

**PROPUESTA DE UN SOPORTE BASADO EN  
FIBRA DE CARBONO Y RESINAS TERMOESTABLES.**

**ANÁLISIS Y COMPARACIÓN CON SOPORTES Y TÉCNICAS  
PICTÓRICAS TRADICIONALES.**

**TOMO I**



BIBLIOTECA U.C.M.

5308295434

Tesis Doctoral realizada por Carmen Pérez González.

Dirigida por el Profesor Dr. Manuel Huertas Torrejón.

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

**FACULTAD DE BELLAS ARTES**

**DEPARTAMENTO DE PINTURA**

*Madrid, 1997*



R<sup>o</sup> T 202 (I)

**A mis padres  
y a Abel.**

## AGRADECIMIENTOS

La realización de la presente tesis doctoral ha sido posible gracias a la dirección, asesoramiento y apoyo de D. Manuel Huertas Torrejón, cuya colaboración ha sido determinante en todo momento para llevar a buen fin este trabajo de investigación. Para él mi más sincero agradecimiento y consideración.

Deseo expresar igualmente mi inmensa gratitud a Da. Blanca Parga Landa por su valiosa aportación a esta tesis y por sus inestimables colaboraciones, iniciativas y consejos, tanto en el terreno científico como humano, sin todo lo cual habría sido imposible realizar con rigurosidad esta investigación.

Gracias a D. Francisco Hernandez Olivares y D. Luis de Villanueva por su asesoramiento y orientación que me guiaron en mi trabajo.

Mi reconocimiento a Da. Lola Gil y D. Julián Gil por su ánimo y apoyo en la realización de esta empresa.

La parte de colorimetría fue posible gracias a la instrumentación cedida por la E.T.S. de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid y por el Departamento de Laboratorio de Física y Química de la Facultad de Bellas Artes de la Universidad Complutense de Madrid. Mi más sincero agradecimiento a Da. Margarita San Andrés de la Facultad de Bellas Artes y a D. José Vicente Alonso y Da. Alicia Larena Pellejero de la E.T.S. de Ingenieros Industriales por sus colaboraciones.

Hago extensiva mi gratitud a aquellas empresas cuya aportación de materiales, documentación y experiencia ha representado una contribución de enorme valor para esta tesis, así como a las personas que dentro de ellas dedicaron parte de su tiempo y conocimientos a esta colaboración desinteresada: D. Orlando Ruiz Murillo, de HÉRCULES AEROSPACE ESPAÑA, S.A. (actualmente HEXCEL COMPOSITES), D. José Luis Alonso Gangutia, de IMIN, S.L. (actualmente INP.96), D. Mario Fontana Goría, de REPOSA (Resinas Poliésteres, S.A.) y D. Mariano Rubio Pardos de CIBA-GEIGY (actualmente CIBA ESPECIALIDADES QUÍMICAS).

Quiero agradecer la amabilidad con que ciertas personalidades del campo de la conservación-restauración se han brindado a aportar tanto sus experiencias como conocimientos en la aplicación de materiales compuestos. Entre todas ellas quiero destacar a las siguientes: Da. Susana Mora, de la E.T.S. de Arquitectura de Madrid, D. Paolo y Da. Laura Mora, del ICCROM en Roma; también en Roma a D. Giorgio Torraca, Da. Giovanna Baldini, D. Paolo Francelli y D. Giovanni Miarelli. En la Universtitá Internazionale dell'Arte en Florencia D. Sabino Giovannoni por sus aportaciones claves en esta investigación y a D. Umberto Bandini. También en Florencia, en el Opificio delle Pietre Dure, Da. Cristina Danti. Da. Carol Stringari, Da.

Eleonora Nagy y D. Martin Langer del Salomon R. Guggenheim Museum de Nueva York; Da. Patricia Houlihan, Da. Lynda A. Zycherman y Da. Anny Aviram de The Museum of Modern Art de Nueva York; Da. Margaret Holben Ellis de The New York University; Da. Harriet Irgang de Rustin Levenson Art Conservation; D. Yale Kneeland, Da. Di Abramitis y Da. Lucy Belloli de The Metropolitan Museum of Art de Nueva York; Da. Sandra Amann y Da. Judith Fox de Amann Conservation Associates (Nueva York); D. Kenneth S. Moser, D. Richard Kowall y Da. Carolyn Tomkiewicz de The Booklyn Museum en Nueva York; Da. Dana Cranmer y Da. Daisy Craddock de Cramer Art Conservation de Nueva York.

De igual forma quiero agradecer la valiosa colaboración de los artistas John Duff, Tom Butter, Karen Atta, Andrea Arroyo, Sebastián Miralles, Amador Magraner, Juan Bordes, Francisco Leiro y Daniel Canogar, cuyas experiencias han aportado puntos de vista de enorme interés en el tema de los plásticos en el arte.

Igualmente manifiesto mi agradecimiento a las Galerías de arte que han prestado su colaboración en la recopilación de datos sobre la obra de determinados artistas. Estas galerías se encuentran relacionadas en el Anexo I de la presente tesis.

En la parte documental ha sido de gran ayuda la cooperación del personal de diversas entidades de consulta como bases de datos documentales y bibliotecas. Entre ellos quisiera citar a las siguientes personas e instituciones: Da. Carmen Plaza Ruiz, del Gabinete de Documentación Científica; Centro de Documentación Europea (CEYDE); Rectorado de la Universidad Politécnica de Madrid; Da. Ángeles Vian Herrero y Da. Amelia Valverde de la Biblioteca de la Facultad de Bellas Artes de la Universidad Complutense de Madrid; D. Miguel del Valle-Inclán Alsina y D. Pascual Jiménez de la Biblioteca del Museo Centro de Arte Reina Sofía; Da. Christine Uginet de la Biblioteca del ICCROM en Roma; Da. Janis Ekdahl, de la biblioteca del New York University Institute of Fine Art, The James B. Duke House y D. Pacifico Gorfio de la Biblioteca della Galleria Nazionale d'Arte Moderna de Roma.

También quiero hacer constar mi profundo agradecimiento a la Comunidad de Madrid por la Beca de Formación de Personal Investigador que me fue concedida y sin la cual habría sido imposible la realización de esta tesis doctoral.

Finalmente, quiero agradecer la ayuda de todas esas personas que me apoyado con sus esfuerzos y su paciencia y que no han sido nombradas en este apartado. En mi mente están todas ellas y les dedico mi más afectuoso reconocimiento y gratitud.

## INDICE

<b>CAPITULO I:</b>	<b>INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y METODOLOGÍA. . . .</b>	<b>I.13</b>
I.1.-	INTRODUCCIÓN A LA TESIS DOCTORAL, OBJETIVOS Y METODOLOGÍA. RESUMEN DE CONTENIDOS. . . . .	I.14
<b>CAPITULO II.</b>	<b>EVOLUCIÓN Y VISIÓN ACTUAL DE LOS SOPORTES BASADOS EN MATERIALES COMPUESTOS. . . . .</b>	<b>II.1</b>
II.1.-	INTRODUCCIÓN AL CAPITULO. . . . .	II.2
II.2.-	SOPORTES TRADICIONALES. . . . .	II.6
II.2.1.-	La madera. . . . .	II.7
II.2.1.1.-	Agentes de deterioro de la madera. . . . .	II.9
II.2.2.-	La tela. . . . .	II.10
II.2.2.1.-	Fibras naturales. . . . .	II.13
II.2.2.2.-	Tejidos de fibras naturales. . . . .	II.15
II.2.2.2.1.-	Estructura de los tejidos naturales. . . . .	II.15
II.2.2.3.-	Agentes de deterioro de la tela. . . . .	II.18
II.3.-	MATERIALES COMPUESTOS. . . . .	II.21
II.3.1.-	Características y clasificaciones de los materiales compuestos . . . . .	II.22
II.3.2.-	Fibras químicas. . . . .	II.26
II.3.2.1.-	Fibras de vidrio. . . . .	II.29
II.3.2.2.-	Fibras de carbono. . . . .	II.34
II.3.2.3.-	Comparación entre las fibras. . . . .	II.37
II.3.2.4.-	Tejidos de fibras de vidrio y de fibras de carbono. . . . .	II.40
II.3.2.5.-	Armaduras de los tejidos sintéticos. . . . .	II.44

II.3.3.- Matrices poliméricas. ....	II.50
II.3.3.1.- Resinas termoplásticas. ....	II.53
II.3.3.1.1.- Poliacetato de vinilo. ....	II.55
II.3.3.1.2.- Poliacrilatos. ....	II.55
II.3.3.1.3.- Polimetacrilatos. ....	II.56
II.3.3.1.4.- Policloruro de vinilo. ....	II.57
II.3.3.1.5.- Polietileno. ....	II.58
II.3.3.1.6.- Polipropileno. ....	II.59
II.3.3.2.- Resinas termoestables. ....	II.60
II.3.3.2.1.- Resina poliéster. ....	II.61
II.3.3.2.2.- Resina epoxy. ....	II.68
II.3.3.2.3.- Resina fenólica. ....	II.71
II.3.3.2.4.- Comparación entre las matrices. ....	II.73
II.3.4.- Estructura de los laminados. ....	II.78
II.3.4.1.- Fabricación de los materiales compuestos. ....	II.79
II.3.4.2.- Defectos en los procesos de fabricación de los materiales compuestos. ....	II.87
II.3.5.- Procesos de degradación de los materiales compuestos. ....	II.93
II.3.5.1.- Fractura. ....	II.93
II.3.6.- Propiedades resistentes de las fibras y resinas. ....	II.96
II.3.6.1.- Fibras de carbono. ....	II.97
II.3.6.2.- Fibras de vidrio. ....	II.98
II.3.6.3.- Importancia de la flexibilidad. ....	II.99
II.3.6.4.- Resinas poliéster y epoxy. ....	II.101
II.3.6.5.- Resistencia de la interfase. ....	II.102
II.3.7.- Resistencia en materiales compuestos. ....	II.103
II.3.7.1.- Láminas unidireccionales. ....	II.104
II.3.7.1.1.- Interacción de las grietas sobre las fibras. ....	II.111
II.3.7.1.2.- Resistencia a tracción transversal. ....	II.114
II.3.7.1.3.- Resistencia a compresión longitudinal. ....	II.117
II.3.7.1.4.- Resistencia a compresión transversal. ....	II.121
II.3.7.1.5.- Resistencia a cortadura plana. ....	II.122

II.3.7.1.6.- Variación de la resistencia con la orientación. . . . .	II.123
II.3.7.2.- Resistencia de los laminados. . . . .	II.124
II.3.8.- Problemas de deterioro. . . . .	II.131
II.3.9.- Higiene y seguridad en la manipulación de los materiales. . . . .	II.134
II.3.9.1.- Almacenamiento de materiales. . . . .	II.135
II.3.9.2.- Procesos de transformación de los materiales. . . . .	II.136
II.3.10.- Coloración. . . . .	II.145
II.3.10.1.- Protección ante los ultravioletas. . . . .	II.147
II.3.10.2.- Coloración del poliéster. . . . .	II.148
II.3.10.3.- Coloración de la resina epoxy. . . . .	II.149
II.4.- ÚLTIMAS APORTACIONES EN SOPORTES. . . . .	II.150
II.4.1.- Los materiales compuestos en movimientos emblemáticos del siglo XX. Minimal y Process. . . . .	II.163
II.4.1.1.- La relevancia del material. . . . .	II.163
II.4.1.2.- Minimal art. . . . .	II.168
II.4.1.3.- El proceso como fundamento. . . . .	II.174
II.5.- UTILIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS EN RESTAURACIÓN. . . . .	II.181
II.5.1.- Transferencia de pintura mural. . . . .	II.182
II.5.2.- Tipos de arranque de la pintura. . . . .	II.183
II.5.3.- Propiedades del soporte ideal. . . . .	II.185
II.5.4.- Antecedentes de soportes murales para restauraciones que necesitaban un levantamiento de la pintura mural. . . . .	II.186
II.5.4.1.- Soportes rígidos tradicionales. . . . .	II.190
II.5.4.2.- Soportes de materiales naturales . . . . .	II.195
II.5.4.3.- Soportes basados en materiales sintéticos . . . . .	II.198
II.5.4.3.1.- Soportes realizados en masonite . . . . .	II.198
II.5.4.3.2.- Soportes basados en materiales compuestos con estructura tipo sandwich. . . . .	II.200

II.5.4.3.3.- Soportes basados en materiales compuestos de fibra de vidrio-resina.. . . . . .	II.209
II.5.4.3.4.- Soportes realizados con espumas sintéticas... . . . . .	II.213
II.5.5.- Relevantes especialistas en restauración de pintura mural con soportes basados en materiales compuestos. . . . . .	II.216

**CAPITULO III:    ENSAYOS COLORIMÉTRICOS Y  
                  DE ENVEJECIMIENTO. OBTENCIÓN  
                  DE RESULTADOS. . . . . .**

	III.1
III.1.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS ENSAYOS. . . . . .	III.2
III.1.1.- Consideraciones generales sobre la percepción del color. . . . . .	III.2
III.1.2.- La medida del color. Planteamiento colorimétrico. . . . . .	III.6
III.1.3.- El sistema de colores primarios C.I.E. . . . . .	III.9
III.1.4.- El diagrama de cromaticidad o triángulo C.I.E. . . . . .	III.10
III.1.5.- El sistema cromático CIELAB. . . . . .	III.14
III.1.6.- La solidez del color. . . . . .	III.15
III.1.7.- La blancura. . . . . .	III.16
III.1.8.- Brillo. . . . . .	III.17
III.1.9.- Generalidades sobre el instrumental de medición utilizado. . . . . .	III.18
III.1.9.1.- Colorímetro espectrofotométrico. . . . . .	III.19
III.1.9.2.- Reflectómetro. . . . . .	III.20
III.1.10.- Cámaras de envejecimiento utilizadas. . . . . .	III.22
III.1.10.1.- Cámara de niebla salina. . . . . .	III.22
III.1.10.2.- Cámara Xenotest. . . . . .	III.24
III.1.10.3.- Cámara de lámparas fluorescentes. . . . . .	III.26
III.2.- 1 <sup>AS</sup> . PRUEBAS REALIZADAS. COMPARACIÓN DE TÉCNICAS. . . . . .	III.27
III.2.1.- Introducción a las primeras pruebas. . . . . .	III.27
III.2.2.- Evaluación de la blancura relativa. (Según la norma UNE 72-322-85). . . . . .	III.29

III.2.2.1.- Resultados obtenidos de los cálculos de blancura relativa de las primeras pruebas. . . . .	III.32
III.2.3.- Ensayo acelerado de amarilleo. Según la norma UNE 48-071-82. . . . .	III.32
III.2.3.1.- Cálculo de la amarillez inicial. . . . .	III.33
III.2.3.2.- Cálculo de la amarillez final. . . . .	III.34
III.2.3.3.- Resultados obtenidos de los cálculos del ensayo acelerado de amarilleo de las primeras pruebas. . . . .	III.36
III.2.4.- Ensayo acelerado de envejecimiento. Determinación de diferencias de color según el sistema CIELAB (Norma UNE 40-435-84). . . . .	III.36
III.2.4.1.- Resultados obtenidos de los cálculos del ensayo de determinación de diferencias de color de las primeras pruebas. . . . .	III.41
III.2.5.- Ensayo comparativo de determinación de la variación del brillo en pinturas sometidas a envejecimiento. . . . .	III.43
III.2.5.1.- Resultados obtenidos del ensayo de variación del brillo en las primeras pruebas. . . . .	III.47
III.2.6.- Resultados finales obtenidos de las primeras pruebas de Colorimetría. . . . .	III.48
 III.3.- 2 <sup>AS</sup> PRUEBAS REALIZADAS. COMPARACIÓN DE TÉCNICAS SOBRE DIFERENTES SOPORTES. . . . .	III.50
III.3.1.- Introducción a las segundas pruebas. . . . .	III.50
III.3.2.- Evaluación de la blancura relativa. (Según la norma UNE 72-322-85). . . . .	III.53
III.3.2.1.- Resultados obtenidos de la evaluación de la blancura relativa de las segundas pruebas realizadas. . . . .	III.55
III.3.3.- Ensayo acelerado de amarilleo. Según la norma UNE 48-071-82. . . . .	III.56
III.3.3.1.- Resultados obtenidos del ensayo acelerado de amarilleo de las segundas pruebas realizadas. . . . .	III.59
III.3.4.- Ensayo acelerado de envejecimiento. Determinación de diferencias de color según el sistema CIELAB. . . . .	III.59

III.3.4.1.- Resultados obtenidos del ensayo de diferencias de color de las segundas pruebas realizadas. ....	III.66
III.3.5.- Resultados finales obtenidos de las segundas pruebas de Colorimetría. ....	III.69
III.4.- 3 <sup>AS</sup> PRUEBAS REALIZADAS. ....	III.72
III.4.1.- Introducción a las terceras pruebas. ....	III.72
III.4.2.- Evaluación de la blancura relativa. (Según la norma UNE 72-322-85). ....	III.74
III.4.2.1.- Resultados obtenidos de la evaluación de la blancura relativa de las segundas pruebas realizadas. ....	III.77
III.4.3.- Ensayo acelerado de envejecimiento. Determinación de diferencias de color según el sistema CIELAB. ....	III.79
III.4.3.1.- Resultados obtenidos del ensayo de diferencias de color de las terceras pruebas realizadas. ....	III.87
III.4.4.- Resultados finales obtenidos de las terceras pruebas de Colorimetría. ....	III.101

**CAPÍTULO IV.- POSIBILIDADES ARTÍSTICAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS AVANZADOS.**

<b>REALIZACIONES. ....</b>	<b>IV.1</b>
IV.1.- INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO. ....	IV.2
IV.2.- REQUERIMIENTOS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS PARA SU EMPLEO EN SOPORTES PARA FINES ARTÍSTICOS.. ....	IV.5
IV.2.1.- Requerimientos para soportes móviles destinados a la realización artística ....	IV.6
IV.2.2.- Requerimientos para realización y conservación de pintura mural. ....	IV.10

IV.3.- SOPORTE CON LAMINADO MONOLÍTICO DE FIBRA DE CARBONO.	
DESCRIPCIÓN TÉCNICA. . . . .	IV.13
IV.3.1.- Ventajas para traslados en restauración de pintura mural. . . . .	IV.20
IV.3.2.- Ventajas del nuevo soporte móvil para realización de pintura mural. . . . .	IV.27
IV.3.3.- Ventajas como soporte para pintura de caballete.. . . .	IV.29
IV.4.- REALIZACIONES BASADAS EN EL LAMINADO DE FIBRA DE CARBONO. . . . .	IV.31
IV.4.1.- Experiencia de traslado de pintura mural. . . . .	IV.33
IV.4.1.1.- Realización del soporte. . . . .	IV.33
IV.4.1.2.- El arranque. . . . .	IV.34
IV.4.2.-Experiencia de realización de un soporte móvil para pintura mural. . . . .	IV.37
IV.4.2.1.- Realización del soporte móvil. . . . .	IV.37
IV.4.2.2.- Proceso de realización del fresco en el nuevo soporte. . . . .	IV.39
IV.4.3.- Experiencia de realización de un soporte para pintura de caballete.. . . .	IV.41
IV.4.4.- Propuesta para la capa de intervención. . . . .	IV.42
IV.5.- REALIZACIÓN DE SOPORTES BASADOS EN UNA LÁMINA SIMPLE. . .	IV. 45
IV.5.1.- Propuesta de un soporte basado en una lámina simple de tejido de fibra de carbono. . . . .	IV.47
IV.5.2.- Aplicaciones de las diferentes armaduras. . . . .	IV. 49
IV.5.3.- Realización por vía húmeda y moldeo por contacto manual. . . . .	IV.51
IV.5.4.- Realización con preimpregnado y moldeo por contacto con vacío y calor. . . . .	IV.53
IV.5.5.- Realización con preimpregnado y un método de fabricación libre. . . .	IV. 57

<b>CAPITULO V:</b>	<b>CONCLUSIONES Y LINEAS DE</b>	
	<b>INVESTIGACIÓN ABIERTAS.</b>	<b>..... V.1</b>
<b>V.1.- CONCLUSIONES FINALES</b>	<b>.....</b>	<b>V.2</b>
<b>V.2.- LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN ABIERTAS</b>	<b>.....</b>	<b>V.20</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>.....</b>	<b>Bi.1</b>
<b>ANEXO I</b>	<b>.....</b>	<b>A.I.1</b>
<b>ANEXO II</b>	<b>.....</b>	<b>A.II.1</b>

# **CAPITULO I**

**INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y**

**METODOLOGÍA.**

## **I.1.- INTRODUCCIÓN A LA TESIS DOCTORAL, OBJETIVOS Y METODOLOGÍA. RESUMEN DE CONTENIDOS.**

Históricamente el Arte ha tenido un desarrollo paralelo a las Ciencias utilizando tanto los nuevos materiales que iban apareciendo como sus tratamientos, formas de obtención, etc. Las propiedades particulares de cada uno de estos materiales les hacían válidos para el artista en la medida en que le solucionaban problemas técnicos supliendo las carencias de los que estaba utilizando hasta entonces y abrían nuevas posibilidades de expresión plástica. De igual manera han sido utilizados en la restauración de obras de arte, solucionando los problemas de degradación y mejorando su durabilidad.

