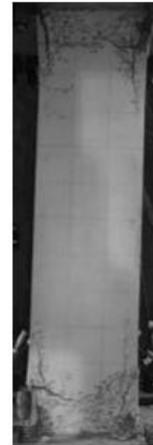
NF15-30

R= 4.0 %



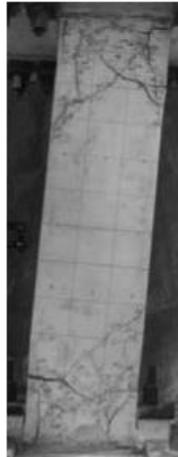
LF15-30

R= 4.0 %



LF30-30

R= 3.03 %



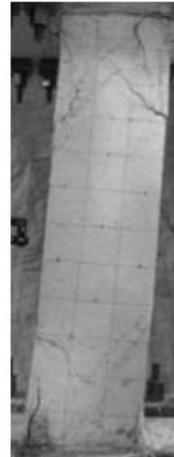
NF15-30RE

R= 5.0 %



LF15-30RE

R= 5.0 %



LF30-30RE

R= 4.0 %

Figura 49 Agrietamiento en las columnas antes y después de la reparación

En los especímenes originales se observó que las únicas grietas fueron por flexión. En los especímenes reparados (con la terminación RE) se produjeron grietas por corte (inclinadas) y flexión en los extremos superior e inferior antes de alcanzar la resistencia.

Araki e Izaki, (2012) consideran que la adherencia del acero de refuerzo liso se mejoró mediante la inyección de resina epoxi. Se mejoró el plano en la sección transversal de la columna de modo que el extremo inferior se dobló y agrietó generando una grieta diagonal y una articulación plástica.

El espécimen de concreto de resistencia normal NF15-30 solamente exhibió grietas de flexión a la resistencia. Una vez que esto ocurrió, la parte inferior de la columna se aplastó a medida que avanzaba la deformación y aumentaba el ancho de la grieta por flexión.

Al final del experimento el recubrimiento de concreto se encontró completamente agrietado y las barras de acero se hicieron visibles. Por otro lado, después de la reparación además de las grietas por flexión se produjeron grietas por corte (inclinadas). Después de eso la parte inferior de las columnas fueron aplastadas como se hizo antes de la reparación. Se agrega que al final hubo menos daños por aplastamiento que antes de la reparación.

Al igual que la probeta anterior la LF15-30 tenía únicamente grietas por flexión antes de la reparación hasta la resistencia máxima. Después de la reparación se produjeron grietas por corte y flexión. Una vez que se alcanzó la resistencia en la parte inferior de la columna, se aplastaron, antes y después de la reparación. Antes de la reparación alcanzo una deflexión de 6.25%.

Una vez que se reparó, se produjeron grietas de flexión más finas que en el espécimen anterior y el daño debido al aplastamiento también fue severo. Además, la columna de concreto de baja resistencia LF30-30 mostró las mismas propiedades de agrietamiento que las otras dos, pero después de la reparación se produjeron grietas de un ancho mayor.

Como característica general, las grietas después de la reparación tienden a ocurrir cerca del límite de la pared reparada y las grietas grandes ocurren en diferentes posiciones a las grietas que parecieron antes de la reparación.

4.4.3.2. Curva de histéresis carga-distorsión

En la Figura 50 se muestran las gráficas que relacionan la fuerza cortante y la distorsión de cada una de la probetas. En el espécimen de NF-1530, la columna falló a una distorsión de 1.51% en donde alcanzó su resistencia de 97.1 kN, misma que está cerca del valor calculado por la fórmula de flexión. Luego la resistencia disminuyó a medida que aumento la distorsión. A partir de esto se consideró que la falla fue por cortante-desplazamiento.

Por otra parte, después de la reparación, este espécimen alcanzó una resistencia de 103 kN a una distorsión de 1%. Después la capacidad resistente disminuyó hasta que se alcanzó la falla por flexión a una distorsión de 3.03%. En este espécimen la falla se consideró por flexión debido a la fluencia de las barras de refuerzo.

En el espécimen de concreto LF15-30 alcanzó su resistencia a una distorsión de 1.5%, sin que fluyeran las barras de acero. La resistencia no alcanzó el valor calculado por la fórmula de flexión por lo que se consideró que ocurrió una falla por adherencia del acero de refuerzo dentro del concreto. Después de la reparación la capacidad de carga máxima fue de 88.8 kN

a una distorsión de 1.51%. La resistencia medida excedió el valor calculado de flexión y la fluencia de las barras se confirmó a una distorsión de -1%.

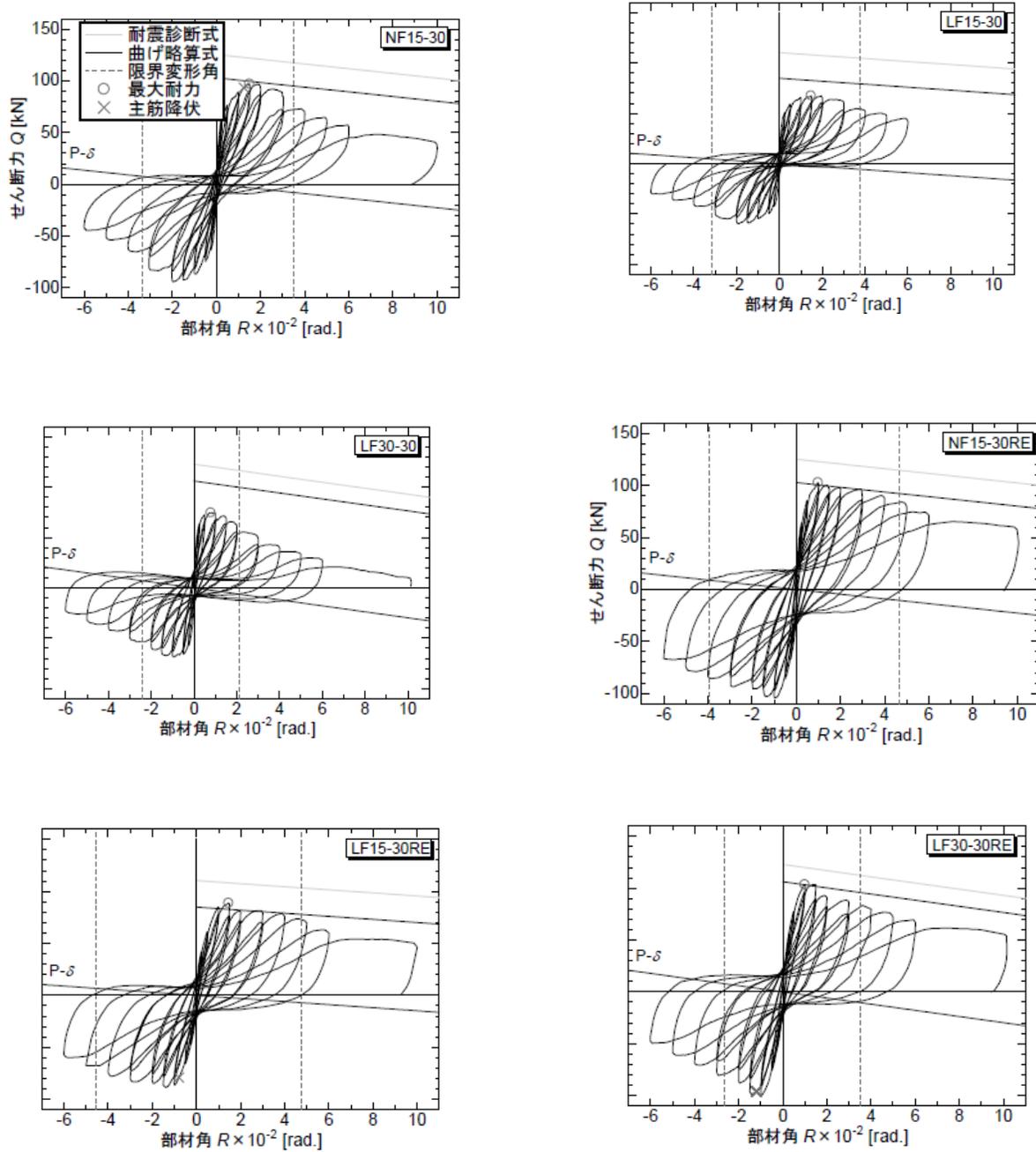


Figura 50 Curvas de histéresis fuerza cortante-distorsión de desplazamiento antes y después de la reparación (Araki e Izaki, 2012)

Para el espécimen LF30-30 la resistencia fue 74.8 kN a una distorsión de 1% y no se excedió a la calculada por la fórmula de flexión por lo que también se consideró como una falla controlada por adherencia. Después de la reparación, la capacidad de carga máxima alcanzó 103 kN a una distorsión de 1%, que está cerca del valor calculado por la fórmula de flexión. El tipo de falla después de la reparación también se consideró controlada por flexo-cortante.

4.4.3.3. Cambios de rigidez.

La columna de concreto de resistencia normal (NF15-30) recuperó casi la totalidad de la rigidez con la que contaba en un inicio antes de la reparación, mientras que las probetas de concreto de baja resistencia (LF15-30 y LF30-30) lograron una recuperación apenas de 50% de la rigidez con la que contaban. Estos resultados se pueden observar en la Tabla 13.

Tabla 13 Recuperación de la rigidez de los tres especímenes

Nombre	A la resistencia Inicial		A la máxima resistencia	
	Rigidez (kN /mm)	Relación	Rigidez (kN /mm)	Relación
NF 15-30	42.4	0.95	5.39	1.62
NF15-30 RE	40.1		8.7	
LF 15-30	49.6	0.49	3.82	1.33
LF 15-30 RE	24.3		5.09	
LF 30-30	45.1	0.51	7.64	1.09
LF 30-30 RE	22.8		8.67	

La rigidez que se presenta en la resistencia aumentó en todas las probetas, pero el factor de amplificación varió ampliamente. Esto probablemente se deba a los problemas de adherencia del acero de refuerzo ya comentado.

4.4.3.4. Deformación por flexión

La deformación por flexión se obtuvo mediante las mediciones del desplazamiento local e incluye la deformación por desplazamiento de las barras de refuerzo. Araki & Izaki (2012) mencionan que se observó que, para bajas distorsiones, la deformación por flexión en el límite entre la columna y la zapata, es grande y fluyó la barra principal.

Después de eso, la deformación por flexión controló el comportamiento debido al progreso del aplastamiento. En la probeta de concreto de resistencia normal (NF15-30) no se observó una diferencia significativa en la distribución de la deformación por flexión antes y después de la reparación.

En la columna de concreto de baja resistencia (LF15-30) la deformación se concentró en la base de la columna a una distorsión de 2%. Después de la reparación, la deformación en parte

inferior disminuyó y la deformación por flexión se midió en el centro de la columna, donde no se presentó deformación apreciable antes de la reparación.

Se puede apreciar que la adherencia de las barras longitudinales aumentó debido a la inyección de resina epoxi y que la deformación concentrada en los extremos tiende a disiparse en toda la altura. Lo mismo ocurrió con la probeta LF30-30.

4.4.3.5. Evaluación de la reparación

Se hizo una comparación de la envolvente de relación carga lateral-distorsión de las columnas antes y después de la reparación. Se observó que la resistencia de la columna de concreto normal NF-15-30 no cambió, pero la disminución de la resistencia después de la reparación fue gradual.

Se considero que la falla por adherencia comenzó inmediatamente después de la fluencia de la barra de refuerzo. Incluso en el caso de concreto de resistencia normal, se pudo observar que la ductilidad mejoró mediante el incremento de la adherencia entre el acero y el concreto.

Se realizó una prueba de extracción del acero en el concreto y se observó que el efecto de inyectar resina epoxi no sólo mejoró la resistencia de adherencia, sino que también aumento considerablemente la resistencia post-pico, de modo que el acero se pudo deformar antes de fallar por adherencia.

En la Tabla 14 se muestran las resistencias máximas, la distorsión y su factor de amplificación. El factor de amplificación de la probeta NF15-30 fue de 1.06 veces, es decir, recuperó un poco por encima de la resistencia con la que contaba la probeta original. La razón por la que no hubo mucha diferencia fue que la barra principal ya había fluido al alcanzar la resistencia antes de la reparación por lo que se considera que tuvo el mismo comportamiento antes y después de la reparación.

La resistencia máxima de la columna LF-15-30 fue de 67.7 kN antes de la reparación y después se registró una resistencia de 88.8 kN lo que muestra un aumento en la resistencia de 1.31 veces a la original. Esto se debe a que se impidió que las barras se desplazaran debido al aumento de la adherencia por la reparación, lo que les permitió a las barras fluir.

Lo mismo ocurrió en la probeta LF-30-30 que pasó de tener una resistencia de 74.8 kN a 103.5 kN después de la reparación, lo que significó un aumento de 1.38 veces la resistencia original.

Tabla 14 Límite elástico máximodistorsión y factor de amplificación (Araki & Izaki, 2012)

Nombre	Valor experimental, kN	Resistencia máx. y factor de amplificación	Distorsión, %	Relación entre distorsiones y factor de amplificación
NF 15-30	97.10	1.06	3.52	1.38
NF15-30 RE	103.00		4.68	
LF 15-30	67.70	1.31	3.75	1.27
LF 15-30 RE	88.80		4.77	
LF 30-30	74.80	1.38	2.12	1.65
LF 30-30 RE	103.50		3.50	

4.4.3.6. Disipación de la energía

En la Figura 51 se muestran las gráficas de disipación de energía contra el ángulo de las columnas. El efecto de la reparación comenzó a observarse a 2% de distorsión y la diferencia comienza a aumentar a medida que aumentó la distorsión. Finalmente se observó que la cantidad de energía disipada aumentó 1.7 veces en comparación con las probetas antes de la reparación

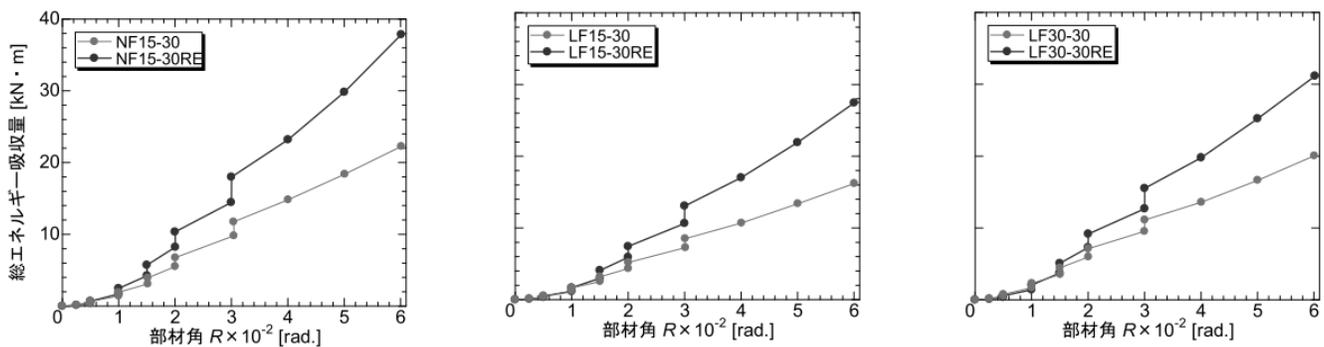


Figura 51 Gráficas disipación de energía-ángulo de rotación

4.4.4. Conclusiones

Al finalizar el programa experimental, Araki e Izaki, (2012) concluyeron lo siguiente:

- Se comprobó que las columnas de concreto de baja resistencia con acero redondo liso sufrieron fallas por adherencia y por deslizamiento antes de que el refuerzo principal fluyera y alcanzara la resistencia a flexión.
- Aunque la rigidez inicial de las columnas de concreto de baja resistencia se redujo a 50% de la que tenía antes de la reparación, tanto la rigidez como la resistencia se recuperaron al mismo nivel que el modelo original

- Al inyectar resina epoxi se pudo recuperar e, incluso, aumentar la adherencia de las barras con el concreto. Es posible llegar a desarrollar un modo de falla por flexión tal que la resistencia se pueda estimar utilizando la formulas clásicas a flexión.
- La curva histerética carga-distorsión mostró una forma característica de falla por deslizamientos (una forma de letra S). Los modelos reparados exhibieron una curva característica de un comportamiento controlado por flexión.
- Como resultado de una mayor disipación de energía total, aumentó la capacidad de deformación.
- Al reparar una columna con resinas epoxi se logró aumentar la capacidad de deformación.

4.5. CUANTIFICACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA REPARACIÓN EPOXI DE ARTICULACIONES PLASTICAS DE CONCRETO ARMADO.