En la actualidad es conocido que cualquiera de los materiales tradicionales utilizados como soportes sufre un proceso de deterioro con el paso del tiempo que pone en peligro la obra de arte.

Teniendo esto en cuenta, se hace necesario el ensayo con nuevos materiales que puedan aportar soluciones a estos problemas y mejorar el rendimiento de los actuales soportes artísticos. Este trabajo se encuentra favorecido por el carácter cambiante, fugaz, del arte de este final de siglo y la incorporación de materiales cotidianos que aportan nuevas soluciones estéticas.

El objetivo de la presente Tesis Doctoral es el estudio de algunos materiales compuestos para su utilización en las obras de arte, en especial las fibras de carbono y las de vidrio con todas sus posibilidades, con las que se experimentará para determinar las propiedades físicas, químicas y mecánicas que van a resultar útiles para su uso artístico, tanto por sí mismos como en la fabricación de soportes que garanticen un mayor nivel de conservación de las obras de arte realizadas sobre ellos, así como para su empleo en restauración aportando soluciones a los problemas de deterioro de los soportes tradicionales. Se realizará también una investigación práctica acerca de sus comportamientos estéticos al actuar sobre él de una manera premeditada, tratando de conseguir las formas más idóneas como idea final de obra de arte.

Así, se considerará objetivo primario la obtención mediante experimentación del mayor número de datos referidos al comportamiento, propiedades, conservación y posibilidades artísticas del material objeto de análisis con el fin de aportar soluciones a los problemas planteados actualmente por la degradación de los soportes de las obras de arte y realizar nuevas propuestas de formulaciones artísticas.

Se comparará con los materiales actualmente utilizados y se intentarán ofrecer nuevas fórmulas estéticas, tanto para la obra pictórica como escultórica.

Son también objetivos de la investigación propuesta el estudio de viabilidad de estos nuevos soportes y de su proceso de elaboración, así como el análisis de la influencia de las variables del proceso sobre el resultado final, posibles tratamientos superficiales y problemas observados en el comportamiento de la obra terminada. De igual forma, se tratará de establecer

una catalogación parcial de técnicas de actuación a la hora de realizar o restaurar obras de arte que se complementarían con toda una serie de propuestas acerca de sus posibilidades y conveniencia de actuación, de acuerdo con las características particulares de cada una y los tratamientos más oportunos en cada caso.

Por último, se realizará una recopilación bibliográfica de las experiencias realizadas hasta la actualidad con estos materiales en el terreno de la creación artística así como en el de la restauración.

El contenido de cada uno de los capítulos es el siguiente:

En el capítulo I se hace un resumen de los problemas planteados así como de los objetivos de la presente Tesis Doctoral.

En el capítulo II se realiza una visión de la evolución histórica de los soportes y de la situación actual en el campo de la utilización de los materiales compuestos para este fin.

Este capítulo consta de cinco partes:

- Resumen histórico de la evolución de los soportes artísticos tradicionales con sus ventajas e inconvenientes.

- Definición y clasificación de los materiales compuestos convencionales y materiales compuestos avanzados, donde se describen las propiedades genéricas de ambos materiales y se establece una comparación entre ellos. Se tratan los procedimientos de fabricación y almacenaje y las condiciones ideales para ello, además de los problemas que pueden presentarse cuando la fabricación se produce en condiciones desfavorables. Todo ello se ha tomado de campos específicos de los que procede la utilización de estos materiales, el campo industrial y el aeronáutico con la intención de completar los escasos conocimientos existentes a menudo sobre este tema en campos artísticos.
- Los materiales compuestos convencionales y materiales compuestos avanzados han sido utilizados en restauración de obras de arte, solucionando los problemas de degradación y mejorando su durabilidad. Se resumen los problemas que existían hasta entonces y los que soluciona la utilización de estos materiales
- La utilización de los materiales compuestos en la creación artística se ha desarrollado paralelamente a su aparición en otros campos. Las propiedades particulares de estos materiales les hacían especialmente atractivos para la realización escultórica. Se resumen los métodos de trabajo y las nuevas posibilidades que se abrieron analizando sus ventajas y desventajas. En pintura y en otras formulaciones artísticas estos materiales compuestos han tenido igualmente una gran cantidad de aplicaciones, se estudiarán los tipos de soportes en estos materiales y sus procesos de realización con sus posibilidades y conveniencia de utilización.

- Relación de algunos autores emblemáticos que utilizaron materiales compuestos y de los movimientos (como el minimalismo y los artistas del "Process") que estaban interesados en explotar la utilización del material industrial, no tradicional, en sus obras, haciendo un desarrollo histórico.

En el Capítulo III se expone la utilización de la Colorimetría Industrial como base para la determinación del comportamiento de los materiales compuestos en el futuro, tratando de predecir este comportamiento a través del estudio de su degradación por agentes ambientales. En este trabajo de investigación se incluye la experimentación con diversas técnicas tradicionales para determinar su compatibilidad con estos materiales.

Se describen además los ensayos realizados por medio de la colorimetría y los resultados obtenidos.

En el Capítulo IV se hace una descripción de los ensayos prácticos realizados, aplicando los diversos soportes en campos como la pintura, la escultura y la restauración.

En dichos ensayos se ha tratado de determinar la viabilidad de los materiales compuestos avanzados atendiendo a la complejidad del proceso de elaboración del soporte y a la calidad de los resultados obtenidos.

El Capítulo V resume las conclusiones de la Tesis Doctoral, catalogación parcial de técnicas de actuación y perspectivas de futuro.

Esta tesis se ha planteado con un concepto de obra abierta, tratando de servir de punto de partida para futuros estudios sobre este tema y dejando la posibilidad de nuevos desarrollos que produzcan nuevas soluciones y propuestas. De igual modo, el descubrimiento de las posibilidades de unos materiales no utilizados anteriormente para fines artísticos y darle una serie de aplicaciones en este campo debe abrir un nuevo camino para la experimentación y el desarrollo de otros usos. Como trabajo abierto requiere, pues, una investigación y seguimiento continuos de los nuevos avances y las aportaciones de los últimos estudios sobre materiales.

El desarrollo de la parte teórica de la presente tesis doctoral ha estado basada en la consulta de fuentes bibliográficas y la recopilación de información en diversas bases de datos, realizadas con la colaboración del laboratorio de metalotécnica de la E.T.S. de Ingenieros Navales y que tenían como finalidad la elaboración de un estado de la cuestión lo más riguroso posible.

La parte experimental ha tenido una primera fase en la que se han realizado ensayos para la determinación de la validez de los materiales objeto de estudio para su empleo en la fabricación de soportes para fines artísticos. Estos ensayos se han centrado en la realización de pruebas destinadas a tratar de conocer el comportamiento de los materiales en un plazo largo de tiempo, sometidos a la acción de diversos agentes de deterioro. Esta fase se realizó en parte durante el curso de 3<sup>er</sup> ciclo "Curso de colorimetría industrial", impartido por la E.T.S. de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, y el resto en el Laboratorio de Física y Química de la Facultad de Bellas Artes de la Universidad Complutense de Madrid<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Las muestras utilizadas para la realización de esta parte del estudio experimental se encontrarán expuestas para su examen el día de la lectura de la presente tesis.

En una segunda fase se ha realizado un estudio experimental de las posibilidades de utilización de los materiales compuestos avanzados analizados en la elaboración de estructuras en el campo de la creación artística y la conservación-restauración, así como la propuesta de diversos modelos de utilidad para estos fines.

Esta investigación se encuentra ilustrada por diversa documentación fotográfica, esquemas y dibujos aclaratorios e incluye diversos apéndices donde se recoge la documentación aportada por empresas y casas comerciales, así como datos obtenidos en los ensayos colorimétricos. También aparece un listado de las empresas, casas comerciales, bases de datos, bibliotecas y otras instituciones consultadas.

## **CAPITULO II**

### **EVOLUCIÓN Y VISIÓN ACTUAL DE**

### **LOS SOPORTES BASADOS EN MATERIALES**

### **COMPUESTOS**



## II.1.- INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO

En el arte aparecen continuamente nuevas ideas que traen consigo cambios evolutivos de tipo estético. Estos cambios se desarrollan paralelamente a la evolución del ser humano en otros aspectos. Cuando nace una nueva tendencia artística lo hace con la necesidad de superar tanto los antiguos conceptos en los que se basaron las tendencias anteriores como sus métodos técnicos.

Los desarrollos estéticos vienen dados más bien por un cambio de mentalidad, por unas nuevas ideas regeneradoras. Es entonces el momento de crear nuevas formas de realización artística, nuevos métodos de trabajo. Los artistas se sienten en la necesidad de utilizar, paralelamente a sus nuevas ideas, nuevos materiales y, por tanto, nuevas formas generadoras de arte.

Ellos utilizan los nuevos descubrimientos de sus épocas o las nuevas técnicas de otros campos, sacándolas de su contexto y haciéndolas suyas para poder exponer de un modo suficientemente claro y fluido sus ideas, las cuales de ningún otro modo podían haber sido expresadas con los métodos anteriores<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Ver también: MAYER, Ralph, *Materiales y técnicas del arte*, Tursen Herman Blume, Madrid, 1993, pág. 275-276.

Según indica Theodor W. Adorno "... las formas de proceder más avanzadas en la producción material y en su organización no se limitan al ámbito en el que originariamente brotaron. Desde él iluminan otras zonas de la vida muy alejadas, de una forma apenas analizada por la sociología, y llegan hasta zonas profundas de la experiencia subjetiva..."<sup>2</sup>

Así, se puede ver que a lo largo de la historia del ser humano se han venido produciendo cambios industriales y económicos que produjeron nuevos descubrimientos y éstos fueron absorbidos por las ideas generadoras de artistas de su época. En varios momentos históricos los cambios artísticos han estado estrechamente relacionados con cambios económicos.

En este sentido puede considerarse el cambio que se produjo en el Renacimiento donde el pensamiento humanista de sus artistas pudo ser representado con todo su esplendor gracias al cambio que introdujeron en sus técnicas, pasando de un soporte poco manejable como era la madera, a otro como la tela. Esta última resultaba mucho más ligera y transportable y representaba el soporte ideal para la técnica al óleo, permitiendo plasmar mejor la luminosidad ambiental y las perspectivas. Además, era considerablemente más barata.

Los soportes utilizados en épocas pasadas se muestran, de igual modo, incapaces de plasmar algunos de los conceptos actuales. En la época presente los creadores pueden no sentirse en algunos casos representados con la utilización de técnicas tradicionales y trabajan en estilos

---

<sup>2</sup> ADORNO, Theodor W., *Teoría estética*, Taurus, pág. 53.

que se alejan totalmente de los conceptos anteriores del arte. En este punto se hace importante la historicidad del propio artista; él es hijo de su época y, por lo tanto, receptor de su tiempo, por lo que su condición es totalmente divergente de los artistas de tiempos pasados.

Este concepto de renovación tiene su origen esencial en una nueva intención creativa del artista, ya que *"... es imposible olvidar los procesos mentales y la intencionalidad cuando se discuten los métodos de ejecución. Por tanto, para cada artista hay que establecer la naturaleza de las relaciones entre tres elementos: la materia prima, los procesos manuales y mecánicos y la intencionalidad."*<sup>3</sup>

Los nuevos creadores tienen la necesidad de encontrar un nuevo alfabeto que les permita expresar sus nuevas ideas, un nuevo lenguaje, nuevas técnicas y nuevos materiales para cumplir los objetivos que se han marcado previamente. Por ello, muchos artistas del siglo XX han utilizado el lenguaje industrial, haciendo uso de sus productos y de sus técnicas. Este es el caso de los materiales compuestos.

En épocas anteriores al siglo XX los artistas habían estado trabajando en materiales y técnicas que pueden considerarse tradicionales, pero el espíritu creativo de los artistas de este siglo y sus ideas revolucionarias cambiaron los conceptos artísticos y propusieron nuevas soluciones para responder a unos nuevos horizontes vislumbrados, que los métodos, materiales y técnicas tradicionales de ningún modo podían resolver.

---

<sup>3</sup> AA.VV., *Técnicas de los artistas modernos*, Herman Blume, Madrid, 1983. pág. 12.

Los materiales compuestos han aportado muchas soluciones válidas para algunos artistas durante el transcurso de nuestro siglo y aún lo siguen haciendo. En este campo, como en otros, se necesita la adquisición de unos conocimientos previos para trabajar con estos materiales.

## II.2.- SOPORTES TRADICIONALES

Se expone en este punto, a modo de introducción, una panorámica resumida de los soportes artísticos tradicionales, haciendo referencia especialmente a aquéllos que se han mantenido vigentes con el paso del tiempo. Se trata también de los problemas que éstos presentan respecto a la conservación de las obras realizadas sobre ellos.

Lienzos de diferentes tejidos, maderas, contrachapados, entelados, cartones... son muchos los materiales que se pueden englobar en el término de soportes tradicionales. En la actualidad existen gran número de sectores en los que la utilización de estos materiales se realiza aun de manera casi exclusiva.<sup>4</sup>

El conocimiento de las técnicas y métodos tradicionales permitirá al artista utilizarlos para sus propios fines y para expresar sus propias ideas, sin necesidad de ajustarse a los conceptos anteriores a su época. En palabras de Ralph Mayer:

---

<sup>4</sup> DOERNER, M., *Los materiales de pintura y su empleo en el arte*, Reverte S.A, Barcelona, 1986, pág 127-128.

*"... Al analizar los procedimientos de épocas pasadas, que se emplearon para crear efectos que a menudo difieren por completo de los criterios actuales, lo que nos interesa es adaptarlos a nuestros propios fines, no duplicar los antiguos efectos..."<sup>5</sup>*

De todos estos materiales son la tela y la madera los más generalizados entre los artistas, quienes los utilizan aprovechando sus características.

## **II.2.1.- LA MADERA**

La madera es un material de origen natural cuyos principales componentes son la celulosa, la lignina, algunos glúcidos y, en pequeñas cantidades, algunas sales minerales y proteínas<sup>6</sup>.

Su utilización como soporte para pintura de caballete se produjo de una manera generalizada en la antigüedad clásica, y ya existían entonces una serie de recomendaciones específicas con respecto a la elaboración de los soportes.

---

<sup>5</sup> MAYER, op. cit., pág. 23.

<sup>6</sup> Consultar: DOERNER, op. cit., pág. 131 y DÍAZ-MARTOS, Arturo, *Restauración y Conservación del arte pictórico*, Arte Restauro S.A., Madrid, 1975, pág. 13.

Estas recomendaciones consistían principalmente en aconsejar la conveniencia de utilizar preferentemente maderas como la de cedro, ciprés o acacia, entre otras<sup>7</sup>. Tal como cita Ralph Mayer:

*"Los antiguos italianos elegían principalmente madera de álamo para pintar. Los pintores nórdicos utilizaban roble. Las tablas empleadas por los pintores nórdicos de los siglos XVIII y XIX eran generalmente de caoba..."<sup>8</sup>.*

En todo caso, la utilización de los diversos tipos de maderas ha estado condicionada por las variedades existentes en cada región<sup>9</sup>.

La evolución histórica del soporte de madera está estrechamente ligada a los iconos y los retablos y su declive comienza con la fuerte expansión de la tela como soporte que se produjo en el siglo XVI. Hoy en día se ha generalizado la utilización de los laminados de abedul para finalidades artísticas, aunque muchos de los pintores actuales siguen prefiriendo trabajar con tableros macizos.

---

<sup>7</sup> Examinar también: DOERNER, *Ibidem* y LAURIE, A. P., *La práctica de la pintura*, Librería y Editorial Hernando, S.A., Madrid, 1935, pág. 49.

<sup>8</sup> MAYER, *op. cit.*, pág. 318.

<sup>9</sup> Ver también: HUERTAS TORREJÓN, Manuel, Tesis doctoral *Recopilación de las técnicas pictóricas contenidas en los tratados españoles de los siglos XVII y XVIII, su reconstrucción y adecuación a las necesidades plásticas actuales*, Universidad Complutense, Madrid, .

### **II.2.1.1.- AGENTES DE DETERIORO DE LA MADERA**

Son las propias características de la madera las que van a determinar cuáles van a ser sus principales agentes de deterioro.<sup>10</sup> La madera es un material anisótropo, es decir, que presenta propiedades diferentes en direcciones diferentes. Por ejemplo su comportamiento ante las tensiones no es el mismo en direcciones distintas. Esto provoca que se produzcan reacciones distintas en las diferentes partes del soporte cuando se ejerce una presión sobre él, lo que puede producir deformaciones y grietas en su estructura que causen desperfectos en la capa pictórica<sup>11</sup>.

Estos mismos problemas pueden presentarse debido a la plasticidad y elasticidad de la madera, ya que, al ser sometido a cargas, este material tiende a deformarse. Unas condiciones desfavorables de humedad y temperatura del ambiente pueden incrementar los efectos negativos de estos agentes sobre la madera.

Por otra parte, la madera es muy higroscópica, es decir, tiene una gran tendencia a absorber agua en un ambiente húmedo y a cederla en un ambiente seco. Esto produce movimientos de contracción y dilatación que afectan también a la capa pictórica.

---

<sup>10</sup> El apunte en este apartado de cuáles son los principales agentes de deterioro de la madera y, más adelante, los de la tela (recogidos ambos en múltiples tratados sobre soportes), pretende solamente realizar un recordatorio de algunos de los problemas que presentan los soportes tradicionales, así como justificar la búsqueda, llevada a cabo durante siglos, de estructuras más estables.

<sup>11</sup> Examinar como ejemplo: DÍAZ-MARTOS, op. cit., pág. 19.

Otras grandes causas de desperfectos en los soportes de madera son los ataques de insectos y las degradaciones químicas por oxidación provocadas por los clavos de sujeción del soporte pictórico<sup>12</sup>.

## II.2.2.- LA TELA

En general, las telas usadas como soporte para fines artísticos están fabricadas con fibras de origen vegetal aunque, con menor frecuencia, también se han usado fibras de origen animal como la seda<sup>13</sup>.

Según se afirma en los tratados sobre el tema<sup>14</sup>, los soportes basados en tejidos de fibras naturales comenzaron a utilizarse en Egipto y en Bizancio y se encontraban en todo momento adosados a un refuerzo de madera. Poco a poco los artistas fueron readaptando este refuerzo tan pesado, convirtiéndose pronto en un bastidor. A finales del siglo XV el intenso comercio de Venecia favoreció la implantación de los tejidos y estos sustituyeron en gran medida a los soportes fabricados exclusivamente de madera.

---

<sup>12</sup> Mirar también: AA.VV., *Introducción a la historia del arte. Fundamentos teóricos y lenguajes artísticos*, Barcanova, S.A., Barcelona, 1990, pág. 140.

<sup>13</sup> DOERNER, op. cit., pág. 127.

<sup>14</sup> Consultar por ejemplo: ESCOHOTADO IBOR, María Teresa, Tesis Doctoral *Conservación y restauración de la pintura actual*, UCM, Madrid, 1985, BAZZI, María, *Enciclopedia de las técnicas pictóricas*, Editorial Noguer, Milán, 1965, o LOSOS, Ludvik, *Las técnicas de la pintura*, Aventium, Praga, 1990, pág. 86.

Así, en Europa se empezaron a utilizar los lienzos o telas por primera vez como soportes pictóricos en Italia durante el siglo XV, usados en ceremonias conmemorativas como celebraciones militares y eclesiásticas. En estos eventos se empleaban con una función representativa en banderas, estandartes e imágenes de santos que eran sacados fuera de los edificios durante desfiles y procesiones.

Aparte del uso al exterior, en esa misma época se realizaron también obras pensadas para interiores en las que ya se sustituía el soporte tradicional de madera por otro de tela con un bastidor. En este grupo de obras se encuentra "El nacimiento de Venus" de Botticelli, datado en la década de los 80 del siglo XV<sup>15</sup>.

La tela aportaba unas nuevas condiciones tanto estéticas como estructurales que fueron muy apreciadas<sup>16</sup> y su utilización y conservación se hacían más fáciles al ser un soporte ligero y flexible. De igual modo, su adquisición se hacía a un menor coste que en el caso de la madera. Así, en el siglo XVI su difusión fue enorme en todo Occidente.

Respecto a la producción de telas, la primera industria de fabricación textil de la seda aparece en España durante el dominio árabe, mientras que en Italia esto ocurre en el siglo XII. Posteriormente la industria fue proporcionando otras fibras de mayor resistencia y más económicas a los artistas; así, tanto el algodón como el lino o el cáñamo extendieron su uso

---

<sup>15</sup> THOMPSON, D.V., *The materials and techniques of medieval painting*, Dover Publications, New York, pág 37-38.

<sup>16</sup> Consultar por ejemplo: HUERTAS TORREJÓN, Op. cit., pág. 94.

gracias a la mayor facilidad de su tratamiento. El mayor impulso en la difusión de estas fibras lo supuso la adopción generalizada de la técnica del óleo durante el siglo XVI y el hecho de que los aceites afectaran a la seda produciendo graves deterioros<sup>17</sup>.

El algodón era, de estas fibras, la menos utilizada debido a ser la menos resistente y la que más se ve afectada por los cambios ambientales. Aun así, hoy en día se sigue empleando por su bajo coste sin tener en cuenta los posibles daños posteriores.

Los lienzos de algodón comenzaron a utilizarse cuando se empezó a producir de un modo industrial esta fibra, pero en comparación con los de lino los soportes realizados en algodón tenían un rendimiento inferior ya que su superficie suele ser deficiente, son más difíciles de estirar y suelen presentar problemas a la hora de aplicar la cola o la imprimación.

Los mejores lienzos de fibra natural son los fabricados a base de lino puro, con una trama apretada y con un equilibrio de tensión y peso entre las fibras de la trama y las de la urdimbre, (tejido equilibrado).

El concepto de tela o lienzo se ha ampliado en los últimos tiempos hasta designar tanto el soporte pensado para recibir la obra pictórica como la obra ya acabada. El soporte de tela ha tenido una enorme divulgación hasta la época actual, siendo éste el soporte utilizado de forma mayoritaria por los pintores actuales<sup>18</sup>.

---

<sup>17</sup> Ver: DÍAZ-MARTOS, op. cit., pág. 62.

<sup>18</sup> MAYER, *Ibidem*.

### II.2.2.1.- FIBRAS NATURALES

Las fibras naturales son aquellas que se producen en un medio natural<sup>19</sup>. Dentro de este grupo, las fibras que más se han utilizado dentro del terreno artístico son las fibras de lino y las de algodón, aunque antiguamente también tuvo una gran difusión la seda<sup>20</sup>.

#### a) Fibras de lino.

Se obtiene del liber del tallo del lino<sup>21</sup>. Aunque se han encontrado restos de esta fibra en asentamientos prehistóricos, el primer cultivo que se conoce de la planta del lino es en la civilización egipcia. Posteriormente serían los romanos quienes hicieran una mayor difusión de su empleo<sup>22</sup>.

---

<sup>19</sup> Este tipo de fibras se encuentran definidas en la norma UNE 40-452-83.

<sup>20</sup> Ver clasificación de las fibras textiles en la pág.26.

<sup>21</sup> Denominación y descripción de las fibras de lino. B.O.E. nº 170. Viernes 17/71 1.987. Pág. 21876. Real Decreto 928/1.987 de 5 de junio.

<sup>22</sup> Examinar también: DOERNER, op. cit., pág. 128, DÍAZ-MARTOS, op. cit., pág. 66 y GACÉN GUILLÉN, J., *Fibras textiles (propiedades y descripción)*, Universitat Politècnica de Catalunya, Terrasa, 1991, pág. 164.

## b) Fibras de algodón.

Proceden del interior de la semilla del algodón. Los textiles de algodón se utilizaban en China, India, Egipto y Perú miles de años antes de la era cristiana pero en Europa no se difundió hasta que llegó procedente de África hacia el año 1.000.

Los primeros cultivos de esta planta se iniciaron en Estados Unidos durante los siglos XVII y XVIII y experimentaron un gran impulso a partir de la invención en 1.793 de la máquina desmotadora que facilitaba la extracción de las semillas del algodón en rama<sup>23</sup>.

## c) Seda

Fabricada a partir de un hilo continuo, delgado y brillante segregado por las larvas de algunos insectos, sobre todo el llamado gusano de seda. Este hilo está compuesto por filamentos proteínicos y es resistente y fácilmente coloreable.

---

<sup>23</sup> DOERNER, op. cit., pág. 128 y GACÉN, op. cit., pág. 153.

## **II.2.2.2.- TEJIDOS DE FIBRAS NATURALES**

### **II.2.2.2.1.- Estructura de los tejidos naturales.**

La elección de la estructura de tejido a utilizar en la elaboración de un soporte es un punto de gran trascendencia si se tienen en cuenta las diferentes características que presenta cada una de ellas y las múltiples soluciones que pueden plantearse aprovechando sus propiedades.

Para hablar de la estructura de un tejido<sup>24</sup> se hace necesario tener una visión del hilo como el elemento simple que forma parte de ella.

De forma genérica puede considerarse al hilo como un conjunto de fibras a las que se ha dado una unión para formar un cuerpo fino y alargado, de forma cilíndrica y cuyas características de flexibilidad y resistencia sean superiores a las de la fibra aislada.

El hilo puede estar constituido en sí mismo por fibras cortas unidas entre sí a las que normalmente se aplica una torsión para evitar deslizamientos o por uno o varios filamentos continuos de fibras largas. Además, pueden realizarse combinaciones de dos o más hilos,

---

<sup>24</sup> Revisar: AA.VV., *Nociones generales de hilos, texturas, feltros, etc... realizados con fibras, utilizados como refuerzos en materiales compuestos*, C.A.S.A. y norma UNE 40-018-75 (donde se encuentra definido el concepto de hilo).

normalmente similares, para obtener otros con estructuras de características más adecuadas para las aplicaciones a que se vayan a destinar. Esta combinación de varios hilos puede realizarse mediante torsión o por unión simple sin torsión.

Los hilos pueden disponerse con diferentes entrecruzamientos entre sí para dar lugar a los denominados tejidos. Cuando esta disposición consiste en una distribución de forma aleatoria de hilos cortos en el plano, sin tejer, se conoce como fieltro<sup>25</sup>.

Los tejidos propiamente dichos van a venir determinados en su estructura por una serie de elementos fundamentales como son<sup>26</sup>:

Urdimbre.- Conjunto de hilos que se disponen de forma longitudinal en el tejido.

Trama.- Conjunto de hilos que se disponen en el sentido transversal del tejido.

Cruzamiento.- Un cruzamiento es el paso de cada hilo de trama por encima (salto) o por debajo (cogido) de cada hilo de urdimbre.

---

<sup>25</sup> Puede encontrarse una definición del concepto de "no tejido" en la norma UNE-EN 29092.

<sup>26</sup> Ver para más datos: DÍAZ-MARTOS, op. cit., pág. 61, URKULLO POLO, M. Teresa, Tesis doctoral: *Investigación del comportamiento de algunos textiles utilizados como soporte de pintura como fuente de documentación en procesos de restauración*, Facultad de Bellas Artes, UCM, Madrid, 1992, pág 317 y DOERNER, M., Op. cit., pág 127.

Ligamento o Armadura.- Definido por el modo en que se distribuyen los cruzamientos de hilos en el tejido, es decir, la proporción de saltos y cogidos a lo largo de cada uno de ellos.

Las variaciones en la estructura de los tejidos dan lugar a una serie de características derivadas de ella.

Las estructuras usadas con mayor frecuencia para la elaboración de soportes artísticos han sido el tafetán, la sarga y el satén.

El tafetán es la estructura que tiene el ligamento más sencillo. Tiene un curso cuadrado en el que cada hilo de trama va cruzando por encima y por debajo del hilo de urdimbre de forma alterna.

La sarga se caracteriza porque su alineado regular produce en su superficie unas líneas inclinadas a 45°. En este tipo de tejido el número de hilos en urdimbre y trama que pasa sobre el otro puede ser variable para dar sargas de diferentes tipos.

El tejido satén tiene una estructura similar a la de las sargas pero se diferencia de ellas en que hay un número mayor de hilos de urdimbre y de trama que pasan sobre cada uno antes de

entrelazarse. El entrecruzamiento de fibras se produce de manera que en una cara del tejido se muestran principalmente hilos en urdimbre y en la otra hilos en trama<sup>27</sup>

### **II.2.2.3.- AGENTES DE DETERIORO DE LA TELA**

Como se ha dicho, las fibras naturales usadas como soportes son principalmente de origen vegetal y se componen en su mayor parte de celulosa, estando expuestas, por tanto, a un proceso de envejecimiento progresivo asociado en gran parte al de ésta<sup>28</sup>. Este proceso de deterioro se ve favorecido por la presencia de agentes como humedad en el ambiente, luz, temperaturas poco apropiadas y otras agresiones de tipo mecánico o químico.

La utilización de soportes fabricados con fibras naturales presenta así una serie de inconvenientes que es necesario tener en cuenta y que se deben principalmente a la propia naturaleza de las fibras<sup>29</sup>, siendo los componentes principales de cada tipo de fibra los que van a condicionar en mayor medida los procesos de deterioro de las mismas y su comportamiento ante los agentes externos.

---

<sup>27</sup> Pueden verse otros entramados en: URKULLO POLO, Op. cit., pág. 317.

<sup>28</sup> Ver: *Ibidem* y degradación de las fibras textiles en URKULLO POLO, Op. cit.

<sup>29</sup> Consultar además: HUERTAS TORREJÓN, Manuel, Tesis doctoral *Recopilación de las técnicas pictóricas contenidas en los tratados españoles de los siglos XVII y XVIII, su reconstrucción y adecuación a las necesidades plásticas actuales*, Universidad Complutense, Madrid, pág. 94.

En este sentido, debido a la composición diferente de las fibras de lino y algodón, se observa en ésta última un comportamiento más deficiente en presencia de agua que en la de lino. Además, las mezclas de fibras de lino y de algodón tienen aun un peor comportamiento que los tejidos de algodón puro, debido a que en ellos se originan tensiones a causa de la diferente capacidad de absorción de humedad de cada uno de los tipos de fibra.

En general, todas las fibras naturales se caracterizan por su alto contenido de humedad, pasando ésta con facilidad de unas fibras a otras<sup>30</sup>. Así por ejemplo, los valores de recuperación de humedad<sup>31</sup> en las fibras más comúnmente usadas se sitúan entre el 7 y el 11% en la fibra de algodón y aproximadamente en el 12% en la de lino.

Los principales agentes de deterioro de las telas son<sup>32</sup>:

a).- Movimientos de dilatación y contracción provocados en las telas debido a absorciones de humedad procedente del ambiente y pérdidas de la misma. Con el paso del tiempo, las telas van perdiendo su capacidad para dilatarse y contraerse ya que su estructura se va debilitando.

Estos movimientos provocados en el tejido van a afectar a la capa pictórica al originarse tensiones en las fibras que pueden causar graves deterioros.

---

<sup>30</sup> Esta propiedad es debida a la presencia de grupos químicos que retienen el agua.

<sup>31</sup> Datos extraídos de GACÉN GUILLÉN, Joaquín, *Fibras textiles*, Universitat Politècnica de Catalunya, Terrasa, 1991. pág. 54-55.

<sup>32</sup> Para más información consultar: DÍAZ-MARTOS, op. cit., pág. 68.

b).- Oxidación provocada por el contacto con el oxígeno del aire y favorecida por la presencia de piezas de hierro o por la descomposición de los aceites secativos grasos utilizados en las técnicas al óleo. Este proceso químico descompone la celulosa de las fibras vegetales y provoca su debilitamiento, haciendo que se rompan con facilidad. Este deterioro resulta irreversible.

c).- Acción de los ácidos que se encuentran disueltos en el aire por la contaminación atmosférica. Estos agentes químicos aceleran el proceso de deterioro de las sustancias que forman las fibras.

d).- Presencia de hongos. Además de los ácidos, citados anteriormente, y las bacterias son los principales causantes de los procesos de la destrucción de la celulosa, haciendo que los soportes se pudran, deteriorándolos y provocando manchas en la capa pictórica. En casos extremos puede provocar desprendimientos y roturas de las fibras.

Su desarrollo se ve favorecido por la presencia de humedad y la falta de luz.

## **II.3.- MATERIALES COMPUESTOS**

Después del tratamiento de forma breve de los que, de forma generalizada, se conocen como soportes tradicionales, se va a introducir en este punto el concepto de materiales compuestos, los cuales van a servir de base para la fabricación de los soportes artísticos considerados no tradicionales. Este tipo de soportes serán objeto de tratamiento más adelante en esta tesis, en el apartado II.4<sup>33</sup>.

El contenido de este apartado está tomado de los estudios realizados sobre los materiales compuestos en los campos industrial, naval y aeronáutico, de los cuales procede la utilización de este tipo de materiales.

Se definirá en primer lugar lo que son los materiales compuestos y se relacionarán las principales clasificaciones que se han establecido de estos materiales. A continuación se tratarán en profundidad los principales componentes que forman parte de los materiales compuestos que son objeto de estudio esencial en la presente investigación.

---

<sup>33</sup> II.4.- Últimas aportaciones en soportes.

Se realiza un amplio tratamiento de los materiales compuestos debido a los escasos conocimientos que de ellos se tiene en sectores artísticos, donde se carece a menudo de las nociones previas necesarias para su utilización, conservación y restauración. Se trata de suplir dichas carencias aportando toda la información que pueda resultar útil sobre el comportamiento de los materiales y sus componentes, tanto en las condiciones ideales de utilización como en condiciones desfavorables, los métodos de fabricación y almacenaje y las precauciones que deben tomarse para su manipulación.

### **II.3.1.- CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIONES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS**

Es conveniente afirmar en primer lugar que algunos autores<sup>34</sup> consideran que el concepto de material compuesto existe en la naturaleza desde el principio de los tiempos. Este concepto es aplicable a todos aquellos materiales que resultan de la unión de otros dos, uno de los cuales hace la función de matriz y el otro la de refuerzo. Entre estos materiales compuestos naturales se encuentra la madera, ya que en su estructura la celulosa actúa como refuerzo y se encuentra impregnada en lignina que hace la función de ligante ó matriz. El hombre se ha basado en esta configuración de los materiales compuestos naturales para fabricar, a partir de la unión de dos o más materiales, unos materiales compuestos artificiales<sup>35</sup>.

---

<sup>34</sup> ASHBY, Michael I. y JONES, David R.H., *Engineering materials*, Vol. I y II, Pergamon Press, 1980.

<sup>35</sup> PARGA LANDA, B., *Aplicaciones de materiales compuestos al sector naval: introducción*, Curso de Materiales Compuestos, E.T.S. Navales, Universidad Politécnica de Madrid, 1992, pág. 1.1.-1.

Concretando más el concepto, se aplica el término de material compuesto a todo aquel que cumple estas tres propiedades:

*"... (1) Consta de dos o más materiales físicamente distintos y separables mecánicamente.*

*(2) Puede fabricarse mezclando los distintos materiales de tal forma que la dispersión de un material en el otro pueda hacerse de manera controlada para alcanzar unas propiedades óptimas.*

*(3) Las propiedades son superiores, y posiblemente únicas en algún aspecto específico, a las propiedades de los componentes por separado..."<sup>36</sup>*

Así pueden distinguirse en un material compuesto uno o más materiales que actúan como refuerzo, aportando resistencia y rigidez y un elemento ligante o matriz que va a proporcionar al compuesto protección y resistencia a la corrosión además de mantener la unión de las fibras y distribuir las tensiones.

---

<sup>36</sup> HULL, Derek, *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge University Press, 1981, pág 3.

Según el tipo de matriz puede clasificarse en:

- Materiales compuestos de matriz metálica.
- Materiales compuestos de matriz cerámica.
- Materiales compuestos de matriz polimérica<sup>37</sup>.

Si se atiende al tipo de refuerzo que llevan, pueden distinguirse también varios grupos dentro de los materiales compuestos.

- El primer tipo estaría formado por los reforzados con cargas.
- El segundo tipo serían los reforzados con fibras cortas aleatoriamente distribuidas en el plano (mats o fieltros).
- El tercer tipo estaría formado por reforzados con fibras unidireccionales o cintas.
- Un cuarto tipo serían los que incluyen tejidos como refuerzo.