Este artículo fue escrito por Kai J. Marder, Kenneth J. Elwood, Christopher J. Motter, y G. Charles Clifton en el año 2015 (Marder et al., 2020).

En este estudio se hace una recopilación de datos experimentales disponibles, incluyendo la información de tres especímenes ensayados por los autores, para documentar los efectos de la reparación de elementos estructurales de concreto mediante la inyección de resinas epoxi en el comportamiento estructural de articulaciones plásticas, con un enfoque en los elementos vigas. Se presta atención a factores que se han descuidado en estudios anteriores, incluidos los efectos de deformación residuales al momento de la reparación.

De acuerdo con Marder et al. (2020), las primeras investigaciones sobre el uso de resinas epoxi para la reparación de daños por sismos se remontan a la década de 1970. Las metodologías de diseño sísmico basadas en desempeño, como el FEMA P58 enumeran a la inyección de resinas epoxi como un método de reparación estándar de daños sísmicos moderados, donde el daño moderado incluye grietas por deformación del refuerzo longitudinal y desconchamiento del concreto.

Marder et al. (2020), mencionan que a pesar de las investigaciones hechas en el pasado y que el método de reparación es aceptado, se han realizado esfuerzos limitados por cuantificar el comportamiento posterior a la reparación de componentes de concreto armado con resinas epoxi.

Los autores se enfocan en entender el comportamiento de las articulaciones plásticas reparadas mediante la inyección de resinas epoxi, pues es el comportamiento previsto y el patrón de daño que se ha encontrado después de sismos en edificios modernos.

4.5.1. Metodología utilizada

La metodología utilizada en las experimentaciones anteriores (por ejemplo French et al., 1990 o Araki e Izaki, 2012) fue ensayar los especímenes no dañados hasta un estado de daño intermedio/moderado repararlo y volverlo a probar con el mismo protocolo de carga. Esta metodología les permitió comparar la rigidez y la resistencia. Sin embargo, dado que la inyección de resina epoxi se realizó antes de haber alcanzado la falla, se desconoce la capacidad de deformación del componente no dañado y, por ello, los efectos de la reparación epoxi sobre la capacidad de deformación no pueden ser evaluados.

De acuerdo con Marder et al. (2020), este estudio se basa en datos experimentales para realizar recomendaciones cuantificables sobre como calcular la respuesta posterior a la reparación de articulaciones plásticas mediante la inyección de resina epoxi a presión en elementos viga-columna. Las pruebas realizadas por Marder et al. (2020) se utilizaron para obtener información sobre los aspectos que según los autores se descuidaron en los anteriores estudios.

4.5.2. Pruebas experimentales

El programa de Marder et al. (2020) consistió en la prueba de tres vigas reparadas mediante la inyección de resinas epoxi, así como el estudiar de vigas no reparadas. En la Tabla 15 se muestran los especímenes probados y en la Figura 52 se muestran los protocolos de carga aplicados a cada uno de ellos.

Todas las vigas del programa eran nominalmente idénticas y estaban diseñadas para cumplir con las disposiciones del reglamento neozelandés Standard New Zealand (2006), (NZS 3101:2006). Además, todos los modelos cumplían los criterios para vigas de marco dúctiles del ACI-318. Las vigas se ensayaron en voladizo.

Tabla 15 Pruebas realizadas por Marder et al. (2020)

<i>Especímen</i>	<i>Protocolo de carga^[1]</i>	<i>Pico de desplazamiento</i>	<i>Reparación</i>	<i>Restricción axial</i>
MONO	Monótono	N/A	Ninguna	Ninguna
CYC	Cíclico [Fig. 1a]	N/A	Ninguna	Ninguna
CYC-LER	Cíclico [Fig. 1a]	N/A	Ninguna	15 kN/mm
CYC-NOEQ	Cíclico Modificado [Fig. 1d]	N/A	Ninguna	Ninguna

LD-1	EQ-luego-cíclico [Fig. 1b]	1.4%	Ninguna	Ninguna
LD-1-R	EQ-luego-cíclico [Fig. 1b]	1.4%	Después EQ	Ninguna
LD-2	EQ-luego-cíclico [Fig. 1c]	2.2%	Ninguna	Ninguna
LD-2-R	EQ-luego-cíclico [Fig. 1c]	2.2%	Después EQ	Ninguna
LD-2-LER	EQ-luego-cíclico [Fig. 1c]	2.2%	Ninguna	15 kN/mm
LD-2-LER-R	EQ-luego-cíclico [Fig. 1c]	2.2%	Después EQ	15 kN/mm

^[1]EQ denota la aplicación de un registro sísmico (véase la figura 52).

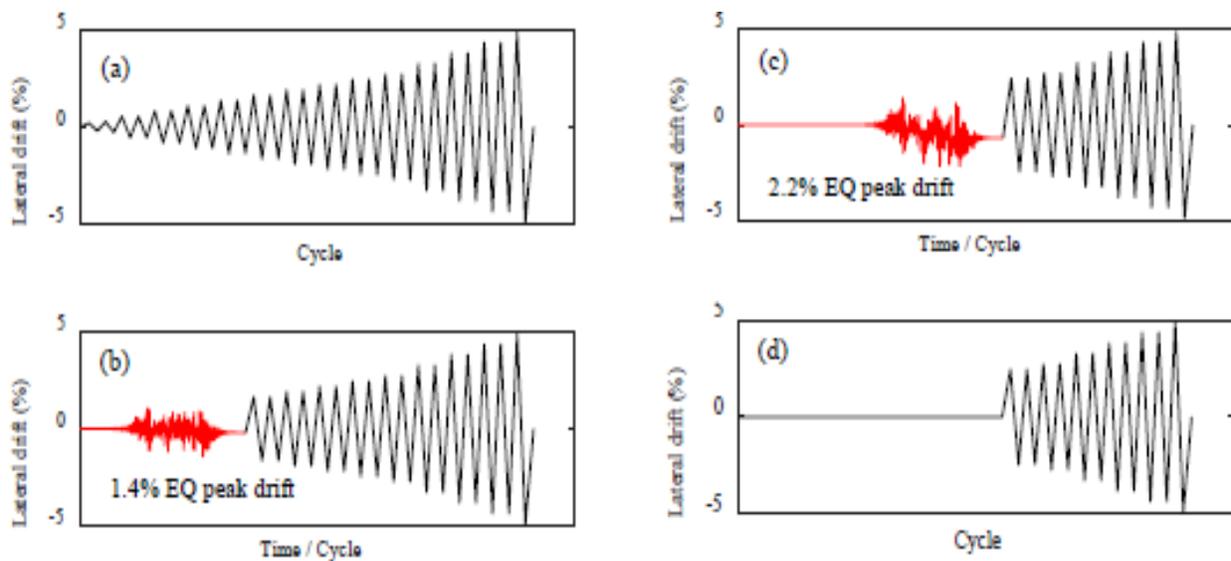


Figura 52 Protocolos de carga aplicados a los especímenes: (a)CYC, (b) LD-1 & LD-1R (c) LD-2 & LD2-R (d)CYC-NOEQ (Marder et al., 2020)

En el artículo se menciona que se repararon tres especímenes, denominados LD-1R, LD-2R y LD-2-LERR. A estos especímenes se les aplicaron inicialmente cargas horizontales de un historial de carga por sismo. Las curvas histeréticas de desplazamiento resultantes derivaron en análisis de la respuesta no lineal en un edificio dúctil con marco de momento sometido a movimiento del suelo de larga duración.

La distorsión máxima antes de la reparación fue 1.4% para LD-1R (Figura 52b) y 2.2% para LD-R2 y LD-2LERR (Figura 52c). Después de la reparación, los especímenes fueron

probados a fallar bajo un protocolo de carga cíclica inversa, comenzando con un ciclo ligeramente mayor que la distorsión máxima.

Para cada espécimen reparado, un espécimen nominalmente idéntico se sometió a la misma carga inicial, se dejó sin reparar y se sometió a un ciclo de falla (Especímenes LD-1, LD-2 y LD-2LER). Esta metodología permite la evaluación de los efectos de la reparación en relación con la misma viga dejada en su estado de daño.

Para las muestras sometidas a cargas sísmicas, los daños iniciales se produjeron dinámicamente; la carga cíclica posterior se aplicó cuasi estáticamente. Los especímenes no reparados (MONO, CYC, CYC-LER y CYC-NOEQ) se ensayaron completamente de forma estática.

Los modelos con sufijo LER fueron sometidos a compresión axial en proporción al alargamiento axial, con el fin de simular la resistencia de alargamiento de la viga que puede ocurrir en marcos dúctiles a momento. La rigidez de restricción axial dio como resultado una fuerza axial de 15 inducida por mm de alargamiento de viga.

En todos los especímenes el daño consistió en agrietamiento por flexión, agrietamiento longitudinal a lo largo del refuerzo longitudinal y desconchamiento menor del concreto. Los anchos máximos de grietas resultantes oscilaron entre 2.5 y 3.5 mm.

La reparación consistió en la inyección de resinas epoxi en las grietas y el remplazo del concreto de recubrimiento desconchado por un mortero de reparación epóxico de alta resistencia. A pesar de la aplicación de protocolos de carga idénticos, los especímenes equivalentes (LD1 y LD1-R) exhibieron patrones de agrietamiento diferentes después de las cargas de sismo iniciales, como se puede ver en la Figura 53.

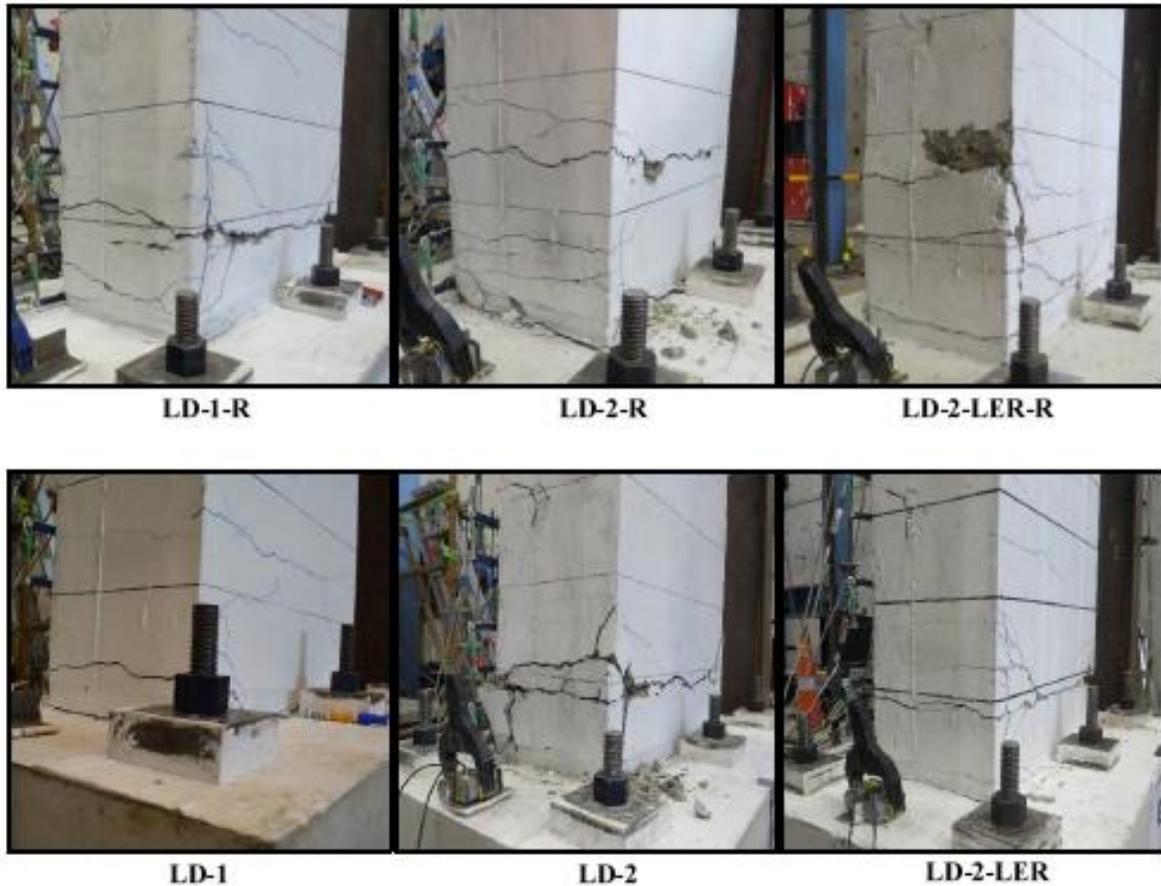


Figura 53 : Estados de daño inmediatamente antes de la reparación de las tres probetas de vigas reparadas (fila superior) y comparación con los estados de daño en el mismo punto de la prueba para las probetas equivalentes sin reparar (fila inferior) (Marder et al., 2020)

4.5.3. Conjunto de datos de todos los experimentos importantes

Marder et al., (2020) identificó en la literatura un conjunto de datos de 14 pruebas experimentales en articulaciones plásticas de concreto armado reparadas mediante la inyección de resina epoxi. En la Tabla 16 se muestra que el conjunto de datos consta de ocho especímenes encontrados en la literatura y las tres pruebas ensayadas por los autores.

Sólo se incluyeron los datos de las pruebas que involucraban la reparación de articulaciones plásticas mediante la inyección de resinas epoxi moderadamente dañadas en elementos viga-columna sujetos a cargas sísmicas simuladas`.

Los especímenes de prueba relevantes incluyen vigas (Celebi y Penzien, 1973 y Cuevas y Pampanin, 2017), subconjuntos de vigas y columnas exteriores (French et al., 1990) y columnas en puentes (Lehman et al., 2001).

Finalmente, en la Tabla 17, Marder et al. (2020) proporcionan un resumen de los efectos de la reparación de resinas epoxi, sobre la rigidez, la resistencia máxima, la disipación de energía y la capacidad de deformación. En algunos casos no se dispuso de datos numéricos y estos datos debieron estimarse de gráficos de carga-deformación.

Tabla 16 Conjunto de datos experimentales de articulaciones plásticas reparadas mediante inyección de resina epoxi (Marder et al., 2020)

Estudio	Tipo de elemento	Nombre de Especimen	Sección transversal (mm)	Relación o cuantía de refuerzo longitudinal %	Relación o cuantía de refuerzo Transversal %	Relación longitud entre dimensión h transversal %
Celebi and Penzien (1973)	Viga	Celebi-5	380 x 180	1.3	0.9	5.1
		Celebi-7 ²			0.5	3.7
		Celebi-9 ²			0.9	3.7
		Celebi-10 ²			0.9	3.7
Lee et al. (1976)	Subconjunto de Viga-columna Exterior	Lee-1	250 x 210	Asimetrico	0.6	4.7
		Lee-3			0.3	
French et al. (1990)	Subconjunto de Vigas-columnas interiores	French-RVI	510 x 310	0.7	0.5	4.3
		French-RPI				
Lehman et al. (2001)	Columna de Puente	Lehman-415MR ²	610 circular	1.5	0.7	4.0
Cuevas and Pampanin (2017)	Vigas	Cuevas-2	1100 x 575	0.6	0.5	2.3
		Cuevas-3				
Marder et al. (218b)	Vigas	LD-1-R ²	720 x 320	0.6	0.4	3.6
		LD-2-R ²				
		LD-2-LER-R ²				

Tabla 17 Base de datos experimental de reparación de articulaciones plásticas mediante la inyección de resinas epoxi (Marder et al., 2020).

Especimen	Demanda de ductilidad aproximada antes de la reparación	Demanda de distorsión aproximada antes de la reparación (%)	Relación de rigidez secante a la fluencia ¹	Relación de fuerza máxima ¹	Relación de disipación de energía ¹	Relación de la capacidad de deformación ¹
Celebi-5	3.5	3.0	N/A ²	1.11 ³	Similar (~0.9-1.1)	N/A ⁴
Celebi-7	4	3.0	N/A ²	1.21 ³	Similar (~0.9-1.1)	Reducido

Celebi-9	4	3.0	N/A ²	1.19 ³	Similar (~0.9-1.1)	Reducido
Celebi-10	5	3.0	1.1	1.17	Similar (~0.9-1.1)	Reducido
Lee-1	4	Distorsión de viga no aislada	0.9	1.28	Similar (~0.9-1.1)	N/A ⁴
Lee-3	4	Distorsión de viga no aislada	1.0	1.24	Similar (~0.9-1.1)	N/A ⁴
French-RVI	4	Distorsión de viga no aislada	0.85	1.01	Reducido (<0.9)	N/A ⁴
French-RPI	4	Distorsión de viga no aislada	0.9	1.05	Reducido (<0.9)	N/A ⁴
Lehman-415MR	3.5	3.1	0.5	1.0	Similar (~0.9-1.1)	Similar (~1.0)
Cuevas-2	1.2	0.6	1.0	1.05	Similar (~0.9-1.1)	N/A ⁴
Cuevas-3	2.2	1.1	0.9	1.05	Similar (~0.9-1.1)	N/A ⁴
LD-1-R	3.4	1.4	0.85	1.04	Similar (~0.9-1.1)	Incremento (>1.1)
LD-2-R	5.4	2.2	0.76	1.07	Incremento (>1.1)	Similar (~1.0)
LD-2-LER-R	5.4	2.2	0.85	1.07	Similar (~0.9-1.1)	Similar (~1.0)

1. La relación se refiere al valor del parámetro para la respuesta reparada, dividido por el valor de la respuesta original antes de la reparación (excepto en los casos de Lehman-415MR, LD-1-R, LD-2-R y LD-2-LER-R, donde las comparaciones son con especímenes no dañados nominalmente idénticos).