---

<sup>37</sup> La presente investigación se centrará en este tipo de materiales, también llamados de matriz orgánica. Las matrices pueden ser a su vez tanto termoestables como termoplásticas.

## **CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS SEGÚN SU MATRIZ Y SEGÚN SU REFUERZO**

<b>Material compuesto</b>	- Según su matriz	<ul style="list-style-type: none"><li>- de matriz metálica</li><li>- de matriz cerámica</li><li>- de matriz polimérica</li></ul>
	- Según su refuerzo	<ul style="list-style-type: none"><li>- reforzados con cargas</li><li>- reforzados con fibras cortas o mat</li><li>- reforzados con fibras unidireccionales o cintas</li><li>- reforzados con tejidos</li></ul>

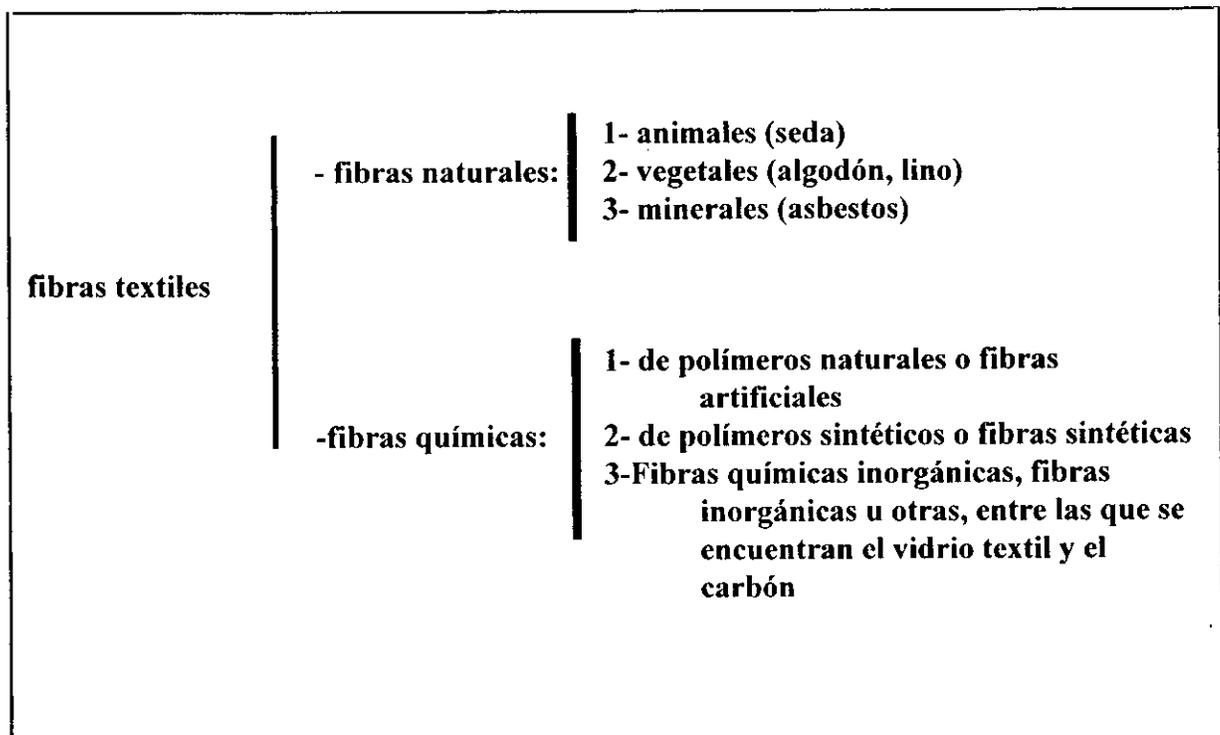
Asimismo, se ha venido haciendo dentro de los materiales compuestos una diferenciación entre los llamados materiales compuestos convencionales, que son aquéllos que constan de una matriz de poliéster y un refuerzo de fibra de vidrio, y los materiales compuestos avanzados, entre los que se cuentan los formados por resina epoxy y fibra de carbono.

Los soportes basados en materiales compuestos que más se han utilizado en el campo artístico son los constituidos por un refuerzo de fibras químicas (principalmente fibras de vidrio y fibras de carbono) y una matriz de resina. La descripción en profundidad de estos componentes, sus tipos y características es el objeto de los siguientes apartados.

### II.3.2.- FIBRAS QUÍMICAS

Una primera clasificación de las fibras textiles establece una diferenciación entre fibras naturales y fibras químicas dependiendo de si son de origen natural, por el contrario, son generadas por la acción del hombre.

En cuadro siguiente queda reflejado de un modo esquemático el criterio de clasificación adoptado en la presente tesis para la clasificación de los diferentes tipos de fibras, siendo de especial interés la ubicación de las fibras de vidrio y de carbono dentro de ella ya que se han encontrado divergencias entre varias de las fuentes consultadas sobre esta cuestión.



Clasificación de las fibras textiles

Las fibras químicas<sup>38</sup> son el resultado de una serie de procesos que se aplican sobre polímeros naturales o artificiales, o sobre otras sustancias previamente obtenidas por síntesis química, para conseguir su transformación en fibras<sup>39</sup>. Teniendo en cuenta el tipo de sustancias que van a sufrir el proceso de transformación se han definido tres grupos dentro de las fibras químicas:

- el primer grupo es el de las fibras de polímeros naturales o fibras artificiales<sup>40</sup>, que se obtienen a partir de sustancias poliméricas naturales transformadas por la acción de agentes químicos;

- el segundo grupo es el de las fibras de polímeros sintéticos, también llamadas fibras sintéticas, que se obtienen a partir de sustancias también poliméricas producidas por síntesis química<sup>41</sup>. A este tipo pertenecen las fibras de aramida utilizadas frecuentemente en construcción<sup>42</sup>.

---

<sup>38</sup> Las "fibras químicas" pueden encontrarse en algunas fuentes denominadas igualmente "fibras manufacturadas" como en la norma UNE 40-449-82, *Clasificación de fibras textiles según su origen*, o "man-made fibres" como en AA.VV., *Identification of textile materials*, The Textile Institute, Manchester, 1975.

<sup>39</sup> Ver también: GACÉN GUILLÉN, Joaquín, *Fibras textiles*, Universidad Politécnica de Cataluña, Terrasa, 1991, pág. 13, URKULLO, op.cit., pág. 254 y definición de fibras químicas en norma UNE 40-286-79.

<sup>40</sup> El término fibras artificiales se encuentra en varias fuentes, entre ellas en GACÉN GUILLÉN, Joaquín, Op. cit., pág. 13.

<sup>41</sup> Para más datos: URKULLO, op. cit., pág. 254, AA.VV., Op. cit., pág. 30 y CURRY, Robert, "Marine Applications of Advanced Composites", *Primer curso sobre materiales compuestos aplicados a la construcción naval*, Blanca Parga Landa, Madrid, 1991, pág. 1.4.5.

<sup>42</sup> Las fibras de aramida presentan propiedades mecánicas medias, superiores a las fibras de vidrio e inferiores a las de carbono. Sin embargo son fácilmente atacables por productos químicos y se degradan por la radiación solar. Por tanto, no se han considerado interesantes como alternativa a los soportes

- un tercer grupo de fibras no incluidas en ninguno de los dos anteriores y que se denominan en algunas fuentes fibras inorgánicas<sup>43</sup>. Dentro de este grupo se encuentran las fibras de vidrio y las fibras de carbono, cuyo estudio es parte esencial de los objetivos de la presente investigación.

El criterio adoptado aquí para la clasificación de estas fibras se corresponde con el que se refleja en la norma UNE 40-449-82 así como en el libro *Identification of textiles Materials*<sup>44</sup>, entre otras fuentes. Tal como se indicaba anteriormente, se han detectado una serie de desacuerdos en distintas fuentes consultadas sobre la clasificación de las fibras textiles. Aunque no es objetivo primordial de esta Tesis Doctoral la aclaración de esta controversia, se mencionan a continuación algunos de los diferentes puntos de vista debido principalmente a sus distintos criterios para clasificar las fibras de vidrio y a la importancia de éstas para la investigación que aquí se realiza.

En el libro *Diseño de hilos*<sup>45</sup>, se establece igualmente una clasificación de las fibras textiles en dos grandes grupos, la fibras naturales y las químicas. Sin embargo, se incluye la fibra de vidrio entre las fibras minerales de origen natural, citando incluso una designación de la CEE de las principales fibras textiles que las engloba dentro de ese mismo grupo.

---

tradicionales.

<sup>43</sup> Ver: AA.VV., Op. cit.. En la norma UNE 40-449-82, *Clasificación de fibras textiles según su origen*, se agrupan simplemente como "Otras".

<sup>44</sup> Norma UNE 40-449-82, *Clasificación de fibras textiles según su origen* y AA.VV., *Identification of textiles Materials*, The Textile Institute, Manchester, 1975.

<sup>45</sup> AA.VV., *Diseño de hilos*, Ediciones UPC, Barcelona, 1993, pág. 17.

En otra fuente, la de M. Teresa URKULLO POLO<sup>46</sup>, se hace una clasificación de las fibras químicas en artificiales y sintéticas y solamente menciona las fibras de vidrio para indicar su exclusión del grupo de las fibras sintéticas.

*"Las fibras sintéticas... suelen ser denominadas con el apelativo de 'no celulósicas' ya que también comprenden fibras protéicas artificiales pero excluyendo la fibra de vidrio".*

En *Introducción al diseño con composites* de Javier OROZCO MESSANA<sup>47</sup>, se distinguen tres tipos de fibras como son las fibras naturales, las sintéticas y las cerámicas, citándose las fibras de vidrio junto a las de carbono y de boro como ejemplos de fibras cerámicas.

### **II.3.2.1.- FIBRAS DE VIDRIO**

Estas fibras se fabrican mediante un proceso de fusión de vidrio, siendo la composición de éste variable según el tipo de fibras que se quiera obtener y las aplicaciones a que se vayan a destinar. Principalmente, dicha composición está basada en el sílice con adición de diferentes óxidos en cantidades muy precisas<sup>48</sup>.

---

<sup>46</sup> URKULLO POLO, M. Teresa, *Investigación del comportamiento de algunos textiles utilizados como soporte de pintura como fuente de documentación en procesos de restauración*, Facultad de Bellas Artes, UCM, Madrid, 1992, pág. 254.

<sup>47</sup> OROZCO MESSANA, Javier, *Introducción al diseño con composites*, AIMME Publicaciones, 1988.

<sup>48</sup> La norma UNE 40-286-79 especifica los componentes principales de las fibras de vidrio.



El proceso de fabricación comienza con la fusión en un tanque de una mezcla previamente triturada y amasada. Esta primera fase se realiza a unos 1550°C y durante ella se realiza la homogeneización de la mezcla y la eliminación de las posibles inclusiones gaseosas<sup>49</sup>.

Tras una fase de refinado en la que se va bajando la temperatura de un modo progresivo, el vidrio fundido alimenta una serie de recipientes cuyas bases son placas de platino y rodio perforadas y calentadas eléctricamente. El vidrio fluye por gravedad a través de varios centenares de orificios siendo estirado y enfriado para formar las fibras de entre 5 y 24 micras de diámetro<sup>50</sup>.

De forma inmediata, y antes de enrollarse sobre unos tambores, las fibras reciben un tratamiento superficial, conocido como ensimaje, que tiene como principales funciones la protección de las fibras de la abrasión en los procesos de mecanización posteriores, asegurar una buena unión entre los filamentos que las forman y favorecer su compatibilidad con las resinas de estratificación<sup>51</sup>.

La producción industrial de este tipo de fibras tiene su origen hacia el año 1940 en EE.UU<sup>52</sup>.

---

<sup>49</sup> Consultar: fibra de vidrio en MIRAVETE, Antonio, *Los nuevos materiales en la construcción*, Centro Politécnico Superior, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1994.

<sup>50</sup> Ver definición de ensimaje en Norma UNE 40-501-84.

<sup>51</sup> Este punto se ampliará más adelante al hablar del deterioro de este tipo de fibras (Apartado II.3.6.2.).

<sup>52</sup> PARGA LANDA, B., op. cit., pág 1.1.-6

Los tipos de vidrios usados más comúnmente son: el vidrio E que es el más utilizado para aplicaciones generales y posee una alta resistencia mecánica; el vidrio S, que tiene aún mejores propiedades mecánicas; y el vidrio C, cuya estabilidad química le hace muy resistente a la corrosión<sup>53</sup>. Las propiedades de estos tipos de vidrio quedan reflejadas en la tabla del apartado II.3.2.3.- Comparación entre las fibras, en la página II.37.

Si se consideran de un modo general las fibras de vidrio, pueden considerarse como propiedades comunes a todas ellas una buena resistencia a tracción y una elevada estabilidad dimensional, térmica y química. Además, su comportamiento ante la humedad es muy bueno, con valores de recuperación de humedad<sup>54</sup> del 0,3% o inferiores, y presentando gran resistencia a la intemperie<sup>55</sup>.

En 1975, Alain B. Boissonas y Gustav A. Berger coinciden en sus consideraciones acerca de las mejoras que aportan las propiedades de la fibra de vidrio para su utilización en soportes artísticos. Estos dos autores alaban este tipo de tela en los siguientes puntos<sup>56</sup>:

---

<sup>53</sup> Ver también: PINTADO SANJUANBENITO, José María, "Fibras, selección y propiedades", *Primer curso sobre materiales compuestos aplicados a la construcción naval*, Blanca Parga Landa, Madrid, 1991.

<sup>54</sup> Datos extraídos de GACÉN GUILLÉN, Joaquín, *Fibras textiles*, Universitat Politècnica de Catalunya, Terrasa, 1991. pág. 54-55.

<sup>55</sup> Examinar: AA.VV., *Los materiales compuestos de fibra de vidrio*, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1991. y ESCOHOTADO IBOR, M<sup>a</sup> Teresa, *Conservación y restauración de la pintura actual*, 1985, pág. 76.

<sup>56</sup> BERGER, Gustav. A., "Heat-seal lining of a torn painting with BEVA 371", *Studies in conservation*, vol. 20, nº 3. 1975, citado en SÁNCHEZ CUENCA, Ramón, "Reentelado con tela de fibra de lino", *II Congreso de conservación de bienes culturales*, Comité Español del ICOM, Teruel, 1978, pág. 42.

*“1.- La fibra de vidrio posee la más alta resistencia a la tracción de todas las fibras conocidas<sup>57</sup>.*

*2.- Tiene una estabilidad dimensional excepcional.*

*3.- No reacciona ante los cambios ambientales de humedad y temperatura.*

*4.- Tiene una alta resistencia química.*

*5.- Posee una gran durabilidad al no ser afectada por la luz solar ni los agentes biológicos (hongos, insectos, etc.).”*

Las ventajas de la utilización de fibra de vidrio frente a la tela de lino resultan evidentes:

*“1.- Una tela de lino sufre un alargamiento de hasta un 10 por 100 con una simple tracción manual (3 por 100 en la fibra de vidrio bajo tensiones del orden de 30 Tm/cm<sup>2</sup>).*

*2.- Las dimensiones de una tela de lino cambian bajo los efectos de una tensión siendo su recuperación sólo parcial en un grado que depende de la calidad del lino (100 por 100 de recuperación en la fibra de vidrio).*

---

<sup>57</sup> Esta afirmación hoy ya no es válida, ya que se han desarrollado industrialmente varios tipos de fibras más resistentes: Vidrio S, Vidrio R, Vidrio S2, Aramida, Carbono, etc.

- 3.- *El lino absorbe cantidades importantes de agua procedente de la humedad ambiente provocando tensiones internas o cambios dimensionales (nula absorción de humedad en la fibra de vidrio).*
  
- 4.- *La experiencia cotidiana pone de manifiesto la vulnerabilidad de la fibra de lino a los agentes químicos.*
  
- 5.- *Todos conocemos las fatales consecuencias de un lino sometido a condiciones ambientales adversas, el efecto de la luz, los microorganismos, etc.*<sup>58</sup>

La facilidad de manipulación de estas fibras, unida a su precio ventajoso respecto a otras fibras de refuerzo, ha actuado como impulsor de su utilización generalizada para diferentes usos. Este desarrollo ha tenido gran incidencia en el campo artístico, en el que se ha utilizado la fibra de vidrio con profusión desde su incorporación a mediados de este siglo. Sin embargo, en comparación con otros tipos de fibras, las de vidrio presentan una alta densidad y un comportamiento elástico menos favorable, lo que hace interesante la experimentación con otras fibras de mejores propiedades como es el caso de las fibras de carbono.

---

<sup>58</sup> BERGER, Op. cit. Teniendo en cuenta estas comparaciones, hoy en día se están realizando entre otras aplicaciones reentelados con fibra de vidrio E en el campo de la restauración de pintura.

### II.3.2.2.- FIBRAS DE CARBONO

Su fabricación industrial tienen su origen en el año 1965 en EE.UU., en la industria aeroespacial<sup>59</sup>, y nacen por la necesidad de encontrar materiales más ligeros que los que estaban disponibles hasta ese momento. Este tipo de fibras se obtienen por una descomposición térmica progresiva por pirólisis o carbonización de un hilo precursor, compuesto por fibras orgánicas, en unas condiciones ambientales controladas<sup>60</sup>. A medida que en las condiciones del proceso se van aumentando la temperatura y el tiempo se obtienen tipos diferentes de fibras por este orden: fibras preoxidadas, fibras de carbono y fibras de grafito<sup>61</sup>.

El resultado de este proceso es una fibra formada por un conjunto de átomos cuya mayor o menor organización permite desarrollar una gama amplia de productos con diferentes propiedades mecánicas. Durante la fabricación de la fibra de carbono se aplican tres procesos sucesivos<sup>62</sup>:

---

<sup>59</sup> Ibidem.

<sup>60</sup> Principalmente se han utilizado tres tipos de precursores para la elaboración de estas fibras. La mayor parte de ellas se obtienen a partir del poliacrilonitrilo (PAN) que proporciona las mejores propiedades de resistencia y otras propiedades mecánicas para su empleo en la elaboración de materiales compuestos. Las fibras obtenidas a partir de un precursor de rayón tienen propiedades inferiores y resultan más caras debido a lo costoso de su producción. Finalmente, las fibras de precursor de alquitrán son las de menor coste gracias al menor precio de este material.

<sup>61</sup> Op. cit., pág. 274.

<sup>62</sup> Ver también fibra de carbono en MIRAVETE, Antonio, Op. cit., en GACÉN GUILLÉN, Joaquín, *Fibras acrílicas*, Univ. Politécnica Barcelona, Terrasa, 1982 y *Fibras Textiles*, Universitat Politècnica de Catalunya, Terrasa, 1991 y PINTADO SANJUANBENITO, José M<sup>o</sup>., "Tipos, selección de fibras", *Primer Curso sobre Materiales Compuestos aplicados a la construcción naval*, Blanca Parga Landa, Madrid, 1991.

- 1.- Reticulación o estabilización a 250 grados C. en atmósfera oxidante.
- 2.- Carbonización por calentamiento hasta 1.100 grados C. en medio inerte. Tras este proceso se obtiene fibra de carbono de alta resistencia.
- 3.- Grafitización en un calentamiento progresivo hasta alcanzar 3.000 grados C. en medio inerte. En este proceso se obtienen fibras de alto módulo.