2. Los valores de rigidez antes y después de la reparación no son comparables debido a las diferentes factores de carga.

3. La relación de resistencia ignora el pico de rendimiento que se produjo en los especímenes originales sin reparar debido a las tasas de carga dinámica.

4. El procedimiento de prueba no permitió comparar la capacidad de deformación de las muestras reparadas y no dañadas.

4.5.4. Efecto de las deformaciones residuales antes de la reparación

De acuerdo con los autores la presencia de alargamiento axial residual puede causar un alargamiento acumulativo máximo de una articulación plástica reparada, en relación con el alargamiento máximo que es probable que ocurra si no se realiza una reparación.

En los experimentos revisados por los autores, no se hace mención a ningún tipo de alargamiento residual después de las pruebas de daño de los especímenes, mientras que en los especímenes ensayados por Marder et al. (2020), estos alargamientos fueron evidentes.

En la Figura 54 se muestra como el alargamiento posterior a la reparación de LD2R fue similar a la viga sin daño sometida a un protocolo de carga cíclica.

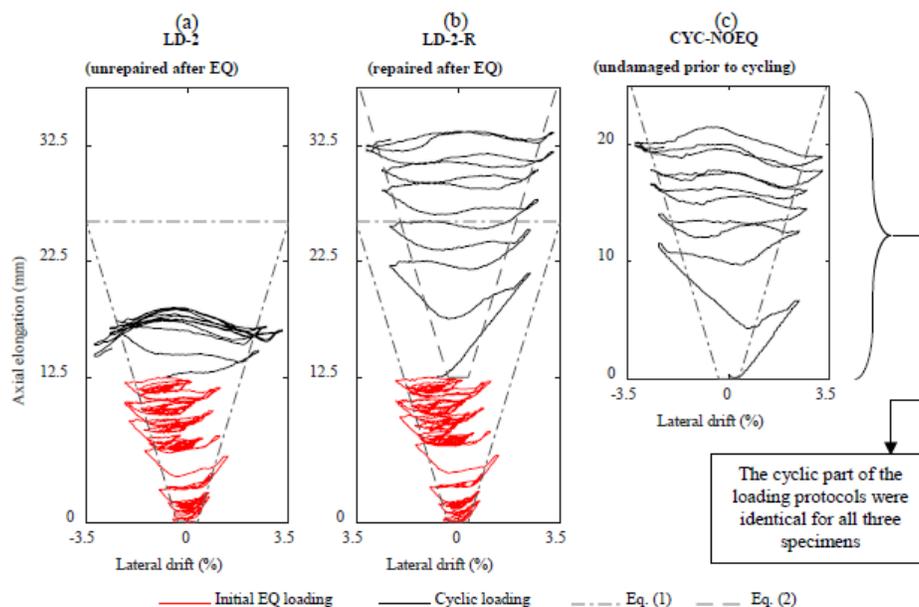


Figura 54 Relaciones de alargamiento axial versus distorsión para las muestras LD-2, LD-2-R y CYC-NOEQ (ciclos de hasta 3.3% de distorsión)

El alargamiento posterior a la reparación del espécimen LD2-R fue acumulativo al alargamiento residual de 12.5 mm que se midió después de la carga inicial del sismo. La viga LD2 sin reparar exhibió el mismo alargamiento residual de 12.5 mm después de la carga sísmica inicial, pero menos alargamiento durante la carga cíclica (5 mm frente 20 mm) ya que las deformaciones debidas al deslizamiento de las barras se volvieron dominantes.

4.5.5. Evaluación de daños posteriores

De acuerdo con lo observado por los autores, existen tres escenarios de daño posibles después de una reparación de grietas mediante la inyección de resinas epoxi en articulaciones plásticas. Estos tres escenarios son; la reubicación de las grietas a lo largo del elemento, la generación de nuevas grietas paralelas a las inyectadas y una combinación de ambas (véase la Figura 55).

Dentro del conjunto de datos estudiado, se observó que todos los autores informaron de algún grado de reubicación o alargamiento de las articulaciones plásticas después de la reparación en uno o más especímenes. En otros casos no se observó la reubicación o fue muy difícil de determinar por las condiciones de los experimentos.

En los especímenes probados por Marder et al. (2020) se produjo un daño distribuido (véase la Figura 55b) después de la reparación. En los tres especímenes probados se desarrollaron

grietas medibles con anchos superiores a 0.2 mm hasta una distancia promedio de 540 mm desde el extremo de la viga. Este daño distribuido en los especímenes no resultó en la formación de diferentes mecanismos de falla final, en comparación con los especímenes no reparados.

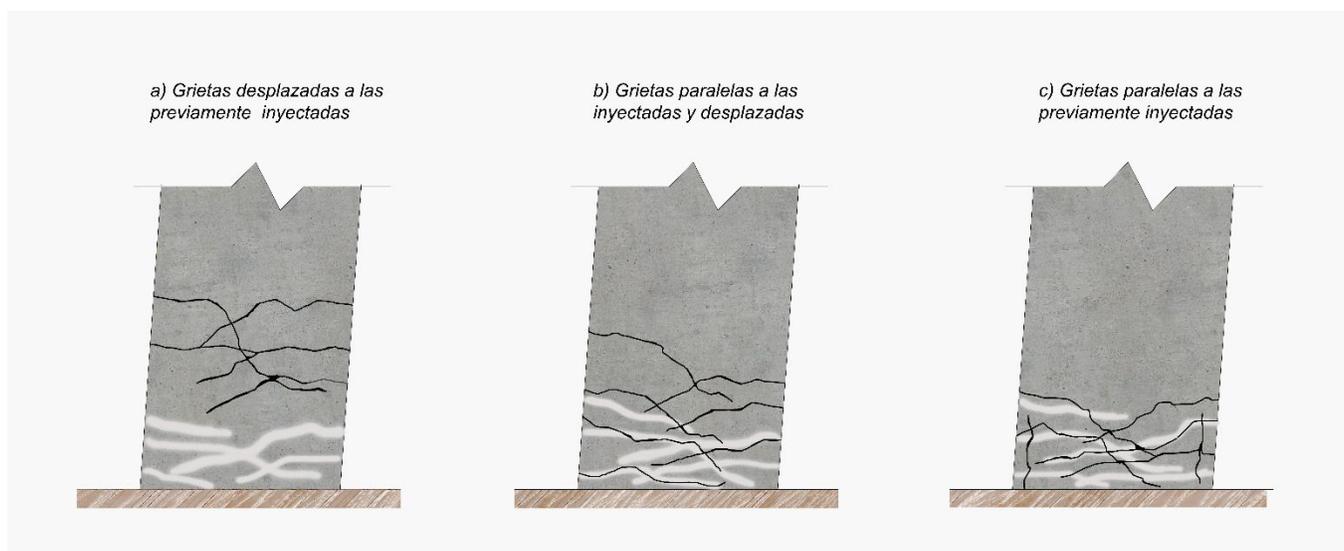


Figura 55 Escenarios posibles en cuanto a la reparación de las articulaciones plásticas

La reubicación de una articulación plástica ocurre si la resistencia del área reparada aumenta una cantidad suficiente para evitar que se desarrolle más daño en esa región. Por otro lado, la formación de daño en el área reparada ocurre si la resistencia del área reparada no aumenta lo suficiente como para forzar la reubicación.

Esto puede resultar en mayores deformaciones del refuerzo longitudinal debido al alargamiento acumulativo dentro de la articulación plástica y la demanda del refuerzo que anteriormente estaba sujeto a demandas inelásticas. El refuerzo previamente plastificado puede tener propiedades alteradas. En cualquier caso, un aumento en la fuerza cortante y otras acciones asociadas ocurren como resultado de cualquier aumento en la capacidad de momento en la región reparada.

En algunos casos puede ser deseable la reubicación de la articulación plástica para proteger el acero de refuerzo que ya había fluido. Esto se puede lograr mediante la modificación de la formulación epoxi o reforzando con fibras o encamisados de concreto o acero.

Rigidez

De acuerdo con la información obtenida en la literatura, once de las pruebas permitieron evaluar la relación entre la rigidez secante y el desempeño para los casos posteriores a la reparación y el elemento sin daños.

En la Tabla 17 se observa que diez de las pruebas tienen relaciones de rigidez entre 0.8 y 1.1. Todos los especímenes incluían articulaciones plásticas en una viga rectangular sin carga axial (excepto la de compresión cíclica LERR probada por los autores). Solo un espécimen tuvo una recuperación de la rigidez de 0.5 lo que Lehman et al. (2001) atribuyeron a una degradación de la rigidez y resistencia de la capacidad de unión entre el concreto y el acero de refuerzo.

En el conjunto de datos, se compararon las relaciones entre la rigidez secante del modelo reparado y la rigidez secante de la viga sin daño con la ductilidad de desplazamiento aplicada máxima antes de la reparación. Se puede ver que el nivel de ductilidad de desplazamiento al que se sometieron los especímenes antes de la reparación no está correlacionado con la relación de rigidez reparada y no dañada. Esta falta de correlación indica que las demandas antes de la reparación no tienen que ser consideradas al considerar la rigidez posterior a la reparación.

De esta información Marder et al., (2020) recomiendan que para una reparación de resinas epoxi se puede suponer de manera conservadora que el método puede restaurar la rigidez secante a 80% de la rigidez que tiene una viga sin daño.

En las pruebas de los autores se observa una recuperación de 85% para los especímenes LD1-R y LD2-LERR, mientras que, se observa una recuperación de 76% para el espécimen LD2-R.

Resistencia

La resistencia máxima a la flexión entre las muestras reparadas y no dañadas en el conjunto de datos osciló entre 1.0 y 1.3 con un promedio de 1.1. Estas resistencias también se compararon con la ductilidad de desplazamiento máxima antes de la reparación. Similar a lo que ocurrió con la rigidez, la ductilidad no se correlacionó fuertemente con la resistencia.

De la información observada en el conjunto de datos se puede esperar que las articulaciones plásticas reparadas mediante la inyección de resinas epoxi tengan capacidades de momentos flexionantes comparables con las de la sección original de concreto armado.

Marder et al., (2020) mencionan que los grandes aumentos en la resistencia a la flexión que se observaron en algunas probetas podrían ser preocupantes, ya que una capacidad de

momento superior a la esperada podría alterar la jerarquía de fluencia, en consecuencia, provocar una falla frágil.

Marder et al., (2020) supone que los aumentos de resistencia en las articulaciones plásticas reparadas se deben a una mayor resistencia longitudinal del acero que puede ser resultado de las deformaciones. También menciona que se requieren altas demandas de deformación antes de la reparación para que se produzca una mayor resistencia posterior a la reparación.

Se menciona que no se considera que la resina epoxi sea la responsable del aumento de la resistencia debido a que se vuelven a generar grietas en secciones paralelas a las previas y si bien ayudan, se consideró que este aumento se atribuye a la sobrerresistencia del acero.

Disipación de energía

Los especímenes exhibieron características de disipación de energía comparables antes y después de la reparación. En los especímenes de los autores se observó una comparación de la disipación de la energía similar entre las pruebas antes y después de la reparación, como se observa en la Figura 56.

En esta figura se puede observar que la energía disipada en todas las muestras reparadas había aumentado de 15% a 25% en el primer ciclo inmediatamente después de la reparación. Sin embargo, los especímenes LD1-R y LD2-LERR se degradaron rápidamente y solo LD2-R se mantuvo más alta que la disipación de energía promedio.

Los autores atribuyen que la mayor cantidad de disipación de energía LD2-R se debe a la menor magnitud de deformaciones por corte. Esta respuesta pudo haberse debido a la variabilidad en la progresión del daño más que a la reparación.

Finalmente, Marder et al. (2020) mencionan que siempre que se cumplan con los requisitos de anclaje y detalles, las articulaciones plásticas reparadas mediante la inyección de resinas epoxi normalmente disipan una cantidad de energía similar a la de componentes equivalentes sin daño.

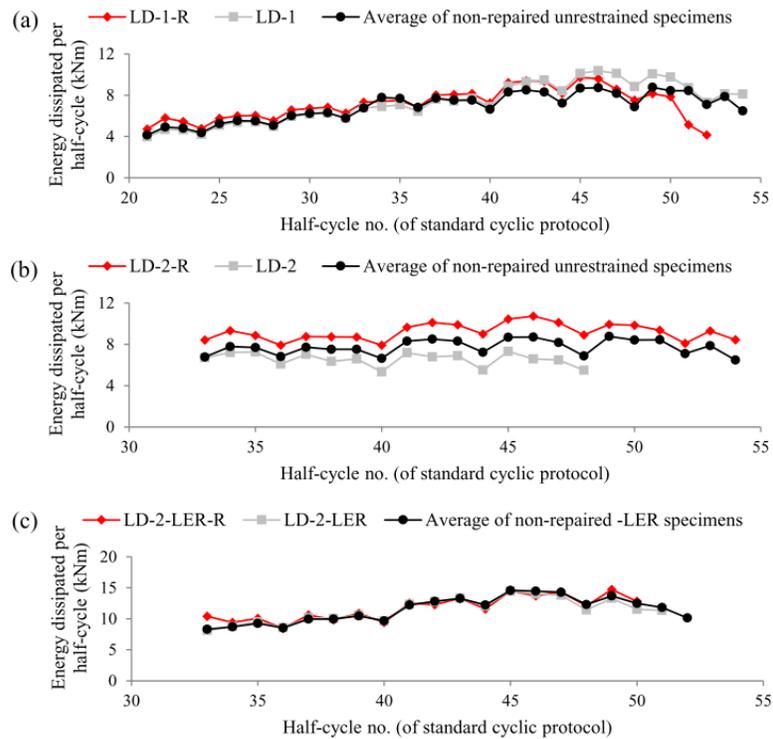


Figura 56 Disipación de la energía ciclo a ciclo de los tres especímenes (Marder et al., 2020)

Capacidad de deformación

En este caso sólo siete especímenes se probaron de una manera que permitió sacar conclusiones con respecto a la capacidad de deformación. En el caso de las tres muestras de Lehman et al., (2001) las columnas permitieron alcanzar capacidades de deformación al menos tan altas como las de sus equivalentes no reparadas.

Sin embargo, para las vigas probadas por Celebi et al. (1973), estas fallaron por fractura del acero de refuerzo con una demanda de deformación menor que la aplicada antes de la reparación. Marder et al., (2020) mencionan que, si se produce la reubicación de la articulación plástica, la curvatura inducida en la articulación reubicada debido a una demanda de distorsión posterior a la reparación sería mayor que la inducida a la articulación original si se sometiera a la misma demanda de distorsión, suponiendo que la longitud de la articulación plástica permanece igual.

Si no se realiza la reubicación de la articulación plástica, el alargamiento residual puede causar un aumento en el alargamiento acumulativo dentro de la articulación y un aumento asociado a la deformación del refuerzo longitudinal. El refuerzo dentro de la articulación

plástica también estaría sujeto a una reducción en la capacidad de deformación o la falla por deformación.

La inyección de resina epoxi puede mitigar estos problemas hasta cierto punto ya que la resina epoxi es útil para mantener cerradas las grietas, cambiando así la ubicación de las tensiones en el refuerzo longitudinal.

Para los especímenes de los autores se observó una capacidad de deformación similar a la que tenían antes de las pruebas; sólo la prueba LD1-R tuvo un ligero incremento en la capacidad de deformación.

4.5.6. Conclusiones

Los autores de este artículo presentaron los resultados de tres pruebas de vigas reparadas mediante la inyección de resina epoxi y reconstrucción del desconchamiento con morteros epóxicos después de aplicar una historia de carga de desplazamiento sísmico. Ellos concluyeron que, en comparación con especímenes de prueba nominalmente idénticos sin reparar, los especímenes reparados exhibieran:

1. Un aumento en la resistencia (<10%).
2. Una reducción en la rigidez secante (15 a 25%).
3. Un alargamiento axial.
4. Una mayor longitud en la viga de daño inelástico.
5. Capacidades comparables de disipación de energía y capacidad de deformación.

Además, Marder et al. (2020) plantean una serie de recomendaciones para futuros programas experimentales de reparación de articulaciones plásticas y consideraciones de diseño, por ejemplo:

- Se recomienda que en los programas de pruebas futuros se informe acerca de las deformaciones residuales antes de la reparación para evaluar más a fondo el tema.
- En vigas con poca o nula carga axial, la rigidez secante se puede estimar como 80% de la rigidez de un componente idéntico sin daño
- La resistencia a la flexión de una articulación plástica dúctil es al menos tan alta como la de un componente idéntico no dañado.
- Las características de disipación de energía de las articulaciones plásticas reparadas son comparables con las que le ocurriría a un componente idéntico sin daño.

- La capacidad de deformación de una articulación plástica puede reducirse o no en comparación con un componente idéntico sin daño.
- En las vigas probadas por los autores, no se encontró que el alargamiento residual en el momento de la reparación tuviera ningún efecto sobre la capacidad de deformación. Se requiere más investigación en este tema.

4.6. COMENTARIOS DE LA INFORMACIÓN

Estos tres artículos fueron seleccionados para mostrar los avances que se han ido dando a lo largo de los años acerca de la inyección de resinas epoxi. Cada uno del grupo de los autores ha podido aportar valiosa información acerca del tema ya que la información disponible del tema es muy poca.

Marder et al., (2020), se dieron a la tarea de reunir información experimental detallada de 11 especímenes y aportó información de otros tres. Además, se encontró información de los experimentos de Araki e Izaki, (2012) contribuyendo tres especímenes más a la base de datos.

Sin embargo, 17 especímenes a lo largo de más de 50 años son muy pocos en comparación con la experimentación de otras técnicas de rehabilitación. Esto se debe principalmente a que la inyección de resinas epoxi es un método utilizado previo a la aplicación de otras técnicas de rehabilitación dejando su aportación como un factor de seguridad. Se sabe que la técnica funciona, pero no se considera estructuralmente su aporte de recuperación, en la rehabilitación de edificios.

Se espera que con la tendencia de estructuras más rígidas y resistentes y diseños capaces de soportar cargas sísmicas que permitan un daño leve o moderado, la inyección de resina epoxi sea la única técnica de rehabilitación que se utilice volviendo las estructuras más resilientes.

Se pretende que en un futuro se incentive más la investigación acerca del tema de inyección de resinas epoxi a diferentes niveles de daño y poder construir una base de datos sólida que respalde los factores de recuperación a considerar.

4.7. CONCLUSIONES

De la información descrita en los artículos anteriores y la base de datos proporcionada por Marder et al., (2020) se observan las siguientes conclusiones:

- a) La inyección de resina epoxi ha mostrado ser un método confiable para la reparación de grietas en elementos estructurales de concreto.
- b) El método de inyección a presión es más confiable que el método de inyección a vacío para ser aplicado en construcción de forma rutinaria en daños leves y moderados sin desprendimientos considerables.
- c) Se concluye que la recuperación estructural queda de la siguiente manera:
 - Recuperación de la resistencia entre 80% y 100%
 - Recuperación de la rigidez entre 70% y 90%
 - Recuperación de la ductilidad entre 70% y 90%
- d) La inyección de resina epoxi ayuda a la recuperación de la capacidad de deformación y disipación de energía de forma similar con la que contaban antes del daño.
- e) Este procedimiento ha probado ser tan eficaz que, después de la reparación los elementos presentan grietas nuevas paralelas a las inyectadas o desplazadas, pero nunca en el mismo sitio.
- f) Además, la inyección de resina epoxi ha mostrado mejorar la adherencia entre en concreto y el acero en columnas de concreto de baja resistencia.
- g) Es necesario realizar más experimentación con respecto al tema para lograr formar una base de datos experimental que nos permita decidir de forma precisa los niveles de recuperación a considerar en una rehabilitación estructural.

CAPÍTULO 5

APLICACIÓN DE LA INYECCIÓN DE RESINAS EPOXI COMO TÉCNICA DE REHABILITACIÓN EN LA CIUDAD DE MÉXICO

5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se discutirá la aplicación de resinas epoxi en México, principalmente en la Ciudad de México después del sismo de 2017. Se comentarán los hallazgos durante las visitas de campo realizadas por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Se explicará cómo la inyección de resinas epoxi se ha aplicado en algunos inmuebles reparados en la Ciudad de México y en columnas de la Línea 12 del Sistema de Transporte Colectivo Metro.

También se muestran las principales variantes encontradas en campo para la aplicación de la inyección de resinas epoxi, así como la estadística de uso en los inmuebles afectados de la Ciudad de México y la comparación de su aplicación con otras técnicas. Finalmente se ofrecen conclusiones sobre los errores y aciertos que se han identificado en la implantación de esta técnica en campo.

5.2. REHABILITACIÓN DE EDIFICIOS EN LA CDMX

De acuerdo con el informe *Evaluación de edificios de concreto rehabilitados sísmicamente tras el sismo de 2017 en la Ciudad de México* elaborado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM en colaboración con la Universidad de Texas en Austin, como parte de las tareas del proyecto ConTex, (Alcocer y Murcia, 2020), se documentaron las técnicas de rehabilitación en edificios de concreto y mampostería mediante un inventario y base de datos con la información básica de los edificios, sus condiciones originales, del daño, así como de su rehabilitación.

Este proyecto estuvo dirigido a recopilar información sobre la rehabilitación de los edificios (diseño, construcción e inspección) para la evaluación estructural en futuros sismos, además de identificar, en campo, las diferencias en la implantación de las técnicas de rehabilitación y los criterios de diseño utilizados.

Para el desarrollo del informe se contó con el apoyo del Gobierno de la Ciudad de México mediante el Instituto para la Seguridad de las Construcciones en la Ciudad de México (ISC-CDMX). Con este apoyo, se tuvo acceso a expedientes de los proyectos de rehabilitación. El ISC-CDMX estimó, en marzo de 2020, que se rehabilitarían alrededor de 270 edificios para los cuales ya se habían aprobado 230 constancias.

Las técnicas de rehabilitación de edificios empleadas en la Ciudad de México después del sismo del 19 de septiembre de 2017 se mencionan a continuación con una breve descripción de cada una de ellas.

- *Reparación de muros de mampostería.* Está técnica de rehabilitación consiste en la reparación de las grietas producidas por el sismo en la mampostería. La forma de reparación depende del nivel de daño que haya tenido. Para daños ligeros basta con la restitución del aplanado, mientras que para daños moderados y graves puede ser necesario un rajuelado o colocación de malla recubierta con mortero.
- *Reparación local de elementos de concreto dañados.* Está técnica consiste en la reparación de grietas menores de 3 mm en elementos de concreto, la reparación del concreto desconchado y la reparación de elementos con el acero de refuerzo expuesto.
- *Recimentación.* Se aplicó a edificios que sufrieron daños moderados o severos en elementos estructurales, inclinaciones superiores a las establecidas en el reglamento de construcción y sus normas y en edificios con nuevas cargas debidas a la rehabilitación estructural. La técnica consistió en la rehabilitación de los elementos de cimentación, la adición de pilotes y la subexcavación, dependiendo del caso.
- *Inyección de grietas.* Fue empleada para reparar las grietas presentadas en elementos estructurales de concreto debido a las acciones sísmicas y, en algunos casos, la reparación de las grietas de muros de mampostería. Consiste en la inyección de resinas epoxi y/o morteros epóxicos en las grietas para restituir las propiedades con las que contaba el elemento antes del sismo.
- *Encamisados de vigas, columnas y nudos con concreto reforzado.* Consiste en aumentar la sección transversal de elementos estructurales de concreto con una nueva capa de concreto reforzado ya sea de forma total o parcial. Tiene como objetivo incrementar la capacidad estructural del edificio de forma local o global, según el diseño. Este tipo de encamisado se utiliza para incrementar la resistencia a flexión, flexocompresión, cortante y a carga axial (por confinamiento), así como la capacidad de deformación.
- *Encamisados de vigas, columnas y nudos con acero.* Esta técnica consiste en el recubrimiento de elementos estructurales de concreto con piezas de acero que pueden ser placas de acero en toda la superficie del elemento o ángulos de acero en las esquinas del elemento unidos entre sí por soleras. La técnica considera al elemento como una sección compuesta por lo que se debe garantizar la transmisión de cargas entre el concreto y el acero.

- *Encamisados de vigas , columnas o nudos con compuestos de polímeros reforzados con fibras (CPRF).* Este tipo de encamisado consiste en el recubrimiento del elemento estructural con capas de fibra que se adhieren por medio del uso de resinas epoxi. Dichas fibras trabajan de forma unidireccional; por esta razón, su orientación depende de la característica que se desea mejorar. Su aplicación puede ser en todas las caras de un elemento o sólo en algunas. Del mismo modo, las fibras pueden cubrir toda el área de una cara o solo una parte de ella.

- *Encamisados de muros de mampostería.* La técnica consiste en el aumento de la sección transversal del muro mediante la colocación de mallas de alambre soldado, capas de CPRF o barras corrugadas de acero cubiertas con algunos centímetros de mortero de cemento o concreto colado in situ o lanzado. Este tipo de encamisados pueden ser total o parciales, es decir, en el primero el muro se cubre de ambas caras, mientras que en el otro sólo una de ellas. Es importante saber que para la implantación de esta técnica el muro tuvo que ser reparado anteriormente.

- *Adición de muros de concreto.* Consiste en la colocación de nuevos muros de concreto para aumentar la rigidez y resistencia laterales de la estructura existente. Puesto que los muros de concreto se añaden a una estructura que resiste cargas gravitacionales, éstos tienden a soportar sólo su peso. La mayoría de ocasiones se acompaña de una recimentación.

- *Adición de contraventeos de acero.* Consiste en la colocación de perfiles de acero dentro del plano de acción de la estructura. Se clasifican según su geometría como contraventeos X, K, V y V invertida. Los edificios que se rehabilitaron mediante esta técnica fueron edificios cuyo comportamiento estaba controlado por fuerzas cortantes y edificios de marcos resistentes a momento con insuficiente resistencia y/o rigidez laterales.

- *Adición de muros diafragma de mampostería.* Consiste en la construcción de muros de mampostería abarcando la totalidad de las direcciones vertical y horizontal. Estos muros pueden ser de mampostería reforzada o no reforzada y deben estar confinados con castillos y dadas de concreto reforzado que se conectan con el concreto de las columnas y vigas o del sistema de piso por medio de conectores de acero y se fijan con resina epoxi.

- *Adición de vigas y marcos.* La adición de vigas consiste en la colocación de vigas de concreto o perfiles de acero entre dos columnas. Se utilizan para aumentar la rigidez de los edificios rehabilitados con esta técnica. En cuanto a la adición de marcos, consiste

en la construcción de marcos de concreto adicionales a la estructura con el mismo fin que la adición de vigas.

Estas técnicas fueron empleadas en la mayoría de los edificios inspeccionados por el equipo de investigación del Instituto de Ingeniería. Se observó que la rehabilitación de edificios en su mayoría consistió de una combinación de dos o más técnicas.

Gracias a las visitas de campo y revisión de los expedientes proporcionados por el ISC-CDMX se pudo desarrollar la base de datos formada a partir de la transcripción de información y obtener así una estadística del uso de cada técnica, la implantación en combinación entre ellas y finalmente su aplicación en campo con todas las variantes encontradas.

5.3. SITUACIÓN DE LOS EDIFICIOS EN REHABILITACIÓN EN LA CIUDAD DE MÉXICO DESPUÉS DEL SISMO DE 2017

De acuerdo con Alcocer y Murcia (2020), se revisaron 208 edificaciones rehabilitadas en la Ciudad de México de los cuales 89% eran de uso habitacional y 98% de éstos eran multifamiliares. El resto de edificios corresponde a edificaciones de uso de oficinas o comercial.

Con la información obtenida por los dictámenes de seguridad estructural de diversas edificaciones que presentaron daño, el ISC-CMX elaboró una clasificación del nivel de daño para las edificaciones. Se establecieron cuatro categorías para su clasificación: ligero, moderado, grave y sin información (S/I). Como resultado de la clasificación en la Figura 57a se muestra el porcentaje de daño asociado a cada una de las edificaciones.

Por otro parte, el equipo de trabajo del Instituto de Ingeniería elaboró una clasificación del daño en las edificaciones con el objetivo de corroborar la información contenida en los dictámenes. En la Figura 57b se muestra los resultados de la clasificación hecha por el II-UNAM. Como se observa se redujo sin información de 38% a 28% y se clasificación más edificios en daño moderado.

Finalmente, y como resultado del análisis y revisión de los expedientes se lograron identificar 20 distintas técnicas que fueron empleadas. En la Figura 58 se muestra la frecuencia con la que se emplearon cada una de las técnicas utilizadas. En 99% de los edificios rehabilitados se utilizó más de una técnica y en solo tres edificios se utilizó una sola técnica (reparación de grietas, nivelación y adición de muros de concreto, respectivamente).

Es importante aclarar que, de los 208 edificios contenidos en la base de datos, 206 fueron rehabilitados mientras que dos terminaron por ser demolidos. Las técnicas se clasificaron en tres categorías: reparación, reforzamiento y reestructuración. Los resultados mostraron que

1% de los edificios se reparó, 7% se rehabilitó y 2% se reestructuró, mientras que 90% consistió en una combinación de ellas.

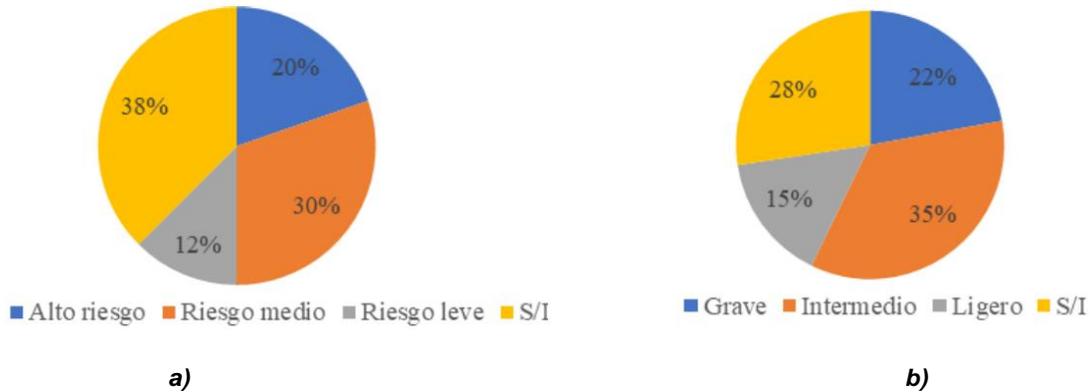


Figura 57 Clasificación de daño a) Dicatamenes estructurales ISC-CDMX b) Magnitud de daño general II-UNAM (Alcocer y Murcia, 2020)

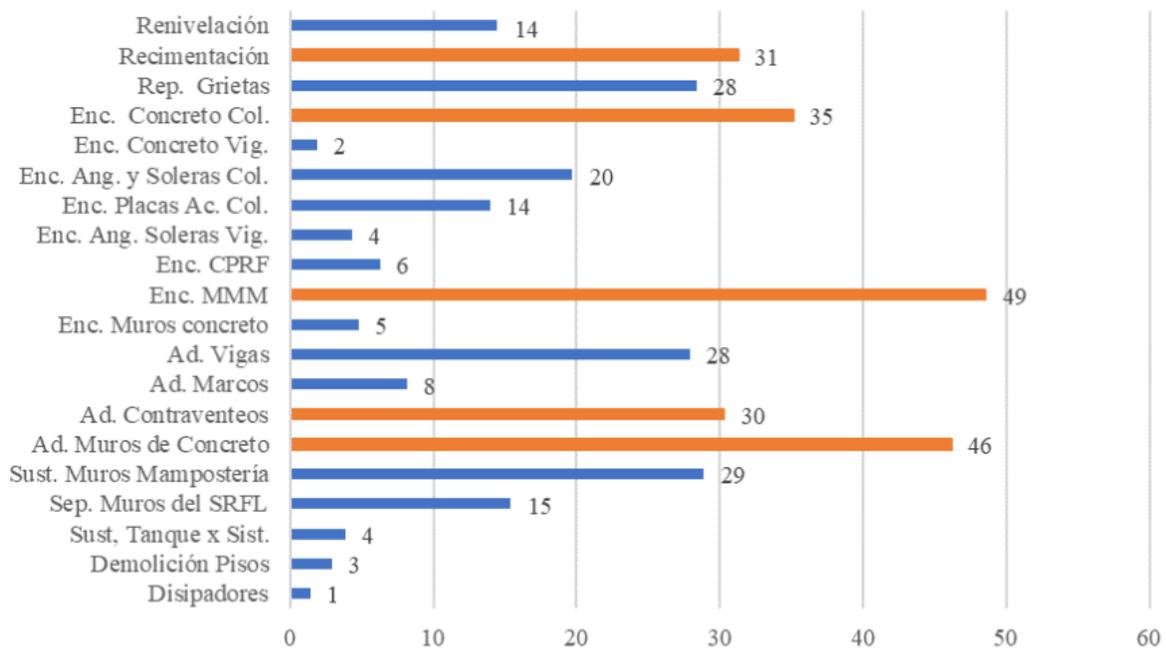


Figura 58 Uso de las técnicas de rehabilitación en la CDMX después del sismo de 2017(%) (Alcocer y Murcia, 2020)

5.4. USO DE LA INYECCIÓN DE RESINA EPOXI EN LA CDMX

De la Figura 58 se destaca que, del total de edificaciones intervenidas, en 28% de los edificios, las grietas en los elementos estructurales fueron reparadas. De ese porcentaje, 42% de las reparaciones fueron realizadas mediante la inyección de resina epoxi en grietas no mayores que 5 mm, 25% se repararon con mortero a base de cemento en grietas con espesor entre 5 y 20 mm mientras que 7% fue reparado mediante un ranurado y relleno con rajuela y mortero en muros con espesores de grietas mayores de 20 mm.