Las fibras de alta resistencia son producidas con la intención de obtener una resistencia a tracción elevada mientras que en las de alto módulo se busca la obtención de fibras de superior módulo elástico. En este último caso, el aumento de la temperatura durante su fabricación provoca la mejora deseada en las propiedades elásticas del material pero a la vez hace disminuir los valores de la resistencia a tracción.

Una vez elaboradas las fibras, éstas reciben un tratamiento superficial que tiene por objeto mejorar las condiciones de adhesión de éstas con las resinas en la fabricación de los materiales compuestos.

Las propiedades más destacables de las fibras de carbono son su baja densidad y su excepcional comportamiento mecánico, presentando características de rigidez, resistencia y estabilidad dimensional que han hecho aumentar de forma muy importante su demanda en los últimos años. Además, su grado de absorción de agua es mínimo e incluso nulo en algunos

casos. Estas propiedades pueden apreciarse en la tabla del apartado II.3.2.3.- Comparación entre las fibras, en la página II.37.

Desde un principio, la utilización de estas fibras ha presentando algunos inconvenientes que se están tratando de solventar con la optimización de los procesos de fabricación. El primero de los inconvenientes se refería a su elevado coste, el cual está empezando a igualarse a otras fibras tradicionalmente más baratas. También se ha avanzado de forma importante en la obtención de fibras que posean a la vez un elevado módulo y una gran resistencia. Antonio Miravete cita a modo de ejemplo:

*"... Una fibra de carbono de alto módulo (HM20) fabricada a partir de un hilo de petróleo de cristal líquido recientemente desarrollado por Petoca, en Japón, tiene módulos de elasticidad y valores de resistencia de 200 GPa y 2000 MPa respectivamente; su coste es comparable al de la fibra de vidrio..."<sup>63</sup>.*

Las fibras de carbono poseen, por tanto, unas excelentes propiedades mecánicas, debido a las cuales los laminados hechos a partir de estas fibras van a tener un alto módulo y resistencia a la fatiga y a la rotura.

---

<sup>63</sup> MIRAVETE, Antonio, Op. cit.

### II.3.2.3.- COMPARACIÓN ENTRE LAS FIBRAS.

En la tabla II.1 se muestran algunas de las propiedades de las fibras de carbono y de vidrio. Aunque estos datos se refieran a fibras aisladas, es decir, sin formar parte de estructuras reforzadas, cabe destacar algunos aspectos de sus propiedades que son particularmente útiles para su uso en la fabricación de laminados<sup>64</sup>.

Entre las principales características de estas fibras se encuentran su resistencia y elevado módulo elástico con una baja densidad.

La concurrencia en ellas de estas tres propiedades ha hecho de estas fibras componentes muy apreciados para la elaboración de componentes estructurales.

El módulo elástico es comparativamente mayor en los dos tipos de fibras de carbono que en las de vidrio. Sin embargo, las fibras de carbono son muy frágiles y su comportamiento ante el impacto es deficiente.

Es interesante que las fibras presenten una adecuada estabilidad térmica ya que éstas se van a emplear a menudo en servicios a altas temperaturas, además de que van a sufrir

---

<sup>64</sup> Para más datos consultar: HULL, Derek, *Materiales compuestos*, Reverte, Barcelona, 1987, pág. 22 y PINTADO SANJUANBENITO, Op. cit.

calentamientos durante los procesos de curado y moldeo de las resinas termoestables o termoplásticas a las que van a reforzar.

La utilización de las fibras de carbono en la elaboración de estructuras de altas prestaciones ha presentado ventajas significativas en campos como la construcción aeroespacial<sup>65</sup>. La principal razón de su empleo preferente en algunas aplicaciones ha sido la posibilidad de obtener estructuras de propiedades óptimas con una disminución importante en el peso final gracias a su menor densidad con respecto a las fibras de vidrio y otras fibras químicas.

Las fibras de carbono han tenido hasta el momento una escasa utilización en campos artísticos pero las ventajas que ofrece en comparación con otras fibras hace especialmente interesante la experimentación con ellas para determinar su validez para estos fines.

---

<sup>65</sup> Consultar: PINTADO SANJUANBENITO, Op. cit.

TABLA II.1<sup>66</sup>

PROPIEDADES DE LAS FIBRAS DE CARBONO Y DE VIDRIO A 20° C					
Propiedades	Unidades	Vidrio tipo E	Vidrio tipo S	Carbono alta resistencia	Carbono alto módulo
Diámetro	µm	8-14		7,6-8,6	7,0-9,7
Densidad	10 <sup>3</sup> kgm <sup>-3</sup>	2,56	2,24	1,75	1,95
Módulo de Young	GN m <sup>-2</sup>	76	84	250	390
Módulo (perpendicular al eje de la fibra)	GN m <sup>-2</sup>	76		20	12
Resistencia a tracción	GN m <sup>-2</sup>	1,4-2,5	2,4-4,2	2,7	2,2
Alargamiento de rotura	%	1,8-3,2	4-5	1,0	0,5
Coef. de dilatación térmica (0 a 100° C)	10 <sup>-6</sup> y C <sup>-1</sup>	4,9	1,05	Paralelo -0,1 a -0,5 Radial 7-12	Paralelo -0,5 a -1,2 Radial 7-12
Conductividad térmica	W m <sup>-1</sup> y C <sup>-1</sup>	1,04		24	105

<sup>66</sup> Ver también: HULL, Op. cit., pág. 14 - 15. y Curso de doctorado: *Diseño de estructuras marinas en materiales compuestos*, Prof.: Blanca Parga Landa, E.T.S.I. Navales. U.P.M., 1993.

#### II.3.2.4.- TEJIDOS DE FIBRAS DE VIDRIO Y DE FIBRAS DE CARBONO

De forma similar a la descrita para los tejidos naturales<sup>67</sup>, las fibras de vidrio y las fibras de carbono se emplean igualmente para la fabricación de hilos, estructuras éstas que van a mejorar de forma considerable las propiedades de las fibras aisladas<sup>68</sup>.

Así, como características principales puede decirse que los hilos de fibras este tipo de fibras pueden estar constituidos por fibras cortas o largas, unidas entre sí mediante ligantes y/o torsión. Además, dos o más hilos pueden combinarse mediante torsión o unión simple para obtener otros de mayor resistencia.

Estos hilos se van a utilizar para la elaboración de refuerzos para los llamados materiales sintéticos cuyas propiedades van a estar determinadas por la naturaleza y disposición de los hilos que los forman.

Cuando los hilos se distribuyen de manera aleatoria en el plano, unidos entre sí por un ligante químico, constituyen los denominados mats o fieltros que, según el tipo de hilos que los forman, pueden ser de fibras cortas (o de hilos cortados) y de hilos continuos (fibras largas)<sup>69</sup>.

---

<sup>67</sup> Examinar Apartado II.2.2.2- Tejidos de fibras naturales.

<sup>68</sup> PARGA LANDA, B., *Aplicaciones de materiales compuestos al sector naval: introducción*, Curso de Materiales Compuestos, E.T.S. Navales, Universidad Politécnica de Madrid, 1992, pág. 1.1.-5.

<sup>69</sup> Ver definición de mat o fieltro en Norma UNE 43-501-84.

Las principales características de los mats son la uniformidad de gramaje, una buena deformabilidad y compatibilidad con las resinas y la isotropía en el plano, es decir, que exhibe las mismas propiedades en todas las direcciones.

Estas propiedades se ven influenciadas por características como el diámetro de los filamentos, el título de los hilos de base (densidad lineal) y el tipo y cantidad del ligante empleado.

Cuando las fibras se encuentran dispuestas con una orientación en el plano se puede hacer una distinción atendiendo a si éstas están tejidas o no. Las estructuras más características entre las de fibras no tejidas son los hilos de Roving y las cintas unidireccionales.

El Roving consiste en una serie de hilos continuos ensamblados en paralelo, sin torsión ni entretreído, a los que se ha aplicado un ensimaje plástico para favorecer su compatibilidad con las resinas de estratificación. El resultado es un cordón que se distribuye en bobinas con anchura variable.

Las cintas unidireccionales están formadas por hilos continuos con orientación constante que se presentan casi siempre preimpregnadas y con una anchura entre 15 y 30 cm.

Entre las estructuras de fibra tejida se encuentran los tejidos de roving y los tejidos propiamente dichos. Los primeros están formados por mechas de roving tejidas mientras que los segundos están formados por hilos a los que antes de aplicar el proceso de tejeduría se ha aplicado torsión<sup>70</sup>.

Cualquiera de estos tejidos son utilizados como refuerzo para la elaboración de los materiales compuestos. Estos materiales deberán gran parte de sus propiedades tanto a las características de los hilos de roving o torsionados que las forman como al tipo de entrelazado que los une.

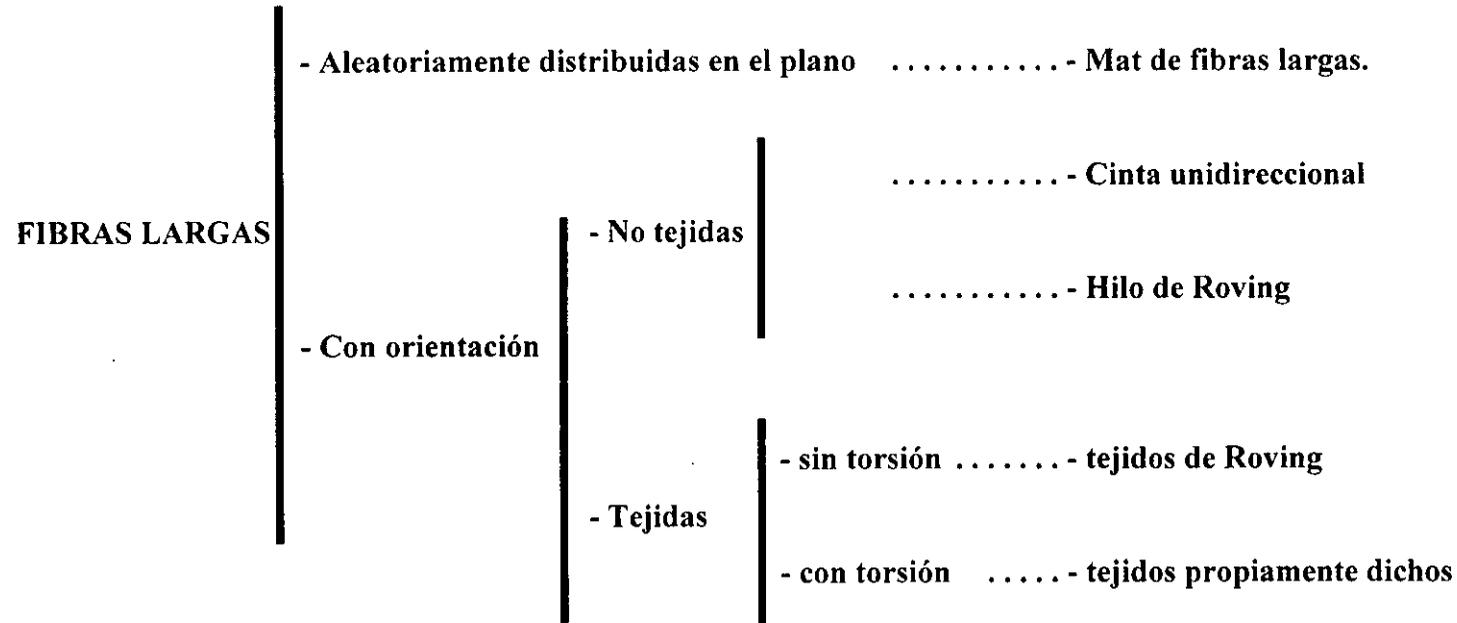
---

<sup>70</sup> Curso de doctorado: *Diseño de estructuras marinas en materiales compuestos*, Prof.: B. Parga Landa, E.T.S.I. Navales. U.P.M., 1993.

## ESQUEMA DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE ESTRUCTURAS DE REFUERZO CON FIBRAS

---

**FIBRAS CORTAS** - Aleatoriamente distribuidas en el plano ..... - Mat de fibras cortas o de hilos cortados.



### II.3.2.5.- ARMADURAS DE LOS TEJIDOS SINTÉTICOS.

El ligamento o armadura, es decir, el modo en que se distribuyen los cruzamientos entre los hilos de trama y urdimbre en la superficie del tejido, puede presentar una gran variedad en los tejidos sintéticos.

Dentro de cada grupo de tejidos estos pueden calificarse a su vez como equilibrados, que presentan una resistencia a tracción similar en la dirección de la urdimbre que en la trama, y direccionales, en los cuales predomina la resistencia a tracción en una sola dirección.

A continuación se describen brevemente las principales características de las armaduras utilizadas más comúnmente como refuerzo de las resinas en la fabricación de los materiales compuestos<sup>71</sup>. Algunas de estas armaduras son similares a las empleadas en los tejidos de fibras naturales<sup>72</sup> y ya se apuntaron de forma resumida en ese apartado<sup>73</sup>:

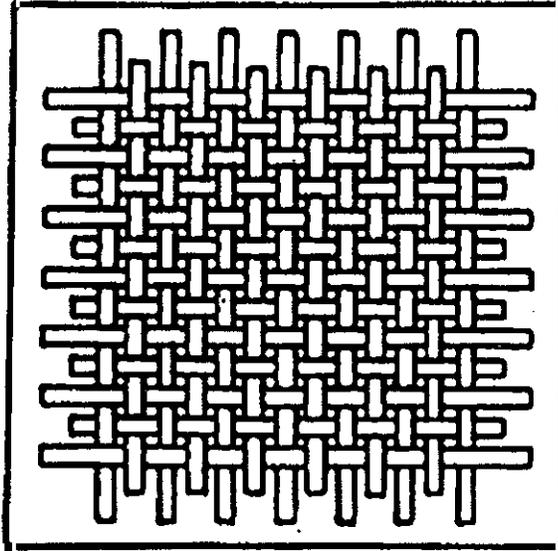
---

<sup>71</sup> PÉREZ GONZÁLEZ, Carmen y PARGA LANDA, Blanca, "Soportes Artísticos basados en Materiales Compuestos Avanzados", *III Jornada Nacional: Aplicaciones arquitectónicas de los materiales compuestos y aditivados* E.T.S. de Arquitectura, Madrid, 1993.

<sup>72</sup> Ver tratados sobre tejidos sintéticos, p. ej.: AA.VV., *Nociones generales de hilos, texturas, fieltros, etc. Realizados con fibras, utilizados como refuerzos en materiales compuestos*, C.A.S.A. Ver también: AA.VV., *Procesos de transformación de la fibra de vidrio (I)*, Vetrotex España, S.A., Zaragoza, 1994, pág. 112.

<sup>73</sup> Revisar Apartado II.2.2.2- Tejidos de fibras naturales.

TAFETÁN O TEJIDO PLANO.- Es la textura en la cual el hilo de trama pasa alternativamente por encima y por debajo del hilo de urdimbre. (Fig. II.1)

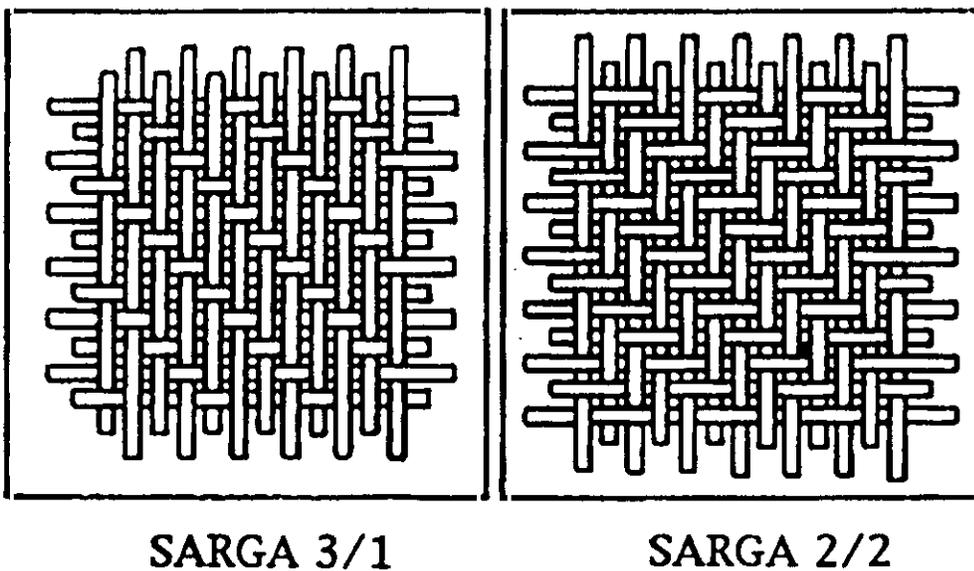


**Figura II.1.** Tafetán o tejido plano. (*Procesos de transformación de la fibra de vidrio (I)*, 1994, pág. 112)

Ofrece planitud, estabilidad, espesor constante y poca deformación, además de una buena porosidad que facilita la penetración de la resina. Presenta en las direcciones de los ejes en el plano una resistencia uniforme. Hay una variante de este tejido, la esterilla, más fuerte y aun más plana, aunque menos estable, y que, además, permite su enrollamiento fácilmente, haciéndose de este modo más manejable.

SARGA.- El entrecruzamiento regular de la urdimbre por encima o por debajo de varias pasadas de trama produce una diagonal característica de este tipo de tejido. (Fig. II.2)

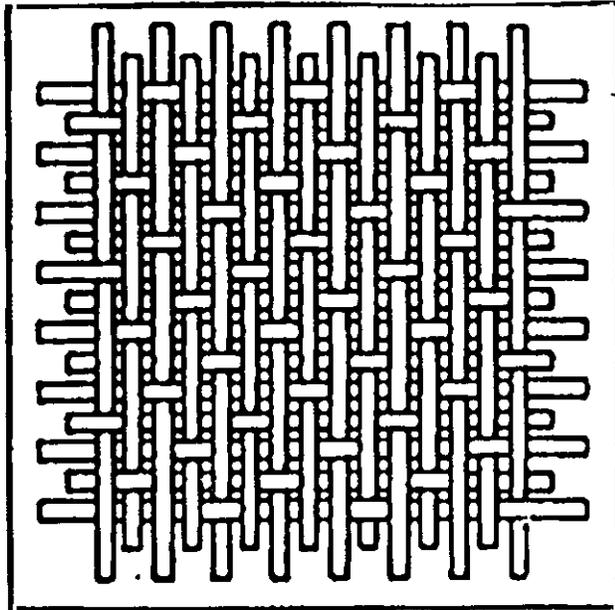
Las propiedades de estos tejidos son una flexibilidad y resistencia mayores que en los tejidos planos. Además, son más aptos que aquéllos para trabajar con formas difíciles, pero no son tan estables.



**Figura II.2.** Diferentes tipos de sarga. (*Procesos de transformación de la fibra de vidrio (I)*, 1994, pág. 112)

SATÉN O RASO.- Son tejidos donde los cruzamientos no poseen ningún rozamiento entre ellos, encontrándose los puntos de ligamento distribuidos regularmente en la superficie.

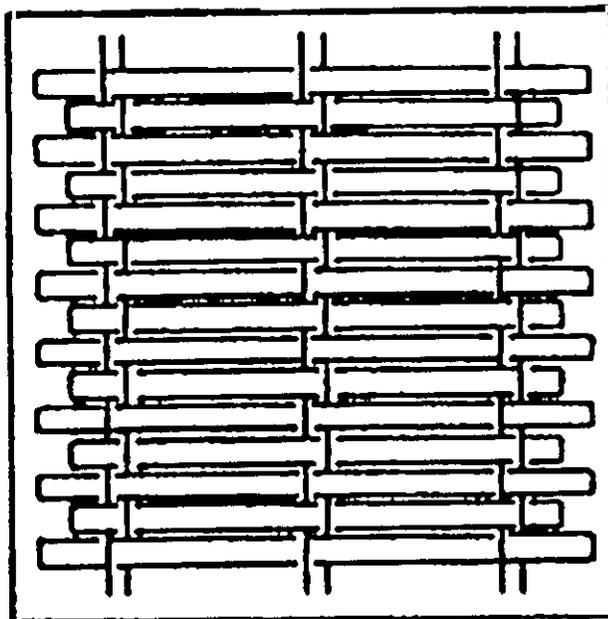
(Fig.II.3)



**Figura II.3** Satén o raso. (*Procesos de transformación de la fibra de vidrio (I)*, 1994, pág. 112)

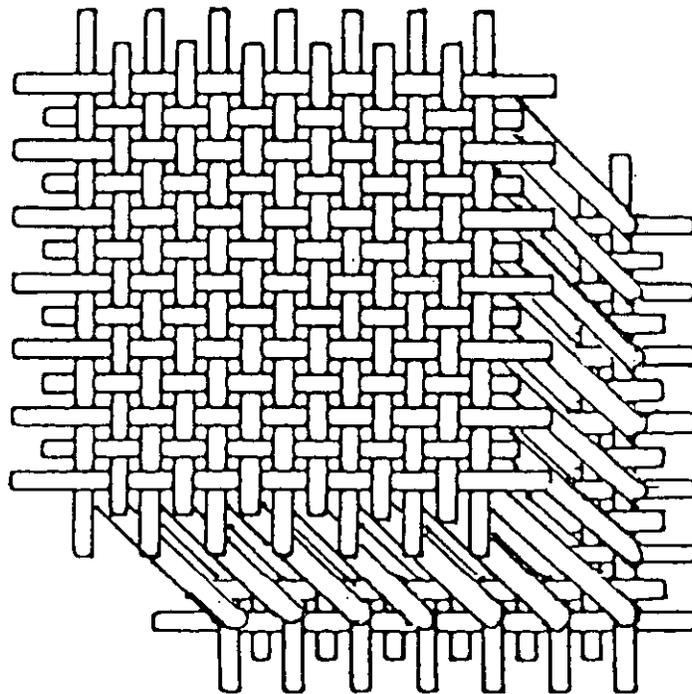
Ofrece un tejido más flexible, de mejor adaptación a las curvas y mayor resistencia que los tejidos planos pero menos estable. Su mayor inconveniente reside en la dificultad de extracción del aire y el peligro de deformación de la estructura de las fibras en el momento de la impregnación.

TEJIDOS UNIDIRECCIONALES.- Son variedades de cualquiera de las armaduras descritas anteriormente en las que la cantidad de hilos en una dirección es mucho mayor que en la otra. En términos generales, estos tejidos presentan las mejores propiedades de resistencia solamente en una dirección. (Fig. II.4)



**Figura II.4** Tejido unidireccional. (*Procesos de transformación de la fibra de vidrio (I)*, 1994, pág. 112)

TEJIDOS TRIDIMENSIONALES.- Son tejidos preformados para adaptarse al contorno de piezas más o menos complejas, evitando los problemas que presenta la realización de cortes y empalmes. La utilización de estos tejidos reduce considerablemente los tiempos de fabricación, permite eliminar los pliegues y costuras, garantiza la uniformidad de espesor en los laminados y elimina el riesgo de fractura interlaminar. (Fig. II.5)



**Figura II.5** Tejido tridimensional (*Procesos de transformación de la fibra de vidrio (I)*, 1994, pág. 112)

### **II.3.3.- MATRICES POLIMÉRICAS**

Como ya se definió anteriormente, la matriz es el componente que realiza la función de unión y protección de las fibras en un material compuesto y que contribuye a una adecuada distribución de las tensiones dentro de él.

De los diversos tipos de matrices existentes, las matrices metálicas se emplean en el campo aeroespacial y las matrices cerámicas se han empleado ocasionalmente en algunas experiencias de arranque de pintura mural<sup>74</sup>, mientras que las matrices de tipo polimérico son las que tienen un mayor interés para el artista y por ello serán las únicas que se van a tratar en esta Tesis.

Las matrices poliméricas son materiales de origen orgánico que se obtienen mediante reacciones de polimerización y que poseen un peso molecular elevado.

El proceso de polimerización consiste en la unión de dos o más monómeros para formar otras sustancias que se denominan polímeros. Estos procesos pueden producirse mediante dos tipos de reacciones: policondensación y poliadición. Durante el proceso de obtención de

---

<sup>74</sup> Ver soportes rígidos realizados con armadura metálica y yeso en apartado II.5.4.- Antecedentes de soportes murales...

polímeros por policondensación se obtiene, además del polímero, otra sustancia, mientras que en el proceso de poliadición no se obtiene ningún subproducto<sup>75</sup>.

Los polímeros así formados están constituidos por largas cadenas de unidades monoméricas que pueden presentar o no ramificaciones. En el interior de estas cadenas existen fuertes enlaces covalentes y, a su vez, unas cadenas se encuentran unidas a otras por enlaces que pueden ser de diferente intensidad, tanto fuertes (como los iónicos y covalentes) como débiles (enlaces de Hidrógeno y de Van der Waals)<sup>76</sup>.

La naturaleza de los enlaces entre los polímeros van a definir en gran medida la estructura de la resina y, por tanto, será determinante para las propiedades que ésta va a presentar. Esta estructura varía según el tipo de polímero y va a permitir diferenciar dos grupos dentro de las resinas: termoplásticas y termoestables.

Las resinas termoplásticas presentan enlaces débiles entre unas cadenas y otras<sup>77</sup> lo que va a condicionar su comportamiento general.

---

<sup>75</sup> Examinar también: AVENDAÑO SARMIENTO, Luis, *Iniciación a los plásticos*, Centro Español de Plásticos, Barcelona, 1994, pág. 13-15.

<sup>76</sup> Ver además: ASHBY, Michael I. y JONES, David R.H., *Engineering materials*, Pergamon Press, 1980, pág. 51.

<sup>77</sup> Enlaces de Van der Waals, puentes de Hidrógeno,...

Al calentar a ciertas temperaturas estas resinas, estos enlaces se rompen, deshaciendo las uniones entre polímeros y produciendo la plastificación del material, que fluye en forma de un líquido de viscosidad elevada.

Esta transformación es reversible, de forma que es posible fundir los enlaces secundarios y moldear el material mediante la aplicación de calor y/o presión y posteriormente endurecerlo enfriándolo. Durante ninguno de los dos procesos se producen cambios químicos en la resina sino solamente una alteración de tipo físico. Gracias a esto puede realizarse la transformación en uno y otro sentido un gran número de veces. Entre los termoplásticos más utilizados pueden citarse el Poliacetato de vinilo, los poliacrilatos y polimetacrilatos o el PVC.

Las resinas termoestables, también llamadas termoendurecibles, están formadas por moléculas con alto grado de cruzamiento entre ellas. Mediante un proceso de curado generalmente por calor forman una estructura de red tridimensional que las transforma en sólidos duros y frágiles<sup>78</sup>. Como se vera mas adelante este curado es posible igualmente en temperatura ambiente siendo éste un proceso innovador y forma parte de los presupuestos realizados en la presente Tesis<sup>79</sup>.

Este proceso es irreversible ya que se forman enlaces fuertes entre las cadenas de polímeros en una transformación química definitiva. Si se aplican de nuevo altas temperaturas,

---

<sup>78</sup> Revisar además: HULL, Derek, *Materiales compuestos*, Reverte, Barcelona, 1987, pág. 28.

<sup>79</sup> Ver Apartado IV.5.5.- Realización con preimpregnado y un método de fabricación libre

el sólido se degrada por la rotura de enlaces secundarios entre las cadenas poliméricas pero no funde.

Estas resinas reciben generalmente un proceso de postcurado a temperaturas superiores a las de curado. El resultado final son por lo general sólidos de propiedades químicas, mecánicas y térmicas superiores a las de los termoplásticos, a los que superan igualmente en estabilidad dimensional<sup>80</sup>.

Las resinas de poliéster, las epoxy y las fenólicas son las resinas termoestables que tienen un uso más generalizado.

### **II.3.3.1.- RESINAS TERMOPLÁSTICAS**

Existen una gran variedad de resinas termoplásticas que pueden presentar características muy diferentes entre sí. Esta diversidad ha permitido el uso de los termoplásticos para multitud de aplicaciones para las que se requieren materiales de propiedades específicas.

Las variadas posibilidades que ofrecen este tipo de resinas, que permiten su moldeado, pegado, lijado, etc., han sido especialmente apreciadas en el campo artístico donde han

---

<sup>80</sup> Ibidem.

encontrado aplicación en pintura, escultura y grabado<sup>81</sup>. También lo han sido en el campo de la restauración gracias a su gran poder de reversibilidad.

Las espumas basadas en termoplásticos han sido igualmente muy utilizadas en el campo de la creación artística y en el de la conservación-restauración, en este último sobre todo como núcleo de estructuras tipo sandwich utilizando las cualidades específicas de cada una de ellas para las diferentes necesidades.

Aquí se describen solo brevemente las resinas de tipo termoplástico de uso más extendido, ya que la presente investigación se centra principalmente en las resinas termoestables<sup>82</sup>. Aun así, las experiencias realizadas con espumas sintéticas termoplásticas en soportes de tipo sandwich se encuentran referidas en el estado de la cuestión sobre conservación-restauración, dentro del apartado II.5<sup>83</sup>.

Los mejores resultados en este tipo de aplicaciones se han obtenido con el llamado cloruro de polivinilo (ver PVC más adelante), aunque también se han usado las espumas de poliuretano y el poliestireno, entre otras.

---

<sup>81</sup> Según puede verse en la tesis doctoral: TEATINI DE SOUZA CLIMAZO, José Cesar, *Las matrices de plástico para el grabado y la estampación*, Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Bellas Artes, Madrid, 1995.

<sup>82</sup> Ver además: TORRACA, Giorgio, *Porous building materials*", ICCROM, Roma, 1992.

<sup>83</sup> II.5.- Utilización de materiales compuestos en restauración.

### **II.3.3.1.1.- Poliacetato de vinilo.**

Más conocido como acetato de polivinilo o PVAC, se presenta como una resina transparente de propiedades variables según su grado de polimerización. Si bien no tiene especial relevancia en la fabricación de estructuras plásticas, sus características se han aprovechado en la elaboración de dispersiones vinílicas para su empleo en pinturas, adhesivos y barnices.

Una vez endurecida la resina, ésta contribuye a la formación de una película con buena resistencia a la abrasión y al envejecimiento aunque de no muy buenas propiedades elásticas. En ocasiones se ha recurrido a la adición de plastificantes para mejorar sus prestaciones.

Uno de sus derivados, el PVA (Alcohol Polivinílico), encuentra igualmente gran aplicación en la fabricación de pinturas y especialmente en la industria papelera y textil<sup>84</sup>.

### **II.3.3.1.2.- Poliacrilatos.**

Son las llamadas resinas acrílicas. Son incoloras y se caracterizan por una buena resistencia al deterioro por la acción de agentes químicos y la radiación ultravioleta y a la

---

<sup>84</sup> Consultar también: SAN ANDRES MOYA, Margarita, Tesis Doctoral, *Aplicación de resinas sintéticas en la conservación y restauración de obras de arte*, Editorial Complutense, Madrid, 1990, pág. 52-55.

oxidación. Su comportamiento es excelente una vez tintados ya que el color presenta una gran estabilidad.

Estas resinas se utilizan igualmente en emulsiones para la fabricación de pinturas, adhesivos y barnices. Por ello se emplea con frecuencia (para la elaboración de estructuras plásticas coloreadas) a los que aportan unas buenas propiedades elásticas<sup>85</sup>.

### **II.3.3.1.3.- Polimetacrilatos.**

Sus aplicaciones se basan principalmente en su gran transparencia y sus buenas propiedades de estabilidad química y resistencia al impacto. Así, estas resinas (y sobre todo el Polimetacrilato de Metilo) son utilizadas para la fabricación de estructuras transparentes en arquitectura, en automoción y otras muchas industrias. Son especialmente destacables sus aplicaciones en óptica y medicina.

Su empleo es también muy común en la elaboración de adhesivos, consolidantes, barnices y pinturas, donde se utilizan en general en forma de copolímeros con los acrílatos<sup>86</sup>.

---

<sup>85</sup> Ver también: SAN ANDRES MOYA, Op. cit., pág. 56-60.

<sup>86</sup> Examinar: SAN ANDRES MOYA, Op. cit., pág. 60-67 y polimetacrilato en AA.VV., *Nuevos plásticos y cerámicos*, Diputación Foral de Bizcaia, Empresa GAIKER.

#### II.3.3.1.4.- Policloruro de vinilo.

Es éste probablemente el plástico que admite una variedad mayor de aditivos, haciendo de él el más utilizado en gran cantidad de aplicaciones de características diversas. El tipo y cantidad de los productos añadidos a esta resina, también llamada cloruro de polivinilo<sup>87</sup> o PVC, van a determinar las propiedades finales del plástico, las cuales pueden llegar a ser muy distantes<sup>88</sup>.

Es posible, sin embargo, agrupar todos estos tipos de PVC en dos grandes familias atendiendo a la presencia o no de plastificantes en la mezcla, lo cual va a diferenciar de forma importante sus características. Así, se distingue habitualmente entre el PVC rígido y el PVC plastificado o flexible.

En general, el PVC presenta unas propiedades mecánicas aceptables, así como una buena resistencia a los agentes químicos, biológicos y atmosféricos, aunque presenta el inconveniente de ser sensible a algunos disolventes. El tipo rígido se emplea sobre todo para la fabricación de envases, tuberías y otras estructuras para la industria, así como para la construcción. El flexible

---

<sup>87</sup> Denominación inadecuada según AVENDAÑO en *Iniciación a los plásticos*, Centro Español de Plásticos, Barcelona, 1994, pág. 105.

<sup>88</sup> Ver además: CASTILLO RUBI, Francisca y BLANCO FERNÁNDEZ, Manuel, *Síntesis, caracterización y fotodegradación en atmósfera inerte de diferentes tipos de policloruro de vinilo*, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, 1991.

tiene sus principales aplicaciones también en envases, recubrimientos de piezas metálicas y cables y en la fabricación de láminas flexibles para una enorme diversidad de usos<sup>89</sup>.

Al igual que otras espumas termoplásticas, se ha utilizado para la elaboración de soportes tipo sandwich en experiencias de arranque de pintura mural. Esta aplicación del PVC se describe en el apartado II.5 de esta Tesis<sup>90</sup>.

### **II.3.3.1.5.- Polietileno**

Es un plástico de gran resistencia química y dieléctrica y muy flexible. Existen varias clasificaciones de los tipos de polietileno, cada una de ellas basadas en una de sus propiedades como la densidad, rigidez, distribución espacial de sus moléculas, etc<sup>91</sup>.

Todos los tipos de polietileno se obtienen a partir del etileno y la estructura de cadena molecular parafínica que éste les confiere es la causa de una muy buena resistencia a los agentes químicos. Por el contrario, la adherencia y fijación de tintas y otros productos es difícil sobre el polietileno por esta misma razón.

---

<sup>89</sup> Para más datos consultar: policloruro de vinilo en MIRAVETE, Antonio, *Los nuevos materiales en la construcción*, Centro Politécnico Superior, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1994, pág. 38-39 y AVENDAÑO SARMIENTO, Op. cit., pág. 109.

<sup>90</sup> II.5.- Utilización de materiales compuestos en restauración

<sup>91</sup> Ver también: AVENDAÑO SARMIENTO, Op. cit., pág. 107.

Sus aplicaciones son innumerables aunque pueden destacarse la elaboración de películas flexibles para bolsas, fabricación de envases, recubrimientos de papel, cartón o cables, toldos, juguetes, etc.

### **II.3.3.1.6.- Polipropileno**

Derivado del propileno, este plástico tiene un aspecto muy apreciado junto con un precio reducido y muy buenas propiedades mecánicas. Siendo un material rígido presente una elasticidad que ha favorecido su utilización en la elaboración de envases, cuerdas, maquetas, piezas de automóviles, tuberías, etc.

Por su transparencia se ha empleado con profusión en films para embalaje, autoadhesivos y otros muchos usos.

Como se dijo anteriormente, además de estos existen otros muchos plásticos que se engloban dentro de los termoplásticos, algunos de ellos con infinidad de aplicaciones en sus distintas presentaciones. Entre éstos pueden destacarse el poliestireno, el poliuretano o el nylon<sup>92</sup>.

---

<sup>92</sup> Examinar: polipropileno en MIRAVETE, Op. cit.

### **II.3.3.2.- RESINAS TERMOESTABLES**

Entre las resinas termoendurecibles las más utilizadas son las resinas de poliéster insaturado, las resinas epoxy y las fenólicas. Dentro de cada uno de estos tipos se engloba una gran cantidad de productos que pueden llegar a ser muy diferentes entre sí. Esta diversidad de características se debe principalmente a la adición de cargas y aditivos destinados a darle a la resina propiedades específicas para cada uso.

Las resinas termoestables que se utilizan principalmente en la industria son las resinas de poliéster, las epoxy y las fenólicas. Dentro del campo artístico, son las dos primeras las que tienen un uso más generalizado, mientras que las fenólicas no tienen prácticamente aplicación.

Desde los primeros años en que se comenzaron a fabricar las resinas poliéster y epoxy, muchos artistas han establecido un productivo diálogo con estos materiales, dándole todo un nuevo mundo de asociaciones en el que se utilizan para realizar imitaciones de técnicas y materiales anteriores o se explotan sus características en nuevas posibilidades creativas.

En el campo de la conservación-restauración de obras de arte, este tipo de resinas han sido utilizadas con profusión en diversos tipos de experiencias en las que sus propiedades les hacían insustituibles. En la presente investigación se han estudiado exclusivamente aquellas experiencias que se encuentran relacionadas con la elaboración de soportes para la realización de las transferencias de pintura mural (Ver Apartado II.4).

### II.3.3.2.1.- Resina poliéster

Las resinas de poliéster, también llamadas poliésteres insaturados, son compuestos que se obtienen por policondensación a partir de un ácido dicarboxílico insaturado<sup>93</sup> y un dialcohol (glicol). Esta reacción da como resultado una resina líquida de grandes moléculas lineales cuyas características pueden ser muy variables dependiendo de los reactivos utilizados<sup>94</sup>.

En presencia de un monómero vinílico, esta resina insaturada tiene la capacidad de copolimerizar por el calor o la presencia de radicales libres en sus moléculas. Una reacción de este tipo puede producirse sin necesidad de temperaturas elevadas y en ella no se libera ningún producto secundario. Mediante esta reacción la resina pasa del estado líquido al sólido al producirse la reticulación de sus cadenas<sup>95</sup>.