Se observó que la reparación de grietas fue una técnica empleada generalmente en conjunto con otras técnicas para la reparación de todo tipo de elementos estructurales. Tal es el caso de muros de mampostería donde en 50% se llevó a cabo una reparación de grietas, 27% en el caso de columnas y castillos y 10% en viga (Figura 59 y Figura 60).

De acuerdo con lo observado en la revisión de los informes facilitados por el ISC-CDMX, la inyección de resina epoxi se utilizó principalmente en edificios de daño ligero y moderado. Para el caso de agrietamientos de daño severo se optó por la reparación con morteros de alta resistencia o morteros cemento.

La implantación de la inyección de resina epoxi fue descrita por los diseñadores como un paso previo a la rehabilitación de los edificios con otras técnicas. No se tomaba en cuenta la restitución de las propiedades, se mencionaba que, si ésta cumplía con ello, quedaba como un factor de seguridad adicional.



Figura 59 Reparación de grietas en columnas (Abarca, 2020)



Figura 60 Reparación de grietas en vigas (Abarca, 2020)

En la mayoría de los casos revisados, en los cuales se señalaba la reparación de grietas mediante el procedimiento de inyección de resinas epoxi, no se especificó un procedimiento constructivo, ni se establecieron las características de los materiales, tiempos de vida y modo de aplicación, entre otras características importantes para el procedimiento.

En estos casos se concluye que se deja al constructor la definición de estos requisitos, lo que obliga, en el mejor de los casos, a que sean apoyados por una compañía subcontratada para realizar el trabajo y definir los parámetros. Esto abrió la posibilidad de llevar a cabo el procedimiento de diferentes maneras.

De los edificios visitados y los expedientes revisados se registró que frecuentemente la inyección de resinas epoxi se llevó a cabo en vigas y columnas con grietas no mayores que 5 mm. En algunos casos se observó que no se le dio la importancia necesaria a la limpieza de las grietas y la eliminación de partículas de polvo; en otros casos, el sello era excesivo y se encontraba mal aplicado debido a la aplicación de diferentes materiales utilizados como selladores. Se destaca que la mayoría de los constructores optó por la inyección mediante bombas a presión y la aplicación del sello mediante pistolas manuales.

Es importante mencionar que en contados casos se especificó la realización de pruebas de ultrasonido como forma de corroborar que la inyección se haya realizado de forma adecuada. Tampoco se hace mención de las acciones a llevar a cabo en caso de algún tipo de incidente al momento de realizar la inyección como fugas, rompimiento del sello, endurecimiento de la resina antes del tiempo previsto o inyección de una resina sin catalizador. Menos aún se mencionan los cuidados que se deben tener al momento de inyectar grietas que presenten humedad, ni la forma correcta de realizar el procedimiento de inyección.

En general, la mayoría de los informes no menciona cómo se llevó a cabo el procedimiento de inyección. Se desconoce la forma de inyección, las propiedades de los materiales, el

tiempo de aplicación e inyección, las condiciones ambientales, el tipo de sellado, si existió curado o si se realizaron las pruebas de ultrasonido correspondientes que garantizan un buen procedimiento de inyección.

5.4.1. Inyección de resina epoxi en columnas del Metro de la Ciudad de México

Como parte del esfuerzo de documentación de los trabajos de inyección de resinas epoxi se visitó el sitio de rehabilitación de columnas de la Línea 12 del Sistema de Transporte Colectivo Metro. Se visitó el tramo ubicado entre las estaciones Periférico Oriente y Calle 11 en los primeros días de diciembre de 2021.

Se observó que el procedimiento de inyección se llevó a cabo mediante una bomba a presión con pistones, la cual contaba con dos compartimentos para la resina y el endurecedor (Figura 61).



Figura 61 Bomba de inyección mediante pistones utilizada en la L12 del Metro de la CDMX (Abarca, 2021)

El tipo de grietas a inyectar eran generalmente grietas superficiales con espesores de entre 0.3 mm hasta 3 mm. El procedimiento consistió en la identificación de las grietas, la medición de su espesor y su longitud, y en el retiro del recubrimiento por medio de un esmeril. Una vez expuesta la grieta, se limpiaba por medio de un compresor de aire hasta quedar totalmente limpia (Véase Figura 62).



Figura 62 Identificación y limpieza de las grietas en columnas de la L12 del Metro de la CDMX (Abarca, 2021)

Ya que la grieta se encontraba limpia, se colocaban las boquillas. Estas eran hechas con tubos de aluminio de 10 cm de largo que se conectaban a la manguera de la bomba por medio de un adaptador. La colocación de las boquillas consistía en realizar una perforación con un taladro con una separación de 30 mm entre boquilla aproximadamente. Finalmente, las grietas se sellaron con un mortero epóxico preparado directamente en la obra con una proporción 1:1 de resina y endurecedor.



Figura 63 Preparación y colocación del sello en columnas de la L12 del Metro de la CDMX (Abarca, 2021)

Una vez colocadas las boquillas y el sellado se esperaban un tiempo de 24 h para comenzar con el procedimiento de inyección. La bomba se encargaba de mezclar la resina con el agente endurecedor por medio de un serpentín como el que se muestra en la Figura 64. Este serpentín se conectaba a la manguera de inyección hasta la boquilla previamente instalada en la grieta.



Figura 64 Mezclador de resina y endurecedor, serpentín. (Abarca, 2021)

La inyección de resina epoxi se realizó comenzando en la boquilla que se encontraba al nivel más bajo hasta que la resina emergiera por la boquilla inmediata superior. Al momento de la inyección se pudo detectar que existían fugas en el sello por lo que los técnicos procedían a realizar un sellado de emergencia con una masilla epoxi impidiendo el desperdicio de resina o la fuga excesiva de la misma (véase Figura 65).

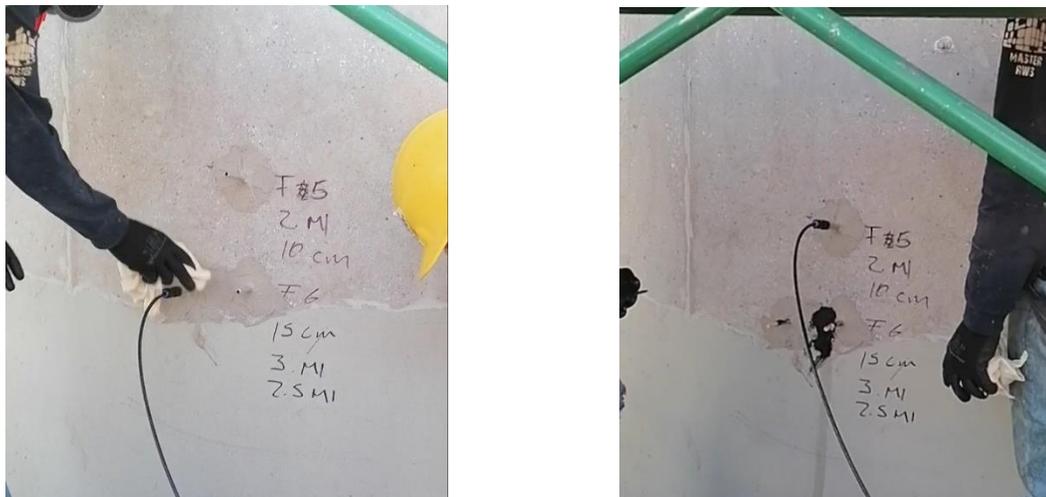


Figura 65 Procedimiento de inyección en columnas de la L12 del Metro de la CDMX (Abarca, 2021)

La inyección se realizó con una presión 2.81 kg/cm^2 (40 psi o 0.28 MPa) y se detenía en el momento en el cual el operador se percataba que la grieta rechazaba la resina. En ese momento se consideraba que la inyección había penetrado incluso las microgrietas que se presentaban en algunas columnas.

Una vez concluido el procedimiento de inyección, se sellaban las boquillas con un tapón de madera y masilla epoxi. Se dejaba fraguar la resina 24 h antes de retirar las boquillas y el sello con un esmeril y discos de desbaste y corte.

En este proyecto se observó la experiencia de los constructores, ya que se les prestaba atención a todos los pasos del procedimiento de inyección, desde la limpieza hasta las fugas. Además, se tomaban muestras de forma periódica para analizarlas en laboratorio y cerciorarse de que la resina fuera de calidad y contara con las propiedades especificadas.

Además, se mencionó que la empresa a cargo realizaba pruebas de ultrasonido para verificar la calidad de la inyección, una vez que la inyección había endurecido aproximadamente a los siete días. Se comentó que este procedimiento se realizaba a las columnas al azar y eran elegidas una de cada tres. Si estas no tenían ningún tipo de problemas se suponía que la inyección de las demás también fue adecuada.

En general, el procedimiento de inyección se llevó de manera adecuada, se cumplió con las especificaciones que se presentan en esta tesis y dado que eran muchas columnas por revisar e inyectar, llevaban un buen ritmo de inyecciones sin descuidar el procedimiento para cada grieta.

5.5. VARIANTES ENCONTRADAS EN LA APLICACIÓN DE LA INYECCIÓN DE RESINA EPOXICA EN LA CIUDAD DE MÉXICO.

Los procedimientos de inyección que se observaron en campo presentan algunas diferencias con lo establecido en la Guía técnica (Alcocer y Murià, 2020). Se identificaron diferencias en los procedimientos de inyección, en particular en la forma de inyección de las grietas, en el tipo de boquillas utilizadas, el material utilizado en el sellado, entre otras. Es importante mencionar que no se ejecutaron pruebas de ultrasonido en la mayoría de las inyecciones de resina epoxi para garantizar el procedimiento.

A continuación, se describen las principales variantes encontradas en campo:

- *Método de inyección*

La inyección de resina epoxi se realizó en todos los casos por el método a presión. Sin embargo, donde se encontraron las diferencias fue en la forma de llevar a cabo el

procedimiento de inyección. Por ejemplo, en el caso de la L12 del Metro de la CDMX se realizó el procedimiento de la manera descrita en el Capítulo 3, comenzado de la boquilla con el nivel más bajo y subiendo a la inmediata superior hasta terminar con toda la longitud de la grieta. En otros casos se observó que los constructores preferían realizar una perforación con un taladro en la zona central de la grieta y comenzar en ese punto la inyección, partiendo de la base que la resina comenzará a moverse del centro a los extremos hasta llenar totalmente la grieta.

También se observó que en algunos casos la inyección de resina epoxi en grietas verticales y diagonales se realizaba de arriba hacia abajo argumentando que la gravedad ayuda a una mejor penetración de la resina, lo cual no fue comprobado.

Otra forma de realizar el procedimiento consistía en realizar la perforación en donde irían las boquillas de forma diagonal a la superficie argumentando que este espacio extra ayuda a la resina a tener una mejor penetración y flujo a través de las grietas.

- *Bombas de inyección*

En las distintas obras visitadas se pudo observar que existe una gran cantidad de bombas para poder llevar a cabo el procedimiento de inyección. Como se mencionó anteriormente, existen bombas que funcionan por medio de un pistón que es el que ejerce la presión en la resina. Además, este tipo de bombas pueden realizar el mezclado de la resina y el catalizador por su propia cuenta; el operador sólo agregara los componentes y se cerciorará de que fluyan correctamente.

Otro tipo de bombas, son aquéllas que sólo inyectan la resina epoxi a la presión que se les indique. La resina tiene que ser mezclada y suministrada por el operador antes de cualquier procedimiento.

Finalmente, también se ha visto que existen distintas pistolas de inyección de resina que funcionan inyectando la resina a bajas presiones. Generalmente son utilizadas en grietas superficiales y el subministro de resina se realiza de forma manual al igual que en el caso anterior.



Figura 66 Diferentes bombas de inyección (Chile, 1996)

- *Tipos de boquillas*

Se identificó que las boquillas convencionales para inyección de resinas epoxi eran de metal de 13 mm de diámetro y 80 mm de largo. Estas boquillas cuentan con una zona de fijación y una zona de acoplamiento a la manguera de inyección (Figura 67).

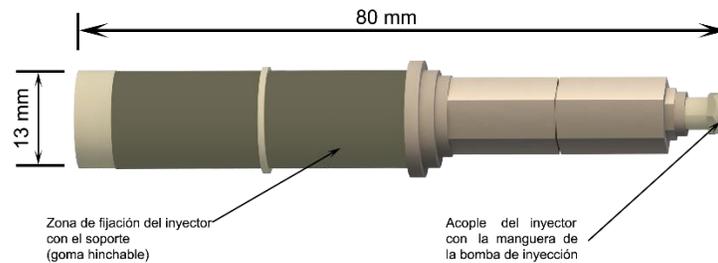


Figura 67 Boquilla convencional para inyección de resinas epoxi (Alcocer y Muriá, 2020)

En otros casos se registraron boquillas hechas de tubos plásticos o de aluminio de 10 mm de diámetro en los cuales se insertaba un adaptador para la manguera de inyección o directamente la manguera de inyección.

Otro tipo de boquillas que se observaron mucho en campo eran boquillas plásticas con base de 10 mm de diámetro. La base servía para una mejor fijación de sellado con la boquilla y en algunos casos se omitía la perforación al momento de su colocación (véase la Figura 68).



Figura 68 Diferentes tipos de boquillas (Abarca, 2021)

- *Tipo de resina*

Normalmente se utilizaban resinas y morteros epóxicos comerciales de conocidas marcas como Hilti y Sika. Se pueden observar las fichas técnicas de las resinas más utilizadas en los Anexos B y C.

La resina epoxi más utilizada en el procedimiento de inyección de la marca Sika es Sikadur 52, la cual tiene una viscosidad de 1.2 Pa•s, una resistencia a la compresión de 530 kg/cm², una resistencia a la tensión de 375 kg/cm², una resistencia a la flexión de 610 kg/cm² y un coeficiente de expansión térmica de 8.5×10^{-5} por °C, la temperatura de uso se encuentra entre 20 y 40°C (293 K y 313K) (Sika, 2014).

Por otra parte, de la marca Hilti, la resina epoxi más utilizada es HIT-RE 500 V3. Esta resina cuenta con una viscosidad de 1 Pa•s, una resistencia a la compresión de 830 kg/cm², una resistencia a la tensión de 490 kg/cm² y un esfuerzo de adherencia de 120 kg/cm² (Hilti, 2019).

- *Sellador de grietas*

Las recomendaciones generales para realizar el sellado de las grietas mencionan que se debe utilizar el mismo tipo de resina que se utilizará en la inyección. Sin embargo, en el campo se observó que la mayoría de los procedimientos de inyección utilizó morteros epóxicos o morteros de cemento. Incluso 5% del total utilizó cintas plásticas y selladores a base de silicón, como la que se utiliza para el sellado de cancelerías. Este tipo de selladores sólo pueden ser utilizados en inyecciones a bajas presiones; en otros casos se recomienda el sellado con una resina o mortero epoxi.



Figura 69 Ilustración de un mortero de tipo epóxico

5.5.1. Errores más comunes en el procedimiento de inyección

De acuerdo con las visitas de campo y la revisión de los informes, se identificaron los errores más comunes al momento de implantar el procedimiento de inyección de resinas epoxi. Estos errores se mencionan a continuación:

Errores más comunes en la etapa previa a la inyección.