Aunque pueden emplearse varios monómeros diferentes como reticulantes, es el estireno el más utilizado debido principalmente a su menor coste, su aceptable volatilidad y retracción en el curado y a que actúa como disolvente de la resina hasta su aplicación. En las presentaciones industriales el estireno se encuentra ya mezclado con la resina a la vez que se incluyen

---

<sup>93</sup> Que contiene en su cadena dos grupos carboxilo y un doble enlace.

<sup>94</sup> En la presente tesis se describen las resinas incluyendo las propiedades que resultan interesantes para las aplicaciones expuestas. No se incluyen las formulaciones químicas de estas resinas ya que se ha considerado un aspecto demasiado específico para recogerlo en esta descripción general. Por otra parte, este tema puede encontrarse desarrollado en múltiples tratados de química.

<sup>95</sup> Puede verse también: VELSON HORIE, Charles, *Materials for conservation*, Butterworth, 1987, pág. 161-165 y AA.VV., *Procesos de transformación de la fibra de vidrio*, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1994.

inhibidores para evitar que la reacción de copolimerización se inicie de forma espontánea durante el período de almacenamiento. También con este fin se suele reducir la proporción de ácidos insaturados sustituyéndolos por ácidos saturados.

Finalmente otros dos productos van a intervenir en la reacción: un catalizador, que se añade en el momento de la preparación de la resina para su empleo, y que tiene el efecto de producir en ella la aparición de radicales libres que desencadenan la reacción de polimerización; y un acelerador o activador, que potencia la acción del primero reduciendo la temperatura necesaria para que la reacción se produzca, y puede venir añadido ya a la resina primaria (resinas pre-aceleradas) o incluirse también durante la preparación de la resina<sup>96</sup>:

*a) El proceso de curado.*

La polimerización de la resina tiene lugar a partir del momento en que se añade el catalizador y comienzan a aparecer radicales libres. A partir de este punto el endurecimiento progresivo puede favorecerse con la aplicación de calor, si bien la temperatura alcanzarse puede disminuir con la presencia del acelerante hasta el punto de que, con una cantidad suficiente de éste, la reacción puede ocurrir totalmente "en frío" (a temperatura ambiente).

---

<sup>96</sup> El contacto directo del catalizador y el acelerador produce una reacción violenta que puede llegar a ser explosiva por lo que siempre hay que mezclar uno de ellos previamente con la resina para añadir el otro a continuación.

El proceso de reticulación es exotérmico por lo cual se produce un aumento de la temperatura que favorece el desarrollo de la reacción. Este incremento del calor es especialmente intenso cuando aumenta el volumen de resina y es necesario controlarlo en los procesos en frío ya que puede producir daños importantes en la pieza que se está fabricando así como en el posible molde que se utilice durante el proceso o en los objetos que se estén encapsulando con la resina.

El control de la reacción de polimerización puede realizarse variando las cantidades de catalizador y acelerante que se añaden a la resina. De este modo puede influir en la temperatura necesaria para el curado y en el tiempo de solidificación que puede alargarse o acortarse según las necesidades de manipulación de la resina durante el proceso.

En el curado en frío será necesaria la presencia del acelerante para favorecer la acción del catalizador si se requiere un tiempo de solidificación reducido mientras que, si se va disminuyendo la cantidad de acelerante, la reacción se producirá más lentamente y se podrá actuar sobre la resina durante un tiempo más prolongado para su modelado. Sin embargo, si la cantidad es insuficiente, puede producirse un curado incompleto de la pieza.

En el proceso completo pueden distinguirse varios periodos que van a depender también de las condiciones de curados. En primer lugar hay una fase en que la resina permanece líquida, haciéndose más espesa poco a poco y en la cual puede actuarse sobre ella fácilmente. Este es el llamado tiempo hábil de utilización y a continuación hay un periodo en que la resina se convierte

en un gel aún flexible (tiempo de gel). Estas dos fases dependen en su duración de la cantidad de catalizador y la temperatura aplicada.

Se conoce como tiempo de endurecimiento el necesario para que la resina adquiriera una rigidez suficiente para desmoldearse o retirar cualquier sujeción exterior. Finalmente el tiempo de maduración es el empleado por la pieza para adquirir sus condiciones de solidez definitivas.

Estos dos periodos dependen principalmente del tamaño y del grueso de la pieza, es decir, de la cantidad de resina empleada. El primero de ellos puede tener una duración de hasta 24 horas mientras que el segundo puede alargarse durante semanas para el caso de aplicaciones críticas de resistencia mecánica o química<sup>97</sup>.

#### *b) Propiedades de las resinas poliéster.*

En general, las resinas poliéster son insolubles y no funden después del curado. Aunque sus propiedades pueden presentar una gran variedad dependiendo de las condiciones de procesado, cabe destacar en todas ellas una buena estabilidad dimensional, un buen comportamiento mecánico y resistencia a los agentes químicos. Estas propiedades se recogen con más exactitud en tabla del apartado II.3.3.2.4.- Comparación entre las matrices, en la página II.75.

---

<sup>97</sup> Mirar además: AA.VV., *Procesos de transformación de la fibra de vidrio (I)*, Vetrotex España, S.A., Zaragoza, 1994.

El uso altamente extendido de estas resinas se ha visto favorecido por la gran diversidad de presentaciones que pueden encontrarse en el mercado, de forma que es posible disponer de resinas de muy alto rendimiento para aplicaciones de tipo general y usos muy específicos. En el anexo I. pueden encontrarse las especificaciones técnicas que aporta la firma Reposa sobre las características de sus resinas de poliéster y las aplicaciones para las que está indicada cada una de ellas.

En primer lugar cabe distinguir entre las resinas de poliéster dos tipos que se diferencian en su componente ácido. Se denominan resinas ortoftálicas a las elaboradas con ácido ortoftálico, mientras que las que tienen como componente el ácido isoftálico se conocen como isoftálicas. Esta variación en la composición da a cada tipo unas características particulares, siendo las resinas isoftálicas más adecuadas para ambientes con humedad elevada y presentando asimismo un mejor comportamiento mecánico.

Entre los tipos de resinas más utilizados pueden destacarse los siguientes<sup>98</sup>:

- Resinas de uso general.- Pueden emplearse en gran cantidad de aplicaciones que no precisan características especiales en la resina. Normalmente son resinas de tipo ortoftálico aunque en aplicaciones en que es importante una baja absorción de agua se utilizan las isoftálicas. Suelen presentarse pre-aceleradas y acompañadas de un catalizador estándar.

---

<sup>98</sup> Ver tipos de resinas en: WARRING, Ron H., *El libro práctico del poliéster y la fibra de vidrio*, Borrás Ediciones, Barcelona, 1978.



- Resinas tixotrópicas.- Se caracterizan por contener un aditivo que evita que escurran en las superficies verticales.
- Resinas transparentes.- Son estables a la luz y se usan para fabricar paneles que deben permitir el paso de la luz.
- Resinas flexibles.- Mezcladas con otras resinas aportan elasticidad.

Existen otros tipos de resinas de poliéster con empleo en aplicaciones que requieren otras propiedades especiales en la resina o en ambientes de trabajo específicos. Entre ellas están las resinas marinas (con gran resistencia al agua), las de gel- coat (para recubrimientos)<sup>99</sup>, las resinas 4rápidas, las ignífugas y las de baja emisión de estireno.

Aunque las resinas poliéster son utilizadas por sí solas en algunas aplicaciones, normalmente se emplean reforzadas con fibras químicas o tejidos de éstas fibras. El refuerzo más común es el basado en fibra de vidrio y con él se elaboran laminados o estratificados sobre un molde o una armadura, constituyendo materiales compuestos de los denominados convencionales.

---

<sup>99</sup> AA.VV., *The effect of coatings on blister formation*, 4th Annual Conference, Reinforced Plastics/Composites Institute, The Society of the Plastics Industry, Inc., January 27-31, 1986, pág. Sesión 13-B/1 a 13-B/5.

El anexo I contiene la documentación elaborada y proporcionada por Reposa sobre estratificados de poliéster con fibra de vidrio. En él se recogen recomendaciones y posibilidades de realización para los estratificados siguiendo varios métodos diferentes.

Las resinas de poliéster reforzadas de esta manera alcanzan muy buenas propiedades de tipo mecánico y de estabilidad dimensional, así como un buen comportamiento ante los agentes químicos y la temperatura. La impregnación de las fibras se ve favorecida por el efecto disolvente del estireno, si bien puede presentarse dificultad en la adherencia a las fibras de vidrio. Además, durante el proceso de polimerización las resinas poliéster presentan una fuerte retracción.

Las propiedades de los estratificados de poliéster con fibra de vidrio se relacionan en la tabla Propiedades mecánicas de laminados FRP del apartado II.3.3.2.4<sup>100</sup>.

Según la aplicación a que se vayan a destinar, pueden elaborarse muy diferentes mezclas de resina con la adición de pigmentos, cargas de muy diversa naturaleza, etc. Las características de la pieza final serán diferentes dependiendo de la mezcla realizada<sup>101</sup>.

El poliéster ofrece una gran cantidad de posibilidades dentro del campo artístico, en gran medida debido a la facilidad con que pueden variarse sus propiedades y acabados, pudiendo ser

---

<sup>100</sup> II.3.3.2.4.- Comparación entre las matrices, pág. II.77.

<sup>101</sup> Ver: AA.VV., *Los materiales compuestos de fibra de vidrio*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1991, pág. 45-57.

esculpido, moldeado, laminado, utilizado como recubrimiento, coloreado, etc. Ver apartado

#### II.4.<sup>102</sup>

En escultura presenta una de sus principales aplicaciones al ser aplicado con refuerzos de fibras sobre un armazón metálico, dando lugar a estructuras rígidas tras el proceso de curado. De igual modo, puede ser mezclado con materias de carga para la imitación de materiales tanto en realización como en restauración de escultura.

Entre las aplicaciones de estas resinas, una de las más interesantes es la de la restauración de vidrio, en la que se utiliza poliéster transparente. La tendencia de éste a amarillear con el paso del tiempo era un gran problema al que se ha aportado como solución la adición de un pigmento violeta sintético, que contrarresta la coloración amarillenta del poliéster<sup>103</sup>.

#### **II.3.3.2.2.- Resina epoxy**

Llamadas también poliepóxidos son resinas termoendurecibles, muy similares a las resinas de poliéster, cuyas moléculas lineales presentan en los extremos grupos epoxídicos. Las

---

<sup>102</sup> II.4.- Últimas aportaciones en soportes

<sup>103</sup> Procedimiento ideado por Giovanna Bandini. Ver además: BANDINI, Giovanna, *Sul restauro dei vetri dorati siti presso il Museo Nazionale Romano*, Kermes, 2, 1988.

más comunes son las derivadas del Bisfenol A y la epíclorhidrina, aunque actualmente existe una gran variedad de ellas basadas en otros compuestos<sup>104</sup>.

En general se presentan como resinas líquidas que precisan de la acción de endurecedores para lograr la reticulación de sus moléculas y, por tanto, su paso al estado sólido. Los endurecedores utilizados pueden ser de varios tipos, siendo necesaria la aplicación de calor para conseguir el curado de la resina con algunos de ellos mientras que con otros el proceso puede desarrollarse a temperatura ambiente<sup>105</sup>.

Con una intención práctica, es usual que estas resinas se presenten comercialmente en forma de dos componentes premezclados que se unen en el momento de su aplicación. Es importante seguir las recomendaciones del fabricante sobre la mezcla de los componentes ya que una variación en las proporciones aconsejadas puede revertir en un curado incorrecto de la resina. En el Anexo I se refleja la descripción de propiedades de tres resinas epoxy de dos componentes distribuidas comercialmente por la firma Comercial Feroxa, S.A. donde se incluyen las proporciones adecuadas que deben formar parte de la mezcla.

---

<sup>104</sup> Consultar: CURRY, Robert, "Marine Applications of Advanced Composites", *Primer curso sobre materiales compuestos aplicados a la construcción naval*, Blanca Parga Landa, Madrid, 1991 y VELSON HORIE, Charles, *Materials for conservation*, Butterworth, 1987, pág. 170-173.

<sup>105</sup> Ver además: GANNON, John A., "History and development of epoxy resins", *High performance polymers: Their origin and development*, Elsevier, New York, 1986.

En el proceso de curado, los poliepóxidos presentan un coeficiente de retracción mucho menor que las resinas de poliéster lo que es una ventaja desde el punto de vista del diseño, y éste puede ser reducido casi totalmente mediante el añadido de cargas y otros aditivos.

Las resinas epoxy presentan una buena resistencia a los agentes químicos (excepto ácidos fuertes y amoníaco) y una reducida absorción de agua<sup>106</sup>. Sus propiedades mecánicas y térmicas son también mejores que las del poliéster y han hecho de estos compuestos los más utilizados para la elaboración de estructuras reforzadas con fibras, principalmente de carbono, en la industria espacial y aeronáutica. Las propiedades de las resinas epoxy, en comparación con las de poliéster se recogen en la tabla del apartado II.3.3.2.4.- Comparación entre las matrices, en la página II.75.

La fuerte capacidad de adhesión que presentan las resinas epoxídicas ha motivado su utilización para la elaboración de adhesivos especiales, empleados a menudo también en campos artísticos. Este mismo efecto puede provocar dificultades en el proceso de desmoldeo de piezas fabricadas con esta resina.

Las aplicaciones de las resinas epoxy han sido numerosas en el campo de la conservación-restauración, siendo la más generalizada la utilización de productos basados en estas resinas para la restauración de madera.

---

<sup>106</sup> Examinar: resina epoxy en AA.VV., *Procesos de transformación de la fibra de vidrio*, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1994.

### II.3.3.2.3.- Resina fenólica

Este tipo de resinas se obtienen partir de la reacción del aldehído fórmico o formaldehído con el fenol. Con el fin de simplificar los procesos de fabricación en los que se emplean estas resinas, la polimerización se realiza en dos fases<sup>107</sup>.

La primera fase es una reacción de adición que tiene diferentes características dependiendo de la proporción de cada uno de los reactivos y de las condiciones de pH y temperatura en las que se desarrolla. La variación de estos factores da como resultado la obtención de productos diferentes que necesitarán también distintos tratamientos para completar su polimerización.

Cuando esta fase inicial se realiza en medio ácido y con un exceso de fenol respecto al formaldehído se obtienen las llamadas *novolacas* mientras que si se provoca una mayor proporción de éste último y se mantiene en medio alcalino se obtienen los *resoles*.

Los prepolímeros producidos en esta primera etapa son solubles y termoplásticos y pueden mantenerse en estado líquido hasta su utilización.

---

<sup>107</sup> Ver resinas fenólicas en MIRAVETE, Antonio, *Los nuevos materiales en la construcción*, Centro Politécnico Superior, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1994.

La segunda fase es la destinada a completar la polimerización de la resina hasta obtener como producto final un sólido duro, insoluble y que no funde con el calor. Esta fase desarrolla habitualmente en condiciones de presión y temperatura elevadas.

En el caso de las novolacas, el curado se realiza aportando a la resina primaria productos endurecedores que liberan formaldehído al descomponerse por efecto de la temperatura aplicada durante el proceso.

En los resoles la polimerización se completa únicamente mediante la aplicación de altas temperaturas.

Dependiendo de las propiedades que se quieran obtener en las resinas y las aplicaciones a que se vayan a destinar, se hacen con mucha frecuencia mezclas de este tipo de resinas con cargas y aditivos de muy diferentes tipos. Una gran parte de estas mezclas se agrupan con la denominación de "baquelitas", que en general poseen muy buenas propiedades dimensionales y de resistencia mecánica y térmica, siendo reducidos los costes de su procesado.

Los materiales compuestos de resina fenólica con refuerzo de fibra de carbono o fibra de vidrio son empleados actualmente en la fabricación de estructuras interiores en la industria aeronáutica. Estos materiales presentan muy buenas propiedades de resistencia al choque y a los ataques de tipo químico y una estabilidad dimensional excelente. Otras características muy valoradas en estos materiales son su baja inflamabilidad y la reducida emisión de humo y gases

tóxicos en comparación con los materiales realizados con otros tipos de resinas<sup>108</sup>. En la tabla Propiedades mecánicas de laminados FRP del apartado II.3.3.2.4<sup>109</sup>, página77, se recogen más exactamente las propiedades de los materiales compuestos realizados con resina fenólica y fibra de vidrio.

#### **II.3.3.2.4.- Comparación entre las matrices**

En la Tabla II.2 se muestran los valores de las propiedades más significativas de las resinas poliéster, epoxy y fenólicas. En ella se pueden destacar los valores de resistencia y propiedades elásticas de las resinas epoxídicas, las cuales tienen en general mejor comportamiento mecánico que el resto.

Las resinas de poliéster son las que presentan una mayor contracción durante el curado lo que supone una importante desventaja, además de tener un coeficiente de dilatación térmica elevado.

Las propiedades de distorsión a temperaturas elevadas son mejores en las resinas fenólicas aunque son éstas las que manifiestan una mayor tendencia a la absorción de agua ya que retienen el que se produce en forma de vapor durante el proceso de curado.

---

<sup>108</sup> Ibidem.

<sup>109</sup> II.3.3.2.4.- Comparación entre las matrices.

Por lo que se refiere a las aplicaciones a que se destinan preferentemente cada tipo de resina, éstas van a estar condicionadas evidentemente por sus propiedades, así como por otras características tales como el precio de la resina y los costes y dificultades que presenta su procesado por el método que se vaya a utilizar.

Así, la resina de poliéster se emplea con gran asiduidad para aplicaciones de tipo general debido a que presenta unas buenas propiedades mecánicas y de resistencia al deterioro por agentes químicos y su precio es reducido en comparación con otros tipos de resinas. Además, existen en el mercado una gran variedad de resinas de este tipo que por sus propiedades pueden ser utilizados en aplicaciones mucho más específicas.

Las resinas epoxy han demostrado ser las que tienen mejores propiedades mecánicas por lo que se emplean de un modo preferente para la elaboración de componentes estructurales en la industria aeronáutica y espacial. Estas resinas, al igual que ocurre con las de poliéster, tienen una buena resistencia al envejecimiento aunque cuando no se exponen a la acción del oxígeno del aire y la luz ultravioleta es conveniente darles un tratamiento para reducir en lo posible los efectos de estos agentes de deterioro.

**TABLA II.2<sup>110</sup>**

COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DE LAS RESINAS EPOXY, POLIÉSTER Y FENÓLICAS					
Propiedades	Unidades	Poliéster (ortoftálico)	Poliéster (isoftálico)	Epoxy (DGEBA)	Fenólica
Modulo de Young	GPa	3,2	3,6	3,0	3,0
Modulo Poisson		0,36	0,36	0,37	
Resistencia a tracción	MPa	65	60	85	50
Deformación de rotura	%	2	2,5	5	2
Resistencia a compresión	MPa	130		130	
Temperatura de distorsión (HDT)	° C	95		110	1
Coefficiente de dilatación térmica	10 <sup>-6</sup> y C <sup>-1</sup>	100-200		60	
Contracción de curado	%	4-8		1-2	
Absorción de agua	%	0,1-0,3		0,1-0,4	

<sup>110</sup> PARGA LANDA, Blanca, "Aplicación de materiales compuestos al sector naval. Introducción", Primer Curso sobre materiales compuestos aplicados a la construcción naval, Vol. I, B. Parga Landa, Madrid, 1991. Tabla III, pág 13.