- No considerar si la grieta estaba húmeda.
- No cuidar la limpieza de las grietas.
- Fijar de manera inadecuada las boquillas.
- Realizar un perfilado de grietas inadecuado que genera microgrietas.
- Realizar un sellado no uniforme, dejando oquedades.
- No contar con materiales de calidad.

Errores más comunes en la etapa de inyección.

- No esperar el tiempo mínimo de 24 h de secado del sello antes de comenzar el procedimiento de inyección.
- No realizar el correcto mezclado de la resina epoxi con el endurecedor.
- Realizar la inyección con la presión inadecuada.
- No contar con un plan de respaldo en caso de fugas o rompimiento del sello.
- No llevar a cabo la correcta forma de inyección (descrita en el Capítulo 3).
- No detener el procedimiento de inyección si se detectó una fuga grave.
- No cerciorarse que la resina penetró completamente las grietas.

Errores más comunes en la etapa post-inyección.

- No esperar el tiempo mínimo de 24 h de endurecimiento de la resina antes del retiro del sello.
- No realizar pruebas de calidad a la resina y al sello.

- No realizar pruebas UPV, IE o de espectro de señales para garantizar el procedimiento de inyección.
- Retirar el sello mediante calor dañando la resina inyectada.

5.6. ELABORACIÓN DE UN VIDEO EXPLICATIVO DE LA TÉCNICA DE REPARACIÓN

De la investigación realizada acerca de las técnicas de rehabilitación, el equipo de trabajo del Instituto de Ingeniería de la UNAM, elaboró, el documento, “Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México. Guía Técnica.” (INIFED, 2020). En esta guía se describen las diferentes técnicas de rehabilitación, entre las cuales se encuentra la inyección de grietas mediante resinas epoxi. La publicación de esta guía se realizó después de la rehabilitación de los edificios estudiados por el equipo del Instituto de Ingeniería.

Con objeto de contribuir a una mayor comprensión de las técnicas de rehabilitación más comunes, se realizaron una serie de videos explicativos, entre las cuales se encuentra la inyección de resinas epoxi. El autor participó en la elaboración del video titulado “Reparación de grietas mediante la inyección de resinas epoxi”.

El video está dirigido a ingenieros civiles, arquitectos, supervisores, diseñadores y a todos aquellos profesionales que se desarrollan en la construcción, principalmente en la rehabilitación de estructuras, después de sismos o inundaciones.

El video comienza con una breve introducción, donde se explica que el objetivo es profundizar en el conocimiento de las técnicas de rehabilitación, se presenta en lo general la deficiencia estructural que se puede corregir con su uso, se describe en que consiste la técnica, los modos de comportamiento y falla de los elementos reparados, así como sus variantes, y aspectos fundamentales de su implantación y supervisión.

Una vez terminada la introducción, el video comienza con la descripción de la técnica de reparación de grietas en elementos de concreto mediante la inyección de resinas epoxi, se menciona la finalidad de la técnica, los alcances que puede tener y los elementos en los que se puede implantar.

Después, se describen todas las actividades que se deben realizar durante las tres etapas del procedimiento: acciones previas a la inyección, el procedimiento de inyección y las acciones post-inyección. Se mencionan el tipo de grietas que pueden ser inyectadas con resina epoxi y las recomendaciones que se dan en la Guía técnica (INIFED, 2020).

Se menciona el porcentaje de recuperación que tuvieron algunos elementos de concreto encontrados en la documentación experimental en cuanto a la resistencia, la rigidez y la

ductilidad, además de los parámetros de diseño a considerar de acuerdo a la Guía técnica (INIFED, 2020).

Posterior a esto, se mencionan las principales variantes encontradas en campo, dentro de las cuales se encuentra el método de inyección, el tipo de boquillas, la formulación de la resina, entre otras. Terminando las variantes se hacen algunas recomendaciones a tener en cuenta al momento de implantar el método como tener cuidado de limpiar correctamente las grietas, cerciorarse que estas no este húmedas, por mencionar algunas.

Para concluir, se menciona el comportamiento que tiene un elemento inyectado, se recalca que los elementos inyectados normalmente fallan en la zona del concreto y no en la grietas reparadas. Se explican las formas en las que los elementos inyectados pueden presentar grietas nuevas.

El video se encuentra en la página del proyecto de Resiliencia Sísmica y se puede acceder en los siguientes enlaces:

- www.resilienciasismica.unam.mx. (véase Figura 70)
- <https://www.youtube.com/watch?v=JqfzYtdEP-s&feature=youtu.be>



Figura 70 Video "Reparación de grietas mediante la inyección de resina epoxi"

5.7. CONCLUSIONES

De acuerdo con lo observado en campo y las revisiones realizadas a los distintos edificios rehabilitados mediante la inyección de resina epoxi se puede concluir lo siguiente:

- a) La reparación de grietas mediante la inyección de resinas epoxi a presión no es muy popular entre las técnicas de rehabilitación utilizadas en la rehabilitación de edificios de la CDMX.
- b) Sólo en 28% de los proyectos de rehabilitación se indicaba una reparación de grietas en elementos estructurales. De ese porcentaje, sólo 42% se especificó mediante la inyección de resinas epoxi.
- c) Una de las razones por las que se cree que no existió un criterio estricto al momento de realizar el procedimiento de inyección es debido que la mayoría de edificios utilizó otras técnicas de rehabilitación. Los diseñadores desconocen la aportación que tiene la inyección de resina epoxi en cuanto a su resistencia, rigidez y ductilidad.
- d) No se consideró el aporte de recuperación que se puede lograr con el procedimiento de inyección de resinas epoxi.
- e) En 99% de los casos, el procedimiento de inyección fue acompañado por otras técnicas, principalmente encamisados de concreto, de acero o de fibras de carbono.
- f) Se concluye que muchos de los proyectos no especificaron la reparación de grietas mediante el procedimiento de inyección por falta de información acerca del procedimiento y el aporte estructural que puede alcanzar.
- g) La mayoría de los proyectos estructurales de rehabilitación en los que usó la inyección de resina epoxi, no se especificó la metodología para llevarla a cabo. Esto obligó a los constructores a realizar el procedimiento de inyección como ellos conocen o a contratar empresas externas especializadas (talvez) para realizar el trabajo, pero sin especificaciones.
- h) No existe una norma mexicana que regule el procedimiento de inyección, por lo que cada constructor puede hacer o dejar de hacer procedimientos importantes, como la verificación de la inyección por medios de ultrasonido.

- i) Se encontraron diferencias en el procedimiento constructivo, tipos de boquillas, formas de sellado, materiales utilizados y procedimiento a seguir que pueden afectar la calidad de la inyección.
- j) En la mayoría de los casos no se toman muestras de la resina inyectada para su análisis en laboratorio y garantizar la calidad de los materiales.
- k) Entre los errores más comunes se encuentra: una mala limpieza de las grietas, un sellado no uniforme y con materiales de baja calidad, no contar con acciones de respaldo en caso de fugas y una mala forma de inyección.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones a seguir luego de la presentación de la técnica de rehabilitación de estructuras de concreto mediante la inyección de resinas epoxi.

6.2. INYECCIÓN DE RESINA EPOXI COMO TÉCNICA DE REHABILITACIÓN

La resina epoxi es un material que ha tenido un desarrollo muy rápido en cuanto aplicaciones dentro del campo de la construcción, lo que ha permitido la aplicación del método de inyección como técnica de rehabilitación. Se han aprovechado sus propiedades físicas y químicas al momento de reparar grietas, gracias a las distintas formulaciones que se pueden generar.

El uso de las resinas como adhesivo entre distintos materiales ha mostrado tener resultados satisfactorios principalmente uniendo acero con concreto, concreto endurecido con concreto fresco y, por supuesto, entre concretos endurecidos. Estas propiedades son alcanzables utilizando siempre materiales normalizados como los establecidos en las normas ASTM.

Gracias a estas propiedades se ha podido utilizar la resina para la reparación de grietas en elementos estructurales a través del método de inyección. Esta técnica pretende restituir las propiedades con las que contaba el elemento agrietado. Las propiedades que se logran restituir son la resistencia, la rigidez, la ductilidad (o capacidad de deformación) y la capacidad de disipación de energía.

Las grietas se pueden inyectar si tienen un espesor de 0.02 mm hasta los 5 mm. Es indispensable saber las causas que originaron la grieta para poder definir un método de reparación adecuado. El estándar ASTM C188 brinda una clasificación adecuada para la elección de las propiedades de la resina epoxi a utilizar en un procedimiento de inyección.

En el mercado existe un gran número de resinas epoxi estándar que se diseñaron para el procedimiento de inyección. Si bien lo conveniente sería tener una formulación personalizada para cada caso, los fabricantes optaron por poner a la venta formulaciones que podrían servir para la mayoría de los casos a inyectar.

Actualmente se conocen dos métodos de inyección utilizados y probados en laboratorio: el método de inyección a presión, que es el que se detalla en estas tesis, y el método de impregnación mediante vacío. Se recomienda el uso del método de inyección a presión sobre el de vacío por la facilidad de aplicación en campo y los buenos resultados que ha mostrado.

En esta tesis se identificaron tres etapas fundamentales en la aplicación del método de inyección a presión: las acciones previas a la inyección, el procedimiento de inyección y las actividades post inyección. Para cada una de ellas se señalan las mejores prácticas a seguir para lograr resultados óptimos.

Durante el procedimiento de inyección se identificarán las acciones que se han de tomar en cuenta porque influyen de manera directa para que la inyección sea considerada exitosa y cumpla con la restitución de propiedades esperada. Estas actividades son: la limpieza de las grietas, la consideración de la humedad en caso de existir, la colocación correcta de las boquillas y el sellado, la correcta forma de inyección, la consideración del tiempo de inyección y de secado y, finalmente, la confirmación del procedimiento mediante pruebas no destructivas, como es la prueba de ultrasonido.

6.3. DOCUMENTACIÓN EXPERIMENTAL DE LA INYECCIÓN DE RESINA EPOXICA

Como se señaló en el Capítulo 4, no hay un gran número de estudios acerca del procedimiento de inyección de resinas epoxi en comparación con otras técnicas de rehabilitación. Se destaca que existen una pequeña base de datos de 17 especímenes probados por diferentes autores, mientras que para otras técnicas, como encamisados de concreto y acero en columnas y vigas, se puede encontrar estudios de más de 100 especímenes probados por diferentes autores.

Si bien la mayoría de los estudios concluye que el procedimiento de inyección de resinas epoxi es capaz de restituir las propiedades de resistencia entre 80% a 100%, de rigidez entre 70% y 90% y ductilidad entre 70% y 90%, se considera que la técnica ha sido probada muy poco, sin contar sus variantes en cuanto al método de impregnación por vacío o probando las diferentes variantes de inyección a presión (tipos de boquillas, formulaciones, formas de inyección, entre otras).

Este procedimiento ha probado ser muy eficiente si se realiza de manera adecuada siguiendo los pasos y recomendaciones establecidos en diversos manuales, como el ACI. Por lo que se considera de importancia que se retome el tema experimental con la finalidad de contar con especificaciones cada vez más robustas que permitan conocer los niveles de recuperación de manera más precisa.

Esto será útil en un futuro considerando la tendencia de diseño de edificaciones cada vez más resilientes que en caso de algún sismo importante se pueda recuperar su funcionalidad con

una sola técnica de rehabilitación: la inyección de grietas con resinas epoxi de elementos estructurales de concreto.

6.4. APLICACIÓN DE LA INYECCIÓN DE RESINA EPOXICA EN MÉXICO

La inyección de resinas epoxi es una técnica de rehabilitación poco utilizada y aparentemente poco valorada en México a pesar de que ha mostrado ser eficaz para restituir las propiedades de resistencia, rigidez, ductilidad y disipación de energía de los elementos de concreto.

De la revisión de proyectos de rehabilitación facilitados por el ISC-CDMX al equipo de trabajo del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se observó que sólo en 28% de los proyectos de rehabilitación se indicó la reparación de las grietas antes de la aplicación de cualquier otro método de rehabilitación y, de ese porcentaje, sólo 42% de las grietas fueron reparadas mediante el método de inyección de resinas epoxi. Se considera que el método es poco utilizado. Habrá de preguntar a los diseñadores las causas de su bajo uso.

Se observó que la mayoría de las personas involucradas en rehabilitación de edificios desconocía el procedimiento constructivo correcto para la implantación de la reparación de grietas mediante el procedimiento de inyección. Además, los diseñadores no tomaban en cuenta la restitución de las propiedades que aportaba la inyección de resina epoxi argumentando que al utilizar otras técnicas de rehabilitación el aporte de la inyección de resina se consideraba con un factor de seguridad adicional.

Además, se observó que en 99% de los casos, la inyección de resina epoxi era acompañada por otras técnicas de rehabilitación destacando los encamisados en vigas y columnas con concreto, acero o fibras de carbono.

En el caso de los edificios que fueron inyectados, se lograron identificar diferentes variantes en cuanto a la forma de inyección, tipos de boquillas, bombas de inyección, tipos de resinas, materiales de sellado y formas generales de realizar los procedimientos como limpieza, colocación de boquillas, entre otros.

Por falta de una reglamentación en el país y en la Ciudad de México, en particular, o especificaciones de los diseñadores, la mayoría de las empresas constructoras aplicaron el método de inyección conforme a la información con la que contaban o eran auxiliadas por empresas especializadas (en el mejor de los casos) en realizar este procedimiento, lo que abrió la posibilidad a diferentes variantes y errores que se volvieron comunes en la práctica.

Dentro de los errores más comunes destacan: la falta de interés por la limpieza de las grietas, la falta de consideración sobre las condiciones ambientales (como la humedad), la colocación del sello de manera no uniforme permitiendo oquedades y la fuga de la resina al momento de inyectar, el perfilado de las grietas permitiendo la creación de microgrietas, entre otros errores (véase en el Capítulo 5). A esto hay que añadir que no se especifica la ejecución de pruebas no destructivas que verifiquen que el procedimiento de inyección se llevó a cabo de manera adecuada.

Finalmente, se concluye que existe muy poca información del procedimiento de inyección por parte de los constructores y los diseñadores que no especifican el procedimiento constructivo correcto para garantizar la calidad de la inyección. Para atender esta situación, en esta tesis se presenta el guion (véase en el apéndice D) de un video que explica la técnica y esta dirigido a ingenieros civiles, arquitectos, supervisores, diseñadores y a todos aquellos profesionales de la construcción especializados en temas de rehabilitación de estructuras.

6.5. RECOMENDACIONES GENERALES

De acuerdo con la documentación que se ha realizado del método de inyección, la información documental existente, las visitas de campo y la revisión de diferentes proyectos donde se aplicó la técnica se recomienda lo siguiente:

- Seguir siempre los requisitos establecidos en el documento Rehabilitación sísmica de infraestructura física educativa de México. Guía Técnica. (INIFED, 2020).
- De modo particular, que los proyectistas especifiquen la manera en la que se debe llevar a cabo el procedimiento constructivo, así como los cuidados que se deben tener antes, durante y después del procedimiento de inyección.
- Igualmente, que se establezca cómo debe ser supervisado el procedimiento de inyección para evitar errores y malas prácticas con la finalidad de que se logre alcanzar el desempeño esperado.
- La elaboración de videos y material de difusión para dar a conocer las mejores prácticas, procedimientos constructivos y consideraciones de diseño a todas las personas involucradas en el procedimiento de rehabilitación de estructuras de concreto.
- Realizar una campaña amplia de estudios experimentales sobre el uso de resinas epoxi como técnica única de rehabilitación, inyección de resinas epoxi mediante impregnación al vacío para daños graves en elementos de concreto y por supuesto dar

seguimiento a la inyección a presión en diferentes elementos estructurales. Esto con la intención de contar con especificaciones robustas de recuperación de la funcionalidad de los edificios en un tiempo establecido.

6.6. RECOMENDACIONES PARA NORMAS

A partir de las conclusiones y las recomendaciones generales, se recomienda incluir el siguiente texto en una nueva Norma Técnica Complementaria para Evaluación y Rehabilitación de Edificaciones.

6.6.1. Reparación de grietas en estructuras de concreto mediante fluidos

Antes de comenzar con la reparación de grietas es necesario evaluarlas, con el fin de conocer su origen, espesor, longitud y tipo de agrietamiento. Con esta información se decidirá el método de reparación. El método de reparación puede ser mediante la inyección de resinas epoxi, rajuelado con un mortero de reparación epóxica o un mortero de cemento-arena. Estas consideraciones se describen en la sección 6.6.4.

6.6.2. Deficiencia por corregir

La inyección de fluidos (resinas epoxi, lechadas, morteros epóxicos o hidráulicos) se emplea para reparar elementos estructurales de concreto agrietados debido a las acciones sísmicas. En algunos casos se puede utilizar para la reparación de muros de mampostería. Con el procedimiento de inyección se puede obtener:

- a) La restitución de parte de la capacidad estructural con la que contaban los elementos antes de sufrir daño.
- b) La unión del concreto entre sí, con lo cual se le regresa a su estado monolítico.
- c) Protección y adherencia entre el acero de refuerzo y el concreto agrietado.

Esta técnica puede ser utilizada en combinación con otras para incrementar la capacidad de la estructura.

6.6.3. Descripción de la técnica

Esta técnica de rehabilitación consiste en la inyección de una resina sintética a base de polímeros epoxi (o epoxy) en grietas causadas por eventos sísmicos. Se debe utilizar cuando el grado de deterioro del elemento es bajo y no se cuenta con desprendimientos de concreto significativos.

También se pueden reparar grietas mediante la colocación por gravedad de lechadas de cemento con aditivos que aceleren el fraguado, incrementen la resistencia y estabilicen el volumen. Así mismo también se pueden rellenar las grietas mediante morteros.

6.6.3.1. Acciones previas a la inyección

Antes de efectuar la inyección se deben realizar las siguientes acciones:

- a. Retirar todos los acabados a una distancia no menor que 300 mm de la localización de la grieta.
- b. Limpiar la grieta de polvo, ya sea por medios mecánicos (compresoras, bombas de aire o aspiradoras de tipo industrial) o manuales (brochas de cerdas finas, cepillos). Evitar el uso de compresores de aire operados por motores de combustión interna ya que pueden emitir partículas de aceite en el proceso. Se debe comprobar que los compresores de aire no emitan dichas partículas para lo cual se deberá dirigir el aire contra una hoja de papel para su verificación. Se recomienda el uso de aspiradoras industriales para retirar el polvo y partículas de concreto y mampostería dentro de la grieta
- c. En caso de existir humedad y el método de reparación es mediante inyección de resina epóxica se deberá secar la grieta por medio de aire caliente y se deberá asegurar que la fuente de humedad sea detenida.
- d. Si el material de reparación es una lechada de cemento, se puede limpiar la grieta con agua limpia.
- e. Ejecutar una pequeña perforación con un taladro en los lugares donde se colocarán las boquillas o inyectores. Una vez concluidas se deben limpiar del polvo.
- f. Colocar las boquillas de forma simultánea con el material sellador de la grieta. Usualmente las boquillas son de 10 mm a 13 mm de diámetro, con una profundidad de 60 mm y deberán estar separadas a una distancia máxima de 500 mm entre sí. Se recomiendan boquillas especializadas para la inyección de resinas epoxi ya que cuentan con una válvula que evita la salida de la resina una vez inyectada.
- g. Dejar secar el sellador para que alcance su resistencia un tiempo mínimo de 24 h.

6.6.3.2. Acciones durante el procedimiento de inyección

Una vez endurecido el sellador de la grieta se deberá preparar la resina. Esta debe tener una viscosidad baja, así como una velocidad y temperatura de endurecimiento adecuadas para el elemento a inyectar.

La inyección se realiza introduciendo a presión la formulación epóxica de baja viscosidad mediante jeringas a baja presión, pistolas, gatos hidráulicos, bombas mecánicas o bombas de vacío.

Cuando se reparan grietas verticales o inclinadas se deberá inyectar la resina por la boquilla más baja y se continuará hasta que esta comience a salir por la boquilla inmediata superior. Una vez que comience a salir la resina, se deberá retirar la bomba de la boquilla de inyección, se sellará la boquilla y se conectará la bomba a la boquilla inmediata superior. Se deberá repetir el proceso hasta completar la longitud total de la grieta.

Una vez terminada la inyección se deberá dejar un tiempo mínimo de 24 horas antes de retirar el sello con el fin de que la resina alcance su resistencia máxima.

6.6.3.3. Acciones post-inyección

Una vez que cumplió el tiempo mínimo de endurecimiento de la resina, se retirará la capa de sellado de la grieta en caso de que así se requiera. Si el sello se consideró para quedarse después de la inyección se puede dejar. El retiro del sellador puede ser por medios mecánicos (desbastando con herramientas eléctricas). No se deberá utilizar calor para retirar el sello.

Se deberá realizar pruebas de ultrasonido, impacto eco o análisis espectral de ondas superficiales en al menos 10% de los elementos inyectados para asegurar que la inyección de resina, lechada o mortero ha sido exitosa. Se deberán medir los tiempos de recepción de las ondas antes y después de la inyección. Se comparará el tiempo de recepción después de la inyección con una referencia de concreto sano. Se aceptará el elemento inyectado si la diferencia entre los tiempos es cuando mucho 20%.

6.6.4. Consideraciones de diseño

Para fines de diseño de la rehabilitación de edificios se deberá considerar los valores más bajos de la Tabla 18 a menos de que el responsable el valor del límite superior.

Tabla 18 Niveles de recuperación de diferentes materiales (Abarca, 2020)

Material	Anchura de grieta (mm)	Niveles de recuperación			Características
		Resistencia (%)	Rigidez (%)	Ductilidad (%)	
Resinas epoxi	0.05 - 1.00	70 - 90	30 - 80	75 - 90	Sensibilidad a altas temperaturas. Difícil de utilizar con material poroso
Lechada	1.0 – 5.0	70 - 90	50 - 80	70 - 80	Para grietas limpias, sin impurezas
Mortero epóxico	> 5.0	70 - 90	30 - 80	75 - 90	Sensible a altas temperaturas
Mortero de cemento		80 - 120	50 - 100	80 - 90	Para elementos con pocas grietas grandes

Referencias y Bibliografía

- Abarca, J., y Cottier, J. (2020). Inyección de resina epóxica como técnica de rehabilitación en edificios de concreto tras el sismo de 2017. *Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*, 13 pp.
- ACI. (2001). Control de la Fisuración en Estructuras de Hormigón ACI 224. *Control de la Fisuración en Estructuras de Hormigón ACI 224R-01*, pp. 1–53.
- ACI 224.1R. (2007). Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures. *ACI 224*.
- ACI 318 SUS-14 (2015). *Requisitos de reglamento para concreto estructural*. Comité ACI 318.
- Alcocer, S. M., y Murcia, J. (2020a). *APÉNDICE C1 Evaluación de edificios de concreto rehabilitados sísmicamente tras el sismo de 2017 en la Ciudad de México*.
- Alcocer, S. M., y Murcia, J. (2020b). *Evaluación de edificios de concreto rehabilitados sísmicamente tras el sismo 2017 en la Ciudad de México* (p. 491). UNAM.
- Alcocer, S. M., y Murià, D. (2021). Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México. *INIFED*, 2, 174.
- Alcocer, S. M., y Murià, D. (2020). *Guía técnica para la rehabilitación sísmica de edificios escolares de la Ciudad de México* (Vol. 1, p. 202).
- ACI 224. (1993). Causas, evaluación y reparación de fisuras en estructuras de hormigón. *Comité ACI 224*, 1993.
- Araki, H., e Izaki, S. (2012). Seismic performance of damaged low strength concrete column repaired by epoxy resin injection. *AIJ Journal of Technology and Design*, 18(38), 181–186. <https://doi.org/10.3130/aijt.18.181>
- ASTM C881/C881M. (2002). Standard Specification for Epoxy-Resin-Base Bonding Systems for Concrete. *Current*, 06, pp. 4–9.
- FEMA P58. (2018). *Development of next generation performance-based seismic design procedures for new and existing buildings*. Web page FEMA <https://femap58.atcouncil.org/>
- Fernández, M. (1966). *Las resinas epoxi en juntas de hormigonado*. Instituto Eduardo Torroja p.113–121.
- Fernández, M. (1981). *Las resinas epoxi en la construcción* (p. 327). Instituto Eduardo Torroja.
- French, C. W., Thorp, G. A., y Tsai, W. J. (1990). Epoxy repair techniques for moderate earthquake damage. *ACI Structural Journal*, 87(4), 416–424. <https://doi.org/10.14359/2758>
- Gobierno de la Ciudad de México (GCDMX) (2017). “Normas Técnicas Complementarias,” Gaceta Oficial de la Ciudad de México, No. 220 bis, diciembre 15, 2017.
- Gobierno de la Ciudad de México. (2017). "Norma para Rehabilitar Edificios de Concreto Dañados por el sismo del 19 de septiembre de 2017 (NTC- Rehabilitación, 2017)". *Gaceta Oficial de La Ciudad de México*, 211.

Goodwin, F., McDonald, J., Apicella, F., y Costa, J. (2016). Guide for Verifying Field Performance of Epoxy Injection of Concrete Cracks. *International Concrete Repair Institute, Guideline No. 210.1R-2016, 210*, 18 pp.

Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, INIFED. (2020). Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México. Guía técnica. *INIFED, 1*, 288 pp.

Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, INIFED. (2021). *Reparación de grietas mediante inyección de resinas epoxi*. [Video] Disponible en: www.resilienciasismica.unam.mx

Instituto Eduardo Torroja, (1960). *Informes de la Construcción*. Retrieved January 21, 2021, from <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/search/search?csrfToken=15634e8db9353f9835377c3e3b91414a&query=resinas+epoxi>

Leon, F. (1991). *Reparación de elementos de concreto reforzado con alto grado de daño*. [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2013/Presenciales/0707088/0707088.pdf>

Marder, K. J., Elwood, K. J., Motter, C. J., y Charles Clifton, G. (2020). Quantifying the effects of epoxy repair of reinforced concrete plastic hinges. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 53*(1), 37–51. <https://doi.org/10.5459/BNZSEE.53.1>. pp. 37-51

NEODEX. (2018). *ULTRASONIDO | EVALUACIÓN DE GRIETAS | CONCRETO |NEODEX*. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=NCXgE_CdKfg&t=86s

Pinillos F., Picard Á., Allué-Andrade, M., Ballesteros E., y Sanz A. (2009). *La Resina: herramienta de conservación de pinares* (Cesefor (ed.); pp. 78). http://contenidos.educarex.es/mci/2009/43/TEMA2/resina_epoxidicas.pdf

PLAREMESA. (2020). *Resina Epóxica | ¿Cuáles son sus usos principales? | PLAREMESA*. Web Page. <https://www.plaremesa.net/resina-epoxica/>

PSC-México. (2020). *Inyección de resina epóxica en grietas - YouTube*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=tgZ3D8bO3PA>

Ramírez, A. (1996). *Estadística de edificios rehabilitados en la Ciudad de México después de los sismos de 1985.pdf* [Universidad Nacional Autónoma de México UNAM]. <http://132.248.9.195/ppt1997/0240563/Index.html>

Soto, E. (2008). La rehabilitación de estructuras de concreto. In *Tesis UNAM* (pp. 107). UNAM.

Trout, J. (2006). *Epoxy Injection in Construction* (B. Michele; Second Edition)).

,

Anexos

A. Comparador y clasificación de grietas.

En la Figura 71 se muestra el comparador de grietas utilizado por Trout (2006), este clasifica las grietas en 4 tipos: Clase A, Clase B, Clase C y Clase D. Esta clasificación le permite distinguir las grietas que pueden ser inyectadas con resinas epóxicas.

INCHES	CRACK COMPARATOR			MILLIMETERS
___.002				0.0506 _____
___.004				0.1016 _____
___.006				0.1524 _____
___.008				0.2032 _____
___.010				0.2540 _____
___.012				0.3048 _____
___.014				0.3556 _____
___.016				0.4064 _____
___.018				0.4572 _____
___.020				0.5080 _____
___.022				0.5588 _____
___.024	Crack Classifications			0.6095 _____
___.026	<0.007	Class A	<0.178	0.6604 _____
___.028	0.007-0.022	Class B	0.179-0.559	0.7112 _____
___.030	0.023-0.200	Class C	0.560-5.08	0.7820 _____
___.032	>0.200	Class D	>5.08	0.8128 _____

Figura 71 Comparador de grietas Trout (2006)

B. Resinas comerciales más utilizadas

Las resinas epoxi más utilizadas en México son de la marca Sika y Hilti. Estas resinas cumplen con las normas ASTM C 881 y cumplen con las características de inyección descritas en esta tesis. A continuación, se muestran sus fichas técnicas y sus propiedades.

Construcción

Ficha Técnica
Versión Marzo, 2014
Sikadur 52

Sikadur® 52

Resina de baja viscosidad para inyección

Descripción del Producto Sikadur® 52 es un sistema de dos componentes, en base a resina epóxica de alta resistencia, exento de solventes.

Usos Como resina de inyección con buena adherencia a hormigón, mortero, piedra, acero y madera. Sikadur® 52 es utilizado para rellenar y sellar grietas y poros en estructuras tales como edificios, puentes, instalaciones industriales y otras estructuras, por ejemplo, en columnas, vigas, fundaciones, muros, pavimentos y estanques de agua. Sikadur® 52 une estructuralmente las secciones de hormigón y forma una efectiva barrera contra la infiltración de agua y elementos corrosivos

Características / Ventajas

- No contiene solventes.
- Puede ser aplicado sobre superficies secas o húmedas
- Utilizable a bajas temperaturas
- Endurecimiento sin retracción
- Alta adherencia y resistencia mecánica.
- Alta dureza no frágil
- Baja viscosidad
- Inyectable con sistemas de un componente

Normas Sikadur® 52 cumple con la norma ASTM C 881 - 78 Tipo I Grado 1 Clase B+C. Sikadur® 52 está certificado como producto no tóxico por el Instituto de Salud Pública de Chile.

Datos del Producto

Color Líquido color amarillo transparente (mezcla A+B)

Presentación Juego (A + B) de 5 kg
Pack de 6 x 1 kg

Almacenamiento / Vencimiento 2 años en sitio fresco y bajo techo en su envase original cerrado. Acondicione entre 15°C y 30 °C antes de usar.

Datos Técnicos

Base química Resina epóxica modificada de dos componentes libre de solventes.

Densidad 1.1 kg/l
1.2

Viscosidad

Temperatura	Viscosidad (mPa . s)
+10°C	~ 1200
+20°C	~ 430
+30°C	~ 220

Coefficiente de expansión térmica 8.9×10^{-5} por °C (entre -20°C y +40°C) (EN ISO 1770)

Propiedades Mecánicas / Físicas

Resistencia a Compresión 52 N/mm² (a 7 días a +23°C) (ASTM D695-96)

Resistencia a Flexión 61 N/mm² (a 7 días a +23°C) (DIN 53452)

Resistencia a Tracción 37 N/mm² (a 7 días a +23°C) (ISO 527)



Adherencia a hormigón	> 4 N/mm ² (falla del hormigón) (a 7 días a +23°C)											
Módulo E en flexión	1800 N/mm ² (a 7 días a +23°C)	(DIN 53452)										
Información del Sistema												
Detalles de Aplicación												
Consumo	El consumo de Sikadur [®] 52 depende del ancho y profundidad de las grietas, para 1 litro de relleno se requiere de 1,1 kg de Sikadur [®] 52.											
Preparación del sustrato	Requerimientos Sano, limpio, libre de aceite o grasa, sin tratamiento superficiales o revestimientos. Tratamiento previo para buena adherencia: Hormigón, mortero, piedra deben ser cuidadosamente preparados por medio de chorro de agua a alta presión o medios mecánicos como desbaste, etc. Las grietas deben ser limpiadas para remover el polvo con aire a presión.											
Condiciones de Aplicación / Limitaciones												
Temperatura del sustrato	+5°C mín. / +30°C máx.											
Contenido de humedad del sustrato	Seco o húmedo (SSS – Saturado Superficialmente Seco: sin agua apozada)											
Instrucciones de Aplicación												
Mezclado	Relación de mezcla A : B = 2 : 1 (en peso); A : B = 1,8 : 1 (en volumen)											
Tiempo de mezclado	Adicione todo el componente B a la parte A. Mezcle con un mezclador eléctrico a baja velocidad (máx. 250 rpm) por al menos 3 minutos. Evite incorporar aire.											
Método de aplicación / Herramientas	Grietas en losas horizontales: Sature las grietas mediante una brocha o rellene por gravedad vaciando Sikadur [®] 52 entre dos diques realizados, por ejemplo, con sellante Sikaflex [®] . Las grietas que atraviesan el espesor de las losas deben ser selladas por su lado inferior, por ejemplo, con Sikadur [®] 31. Grietas en estructuras verticales: Sikadur [®] 52 puede ser inyectado mediante presión dentro de la grieta usando una bomba o equipo de inyección para uno o dos componentes. Deben colocarse boquillas de inyección a intervalos de aprox. 25 cm sobre la grieta. La grieta debe sellarse superficialmente, por ejemplo, con Sikadur [®] 31, para evitar que la resina escape durante el proceso de inyección. Las grietas verticales deben ser siempre inyectadas desde la parte inferior hacia arriba. Tan pronto como la resina aparezca por la boquilla siguiente, sellar la primera y continuar el proceso por la siguiente. Después de completar el proceso de inyección, remover las boquillas de inyección y el material de sellado.											
Limpieza de herramientas	Las herramientas y los instrumentos deben ser limpiados después de su empleo con diluyente a la piroxilina. El producto endurecido sólo puede ser removido mecánicamente.											
Potlife	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Temperatura</th> <th>Potlife</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>+5°C</td> <td>~ 120 minutos</td> </tr> <tr> <td>+10°C</td> <td>~ 80 minutos</td> </tr> <tr> <td>+23°C</td> <td>~ 25 minutos</td> </tr> <tr> <td>+30°C</td> <td>~ 10 minutos</td> </tr> </tbody> </table>	Temperatura	Potlife	+5°C	~ 120 minutos	+10°C	~ 80 minutos	+23°C	~ 25 minutos	+30°C	~ 10 minutos	
Temperatura	Potlife											
+5°C	~ 120 minutos											
+10°C	~ 80 minutos											
+23°C	~ 25 minutos											
+30°C	~ 10 minutos											
Notas sobre aplicación / Limitaciones	Máximo ancho de grieta a ser inyectada: 5mm Sikadur [®] 52 es apropiado para condiciones secas y húmedas pero no para condiciones con agua libre.											



Construcción	Base de Valores	Todos los datos técnicos del producto indicados en esta hoja de datos se basan en pruebas de laboratorio. Los datos medidos reales pueden variar debido a circunstancias más allá de nuestro control.
	Restricciones Locales	Observe, por favor, que como resultado de regulaciones locales específicas el funcionamiento de este producto puede variar de un país a otro. Consultar, por favor, la hoja de datos local del producto para la descripción exacta de los campos de aplicación.
	Instrucciones de seguridad	
	Salud y Seguridad	Para información y consejo sobre seguridad en la manipulación, almacenamiento y disposición de productos químicos, los usuarios deben referirse a la ficha de datos de seguridad vigente, la cual contiene datos físicos, ecológicos, toxicológicos y otros datos relativos a la seguridad. En caso de emergencia llamar al CITUC a los siguientes fonos: 8353800 por intoxicaciones ó 2473800 por emergencias químicas.
	Observaciones	La información, y, en particular, las recomendaciones relacionadas a la aplicación y uso final de productos de Sika, se dan en buena fe basada en el conocimiento y experiencia actual de Sika de los productos cuando se han almacenado apropiadamente, manipulados y aplicados bajo las condiciones normales de acuerdo con las recomendaciones de Sika. En la práctica, las diferencias en materiales, substratos y condiciones reales del sitio son tales que ninguna garantía en relación a la comercialización o de aptitud para un propósito particular, ni cualquier obligación que surja en absoluto de cualquier relación legal, puede ser inferida de esta información, ni de cualquier otra recomendación escrita, o de cualquier otra sugerencia ofrecida. El usuario debe probar la aptitud del producto para la aplicación y propósito propuesto. Sika se reserva el derecho para cambiar las propiedades de sus productos. Deben observarse los derechos de propiedad de terceras partes. Todas las órdenes de compra son aceptadas sujetas a nuestras condiciones actuales de venta y entrega. Los usuarios siempre deben referirse a la más reciente edición de la Ficha Técnica local del producto correspondiente, copias de la cual se proporcionarán a su solicitud.

Sika S.A. Chile
 Pdte. S. Allende 85
 San Joaquín
 Santiago
 Chile

Tel. 56 2 510 6510
 Fax 56 2 552 3735
 www.sika.cl



HILTI
Ficha técnica
Hilti HIT-RE500 y manguito HIS-N

Sistema de Inyección



Hilti HIT-RE 500
 Cartucho disponible 330 ml, 500 ml y 1400 ml.



Manguito de rosca Interna
 HIS-N
 HIS-RN



Homologación Europea



Marcado CE



Software de diseño Hilti



Hormigón



Distancia de borde y separación reducidas



Empotramiento flexible



Resistencia a corrosión



Alta resistencia a la corrosión



Resistencia al fuego

Hilti HIT-RE 500

Sistema de inyección bicomponente de altas prestaciones y fraguado lento con baja retracción que en conjunto con las varillas HIT-V permite una mayor flexibilidad en sus conexiones estructurales en hormigón.

- Adhesivo epoxídico de alto poder de adherencia en acero y hormigón.
- No contiene sustancias cancerígenas ni venenosas, cumpliendo todas la normativas vigentes de seguridad y salud.
- Adhesivo homologado para su uso con barras corrugadas "a posteriori" (para más información consulte el documento correspondiente).

Características y Ventajas

- Homologado según normativa europea Opción 7: hormigón no fisurado de C20/25 a C50/60 para varillas hasta M39
- Alta capacidad de carga.
- Válido para hormigón seco y saturado.
- Sin reducción de carga en taladros con diamante.
- Fraguado bajo agua.
- Una vez fraguada puede estar en contacto con agua potable (NSF americana)
- Permite pequeñas distancias a borde y de separación entre anclajes.
- Aplicación con grandes diámetros, superiores a M39 *
- Posibilidad de realizar grandes empotramientos (hasta 3,2 m en condiciones estándar).
- Limpieza manual desde M8 a M16 con una profundidad de anclaje $h_{ef} = 10d$.
- Diseño de cálculo con el programa Hilti PROFIS Anchor 2.0 (disponible para descarga en www.hilti.es)

- *Consultar con oficina técnica

Aplicaciones



- Fijación de placas de anclajes y angulares en materiales macizos
- Apoyo de forjados



- Fijación de maquinaria pesada.
- Fijación de grúas o puentes grúa.
- Anclajes de estructuras metálicas.



Tiempos de manipulación y de fraguado

Temperatura del material base	Tiempo de manipulación t_{gr}	Tiempo de fraguado hasta la puesta en carga t_{cur}
40 °C	12 min	4 h
30 °C a 39 °C	20 min	8 h
20 °C a 29 °C	30 min	12 h
15 °C a 19 °C	90 min	24 h
10 °C a 14 °C	120 min	48 h
5 °C a 9 °C	180 min	72 h

Rango de temperatura de servicio

El sistema de anclaje Hilti HIT-RE 500 debe ser aplicado en el rango de temperaturas que se presenta a continuación. Temperaturas superiores del material base pueden conducir a una reducción de la tensión de adherencia.

Rango de temperatura	Temperatura del material base	Temperatura máxima del material base a largo plazo*	Temperatura máxima del material base a corto plazo**
Rango temperatura I	-40°C a +40°C	+24°C	+40°C
Rango temperatura II	-40°C a +58°C	+35°C	+58°C
Rango temperatura III	-40°C a +70°C	+43°C	+70°C

* Temperatura máxima del material base a largo plazo: aquella que se mantiene prácticamente constante por largos periodos de tiempo.

** Temperatura máxima del material base a corto plazo: aquella que puede ocurrir en intervalos cortos, como por ejemplo, a lo largo de un día.

Geometría y propiedades mecánicas del anclaje

Calidad de los materiales

Parte	Material
manguito de rosca interna ⁴⁰ HIS-N	Acero-C 1.0718, EN 10277-3 galvanizado $\geq 5\mu\text{m}$ EN ISO 4042
manguito de rosca interna ⁴⁰ HIS-RN	Acero inoxidable 1.4401 and 1.4571 EN 10088

Métrica			M8	M10	M12	M16	M20
f_{uk} (N/mm ²)	Tensión nominal última	HIS-N	490	490	460	460	460
		Tonilo 88	800	800	800	800	800
		HIS-RN	700	700	700	700	700
		Tonilo A4-70	700	700	700	700	700
f_{yk} (N/mm ²)	Limite elástico	HIS-N	410	410	375	375	375
		Tonilo 88	640	640	640	640	640
		HIS-RN	350	350	350	350	350
		Tonilo A4-70	450	450	450	450	450
A_s (mm ²)	Sección resistente	HIS-(R)N	51,5	108,0	169,1	256,1	237,6
		Tonilo	36,6	58	84,3	157	245
W (mm ³)	Modulo resistente (flexión)	HIS-(R)N	145	430	840	1595	1543
		Tonilo	31,2	62,3	109	277	541

C. Manual de inyección Sika

Las empresas que se dedican a la producción y venta de resinas epoxi para inyección se han dado a la tarea de crear manuales de aplicación que ayudan a los constructores a llevar a cabo los procedimientos constructivos de forma correcta aprovechando todas las propiedades de sus productos como es el caso de Sika España.

Construction

IN - 14.1
Fecha: Febrero 2009

Procedimiento de Ejecución Sistemas de Inyección de resinas

“Sika España”

Objetivo:
Describir los Sistemas de Inyección de Resinas para las distintas situaciones y problemáticas que se presentan tanto en obra civil como en edificación.



Las informaciones contenidas en este documento y en cualquier otro asesoramiento dado, están dadas de buena fe, basadas en el conocimiento actual y la experiencia de Sika de los productos cuando son correctamente almacenados, manejados y aplicados, en situaciones normales y de acuerdo a las recomendaciones de Sika. La información se aplica únicamente a la(s) aplicación(es) y al(los) producto(s) a los que se hace expresamente referencia y esta basada en ensayos/pruebas de laboratorio que no sustituyen a los ensayos/pruebas prácticos/as. En caso de cambios en los parámetros de la aplicación, como por ejemplo cambios en los soportes, etc., o en caso de una aplicación diferente, consulte el Servicio Técnico de Sika previamente a la utilización de los productos Sika. La información aquí contenida no exonera al usuario de ensayar los productos para la aplicación y la finalidad deseadas. Los pedidos son aceptados en conformidad con los términos de nuestras vigentes Condiciones Generales de Venta y Suministro. Los usuarios deben conocer y utilizar la versión última y actualizada de la Hoja de Datos del Producto concernido, copias de la cual se mandará a quien las solicite.



Sika S.A.U. /P.I. Valencia 2000 Ctra. NIII, Km 347 c/ Este 2 C
Quart de Poblet (Valencia)
Tel: 96 153 41 77 / Fax: 96 152 16 37
e-mail: ortega.irene@es.sika.com

1/20

D. Guion del Video de rehabilitación

La inyección de resinas epoxi es un procedimiento que se utiliza principalmente para reparar grietas en elementos de concreto y, en menor medida de mampostería de piezas macizas.

Este procedimiento tiene como finalidad devolverle al elemento la capacidad estructural original y regresar los elementos a un estado monolítico. Pretende restituir la resistencia, la rigidez y ductilidad del elemento, total o parcialmente.

La técnica consiste en inyectar resina epoxi a presión en grietas de los elementos afectados, llenando los vacíos y logrando una fuerte unión del concreto una vez que la resina se ha endurecido.

Para ejecutar esta técnica es necesario emprender algunas acciones previas a la inyección como son: limpiar las grietas de polvo o residuos, de preferencia mediante aspiración, colocar las boquillas de inyección y sellar correctamente las grietas.

Una vez preparadas las grietas, se inyecta la resina epoxi mediante una bomba a presión. Durante el proceso se debe revisar que no haya fugas, en especial, en las boquillas y sellos de las grietas. Una vez endurecida la resina 24 h después de su colocación, se retiran las boquillas y el sello de las grietas y se resana la oquedad con resina o mortero.

Esta técnica se utiliza en elementos de concreto con daño ligero o moderado y no cuenta con desprendimientos de concreto importantes. De acuerdo con las Normas de Rehabilitación y la Guía técnica de rehabilitación de escuelas, las grietas que pueden ser inyectadas con resinas epoxi son las que tienen un espesor de 0.02 mm a 5 mm. A partir de 5 mm se recomienda el uso de lechadas o morteros a base de cementantes hidráulicos o epóxicos.

La reparación de grietas mediante la inyección de resinas epoxi normalmente va acompañada de otras técnicas de rehabilitación, entre ellas: encamisados de concreto, encamisados de acero o con fibras de vidrio o de carbono.

Con la implantación de diseño basado en resiliencia sísmica y recuperación de la funcionalidad se pretende que en un futuro este método sea utilizado para reparar estructuras que cumplan con niveles de desempeño cercanos a ocupación inmediata, de esta forma, tras un sismo, mediante una reparación rápida y sencilla de grietas se podrá utilizar el edificio completamente.

Mediante ensayos de laboratorio se ha documentado que la recuperación de la resistencia de los elementos varía entre 80 y 100 %, de la rigidez entre 70 y 90% y la ductilidad entre 70 y 90% en promedio. En el documento “Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México. Guía Técnica” se recomienda considerar niveles de recuperación en resistencia entre 70 y 90 % en rigidez entre 30 y 70% y ductilidad entre 75 y 90%.

Esta técnica cuenta con algunas variantes, entre ellas el método de inyección, actualmente, se conocen dos métodos de inyección: a presión y mediante vacío. La inyección a presión ha dado buenos resultados tanto en laboratorio como en campo, mientras que la inyección mediante vacío requiere condiciones muy estrictas para funcionar en campo de ahí que no se recomiende.

La forma de inyección. En grietas inclinadas o verticales se inyectará de abajo hacia arriba pasando de una boquilla a otra conforme salga la resina. No es conveniente inyectar de arriba hacia abajo, ya que queda aire atrapado lo que impide que la grieta se rellene adecuadamente de resina. En grietas horizontales se inyecta del centro hacia los extremos.

Tipos de boquillas. Existen boquillas convencionales de metal de 13 mm de diámetro, cuentan con una zona de fijación y zona de acoplamiento con la manguera de inyección. También se pueden encontrar boquillas de aluminio o de plástico en forma de tubo de 10 mm de diámetro en las que se inserta la manguera. Otro tipo de boquillas son las plásticas con base, la cual se coloca con el sellador para una mayor fijación.

Formulación de la resina. La formulación de la resina depende de la marca que se utilice, se recomienda usar resinas y, en general productos certificados y de marcas conocidas.

Sellador de grietas. En muchos casos se utiliza el mismo tipo de resina para sellar las grietas, en cualquier caso se usaran productos certificados para procesos de inyección de resinas como morteros epoxi u otros.

Herramientas. Dependiendo de la condición de la grieta a inyectar se pueden utilizar diferentes herramientas según sea el caso, por ejemplo, si la grieta esta húmeda, es necesario secarla con aire caliente, para limpiar la grieta, es conveniente usar una aspiradora industrial. Se deben evitar medios húmedos como agua a presión o aire a presión a menos que se revise que la línea no conduce aceites o agua.

También se debe, evitar perfilar las grietas para aumentar su ancho ya que esto puede ocasionar microagrietamientos y mayores daños. La inyección de grietas se puede realizar de maneras diferentes de acuerdo al constructor y las condiciones de trabajo.

Como en todos los procedimientos de rehabilitación, la supervisión es un factor determinante para que la inyección sea llevada con éxito. Para ello se deberán cuidar los siguientes puntos:

- Que el proveedor proporcione la resina con las características para el proyecto, tales como: viscosidad, resistencia, porcentaje de retracción, tiempo de endurecimiento, entre otras.
- Que no se exceda el tiempo de inyección especificado en la formulación.

- Que el sellado de la grieta sea uniforme y cubra la extensión de la misma, además se comprobara que las boquillas estén separadas y colocadas según la especificación.
- Revisar la limpieza de la grieta. Esta no puede contener partículas, de polvo u humedad. Llevar a cabo las acciones pertinentes dependiendo el caso.
- Que se cumpla con el tiempo de secado del sellador utilizado, que durante la inyección no haya fugas, de ser así, suspender la inyección y reparar el sellado.
- Que la inyección se realice en la dirección adecuada. Para grietas verticales e inclinadas de abajo hacia arriba y para grietas horizontales del centro hacia los extremos.
- Que se cumpla con el tiempo de endurecimiento de la resina antes de retirar el sello.
- Verificar que la inyección se llevó a cabo correctamente mediante pruebas de ultrasonido. En este caso se medirá de recepción del pulso ultrasónico de un concreto sano y se comparará con el elemento inyectado a través de la grieta reparada. Se aceptará la inyección si la diferencia de tiempos entre el concreto sano y el reparado no es mayor que 20%

Esta técnica de rehabilitación bien ejecutada ha mostrado ser eficiente. En diversos ensayos de laboratorio se ha evidenciado que un elemento bien inyectado, cuando es sometido de nuevo a cargas similares, exhibe grietas paralelas a las originales y/o en otras ubicaciones y en ninguno de los casos se ha observado que las grietas previamente inyectadas vuelvan abrirse. En todos los casos las nuevas grietas se forman en el concreto adyacente y no en las reparaciones.