Otro aspecto importante que se debe considerar para la elección de una matriz es su comportamiento ante el fuego<sup>111</sup>. Este comportamiento viene determinado por las propiedades del material respecto a su facilidad de combustión, propagación de la llama y desprendimiento de calor, así como las características de generación de humo y gases tóxicos. Este último punto es de especial importancia en algunas aplicaciones de los materiales plásticos debido al peligro que supone la presencia de estas emanaciones que puede ocasionar falta de visibilidad, asfixia y estados de pánico en caso de incendio<sup>112</sup>.

El comportamiento de estos materiales ante el fuego está condicionado por una serie de factores. Así, además de la cantidad y tipo de los refuerzos o cargas presentes en el material, es también importante la proporción de resina y su naturaleza. En este sentido, una disminución de la cantidad de resina (en la medida en que no suponga una pérdida en las propiedades del material) revierte en un mejor comportamiento ante el fuego. Según el tipo son las resinas fenólicas las que presentan mejores condiciones, sobre todo por tener un bajo índice de emisión de humo que es muy elevado en el caso de las resinas de epoxy y poliéster.

---

<sup>111</sup> Ver comportamiento ante el fuego en MIRAVETE, Ibidem y AA.VV., *Los plásticos y el fuego*, Agrupación Nacional Autónoma de Industriales de Plásticos, Madrid, 1974.

<sup>112</sup> Ver características de la generación del humo en MIRAVETE, Ibidem, y VALEA PÉREZ, Ángel y GONZÁLEZ AREE, María Luz, *Resistencia y reacción al fuego de materiales plásticos y composites*, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial, Bilbao, 1994.

**TABLA II.3<sup>113</sup> PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAMINADOS FRP**

Material	Fracción Volumétrica Vf	Densidad (SG)	Módulo de Young E (GPa)	Módulo de Corte G(GPa)	Resistencia Tracción $\sigma_{IT}$ (MPa)	Resistencia Compresión (MPa)	Resistencia Cortadura (MPa)	Módulo de Young Específico (E/SG)	Resistencia Tracción Específica ( $\sigma_{IT}/SG$ )
Vidrio E poliéster (CSM)	0.18	1.5	8	3	100	240	75	5.3	67
Vidrio E poliéster (WR)	0.34	1.7	15	3,5	250	210	100	8.8	147
Vidrio E poliéster (unidireccional)	0.43	1.8	30	3.5	750	600	-	16.7	417
Vidrio E fenólica (WR y CFM)	0.61	1.6	13	-	180	170	91	8.1	112
Carbono/epoxi (alta resistencia unidireccional)	0.62	1.6	140	15	1500	1300	-	87	937
Carbono/epoxi (alto módulo unidireccional)	0.62	1.7	300	20	700	650	-	176	412
Aramida/epoxi (unidireccional)	0.62	1.4	50	8	1600	230	-	36	1143
Acero (calidad B o Lloids EH32)	-	7.8	207	80	325	340	190	26.5	42
Aluminio (aleación 5083)	-	2.8	70	26	150	150	87	25	54
Madera laminada (caoba)	-	0.6	7	1,0	25	25	8	11.7	67

<sup>113</sup> Curso de doctorado: *Diseño de estructuras marinas en materiales compuestos*, Prof.: Blanca Parga Landa, E.T.S.I. Navales. U.P.M., 1993

### II.3.4.- ESTRUCTURA DE LOS LAMINADOS

Un laminado puede estar formado por un número variable de capas superpuestas y, dependiendo de las propiedades de cada una de ellas y de la influencia sobre las otras, puede tener diferentes comportamientos ante la aplicación de una carga<sup>114</sup>.

La resistencia del material va a depender de manera importante de su estructura. Así, un mat, donde las fibras están distribuidas aleatoriamente, presenta una resistencia similar en todas las direcciones del laminado, por lo cual se le considera un material isótropo. Por el contrario, los laminados unidireccionales presentan la máxima resistencia ante una carga aplicada en la dirección paralela a las fibras, mientras que la resistencia en perpendicular a las fibras es mucho menor. Por ello se dice que es un material ortótropo.

En los laminados basados en tejidos se puede conseguir más fácilmente una resistencia que sea uniforme en todas las direcciones del material.

---

<sup>114</sup> Revisar: HULL, Derek, *Materiales compuestos*, Reverte, Barcelona, 1987, pág. 61 y 179 y RATWANI, M.M. y KAN, H.P., "Effect of stacking sequence on damage propagation and failure modes in composite laminates", *Damage in Composite Materials*, ASTM STP 775, K.L. Reinfnsnider Ed., American Society for Testing and Materials, 1982, pág. 211-228.

Teniendo en cuenta las características que posee cada uno de los laminados, es posible prever la respuesta del material a cualquier tipo de carga y realizar el diseño de la pieza de acuerdo con la aplicación concreta a que se vaya a destinar<sup>115</sup>.

### **II.3.4.1.- FABRICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS**

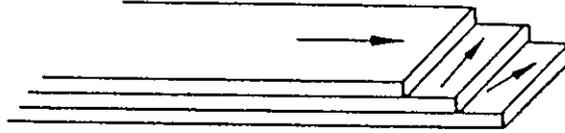
La fabricación de los materiales compuestos va a ser caracterizada esencialmente por dos aspectos que determinarán las decisiones a tomar en las etapas de concepción de un proyecto, así como en los procesos de selección de materiales y equipos previos a su realización<sup>116</sup>. Estos aspectos son la elección del tipo de estructura empleada y la selección del método de fabricación que se va a utilizar.

a) La elección del tipo de estructura vendrá determinada por los criterios de diseño así como por la aplicación que se vaya a dar al material y sus requisitos. Las estructuras más características que se han venido utilizando son el laminado y la estructura tipo "sandwich".

---

<sup>115</sup> Ver además: AA.VV., *Finite element analysis of fracture propagation in orthotropic materials*, Engineering Fracture Mechanics, Cornell University, June 1986.

<sup>116</sup> DODKINS, A.R. *Técnicas de fabricación*, Curso de Materiales Compuestos, E.T.S. Navales, Universidad Politécnica de Madrid, 1992.



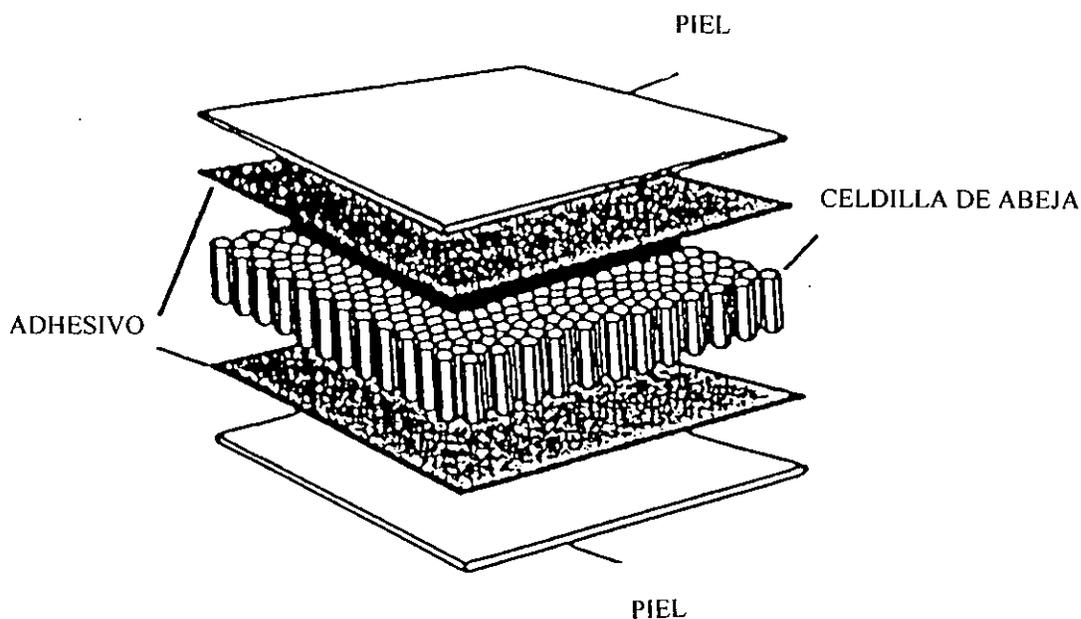
**Figura II.6** Estructura tipo laminado.

El laminado está formado por una serie de capas de fibra superpuestas que se unen entre sí mediante una matriz de resina. La presente investigación centra su principal interés en el estudio de estructuras de laminado.

Un sandwich está constituido por dos caras o laminados superficiales (también llamadas pieles) que se encuentran pegadas con sendas capas de adhesivo a ambos lados de un núcleo central. Esta formación da lugar a estructuras que presentan gran resistencia a la flexión y al pandeo<sup>117</sup>.

---

<sup>117</sup> Este tipo de estructura ha sido tratado en profundidad en la Tesis Doctoral: RODRÍGUEZ SANCHO, Isabel, *Nuevos soportes rígidos con fines artísticos*, Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 1994.



**Figura II.7** Estructura tipo sandwich.

b) La selección del proceso de fabricación se llevará a cabo teniendo en cuenta tres factores principalmente: el tipo de estructura elegido, los requerimientos de la aplicación que se va a dar al material (propiedades y acabados finales, etc.) y el coste del proceso.

Los principales procesos de fabricación que se pueden utilizar son<sup>118</sup>:

- a) Moldeo por contacto manual. Sobre un molde se aplica una capa de desmoldeante y una resina de superficie (gel-coat), procediendo a continuación a colocar capas

<sup>118</sup> Ver especificaciones y dibujos en el Anexo II. Proporcionados por Vetrotex y Reposa.

de refuerzo que se van impregnando en resina y prensando con rodillo. El número de capas dependerá del grosor que se quiera dar a la pieza. El proceso suele desarrollarse a temperatura ambiente, aunque la aplicación de calor en la sala de trabajo acelera considerablemente la polimerización.

- b) Moldeo por vacío. El proceso consiste en colocar sobre un molde las diversas capas que van a formar el material, envolver el conjunto con una lámina elástica y realizar el vacío dentro de ella. El efecto uniforme de la presión atmosférica durante la polimerización realiza el prensado del material y reduce la cantidad de burbujas de aire atrapadas en él. Es adecuado sobre todo para piezas planas y de gran tamaño y puede realizarse con o sin aplicación de calor.
- c) Moldeo por inyección. Se utilizan un molde y un contra-molde, colocando en el espacio entre ellos el material de refuerzo e inyectando la resina por un orificio mediante un proceso mecánico automático. Se utiliza para piezas con formas difíciles y para dar un buen acabado por ambas caras.
- d) Moldeo por proyección simultánea. Se utiliza para fabricación de grandes series de piezas y consiste en la aplicación a la vez sobre el molde de la resina y el refuerzo de fibra cortado en pequeños trozos. Esta mezcla se compacta haciendo presión con un rodillo.
- e) Moldeo por compresión, prensa en frío. Las capas de refuerzo se impregnan con la matriz de resina y se comprime con un sistema de molde y contra-molde en una prensa. No se aporta calor exterior sino que se utiliza solamente el que produce la resina al polimerizar.

- f) Moldeo por compresión, prensa en caliente. Es similar al de prensa en frío, pero en este caso la prensa dispone de molde y contra-molde metálicos que se calientan para favorecer el proceso de polimerización del material.
- g) Enrollamiento filamentario. Utilizado para piezas de revolución. Consiste en ir depositando sobre un mandril un hilo de refuerzo que previamente se ha impregnado de resina haciendolo pasar por una cubeta.

Según la presentación de las fibras, se pueden distinguir igualmente dos tipos de procesos <sup>119</sup>. Cuando las fibras o tejidos se presentan secas y la matriz se añade durante el propio proceso de fabricación, éste se denomina “por vía húmeda”. Si, por el contrario, el refuerzo de fibra se presenta ya con el contenido necesario de resina, el proceso recibe el nombre de preimpregnado.

El tratamiento del laminado en húmedo es una técnica que requiere tiempos prolongados de curado (aproximadamente una semana, dependiendo del tipo de resina y del espesor del laminado) y un procedimiento más laborioso de elaboración. El método de fabricación utilizado más frecuentemente para esta presentación es el moldeo por contacto manual (habitualmente a temperatura ambiente), aplicando de forma sucesiva la resina sobre las capas de fibra seca y procurando, mediante la utilización de brochas

---

<sup>119</sup> Ver además: elección del procedimiento en AA.VV., *Procesos de transformación de la fibra de vidrio* Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1994 y AVENDAÑO SARMIENTO, Luis, *Iniciación a los plásticos*, Centro Español de Plásticos, Barcelona, 1994, pág. 59 y HULL, Derek, *Materiales compuestos*, Reverte, Barcelona, 1987, pág. 6.

y rodillos, conseguir la completa impregnación de la fibra con la resina. La ventaja de este método es la economía ya que no requiere medios costosos. Por contra, el peso del laminado no es controlable.

La elevación de la temperatura alrededor de las piezas durante la fabricación contribuye a acelerar el proceso y a mejorar algunas propiedades del laminado (entre ellas un aumento en la tenacidad).

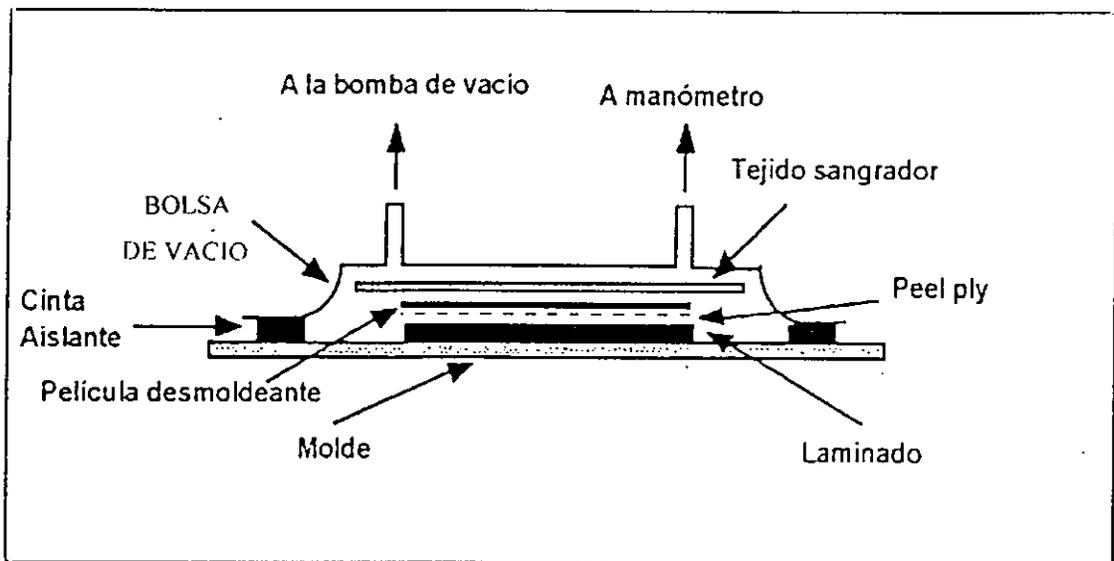
También es posible la laminación por vía húmeda mediante la utilización de vacío de forma que, una vez depositado el estratificado en el molde (en el que anteriormente se habrá aplicado una capa de desmoldeante), se hace el vacío utilizando una membrana flexible o una bolsa de vacío, es decir, un conjunto de capas formado, entre otros materiales, por un "peel ply", un tejido aireador y un tejido sangrador<sup>120</sup>(Ver figura II.8). Este sistema de laminación evita la aparición de porosidad en el interior del laminado y consigue una mejora del producto final.

Pueden obtenerse resultados aun mejores en la calidad del laminado combinando el método de vacío con la aplicación de presión mediante la utilización de prensas o de presión y calor en un autoclave<sup>121</sup>.

---

<sup>120</sup> Revisar Anexo I.

<sup>121</sup> Ver también: PARGA LANDA, Blanca, "El proceso de producción de materiales compuestos avanzados. Influencia de las variables de proceso en las propiedades finales de los laminados", *XXXII Sesiones Técnicas AINE*, noviembre 1992, pág 4.



**Figura II.8** Esquema mínimo de una bolsa de vacío

El preimpregnado está generalmente asociado con el uso de fibras avanzadas como el vidrio S, carbono y aramida, todas ellas con una matriz de altas prestaciones como es la resina epoxy. La distribución de fibra-resina es más uniforme y posee un mayor volumen de fibra con menos resina debido a su distribución homogénea.

Con la presentación de fibra preimpregnada pueden utilizarse diferentes procesos de moldeo por contacto manual como son el curado en bolsa de vacío, con vacío más temperatura o con vacío, temperatura y presión (en autoclave). Estos procesos hacen que el sobrante de resina se elimine más fácilmente que en el proceso exclusivamente manual, minimizándose el peso. La calidad del producto final depende de la optimización de sus condiciones de fabricación (curado, vacío, presión, etc.), siendo el mejor método para

obtener las propiedades idóneas en el material el realizado utilizando el sistema de vacío por medio del autoclave<sup>122</sup>.

Con la utilización de un preimpregnado se obtiene un laminado de mejores propiedades que los realizados por vía húmeda y recientemente se dispone en el mercado de preimpregnados que curan a baja temperatura lo que hace más fácil su utilización. Además, su empleo está justificado por el hecho de que se obtiene una reducción de peso y de coste de fabricación<sup>123</sup>.

Los procesos de fabricación que se han utilizado en esta Tesis han sido el moldeo por contacto manual para las realizaciones por vía húmeda y el moldeo por contacto con vacío y calor y el moldeo por contacto con prensa en caliente para los preimpregnados. Además, para algunas realizaciones con estos últimos se ha desarrollado un proceso diferente, directo, innovador y asequible para el artista (Ver Capítulo IV) .

---

<sup>122</sup> Consultar: OROZCO MESSANA, Javier, *Introducción al Diseño con Composites*, AIMME Publicacions, 1988, pág. 40-41.

<sup>123</sup> GACÉN GUILLÉN, Joaquín, *Fibras acrílicas*, U.P.B., Tarrasa, 1982.

## II.3.4.2.- DEFECTOS EN LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Durante la fabricación de los laminados pueden aparecer defectos provocados por un mal diseño, un inadecuado proceso de realización en el ciclo de curado y acabado de las piezas, el empleo de materiales, útiles e instalaciones impropios, condiciones ambientales no controladas o la realización a cargo de personal no cualificado<sup>124</sup>.

Teniendo en cuenta estas circunstancias pueden determinarse las causas de los distintos tipos de defectos que se presentan, con la intención de prevenir su aparición. Los defectos más comunes que aparecen en los laminados son: porosidad, deslaminación, porosidad en capa y aparición de objetos extraños.

La porosidad consiste en la aparición de pequeños poros de aire en el material y las causas más frecuentes suelen ser la falta de presión durante el curado, la escasez de resina por un exceso de presión o sangrado, la no eliminación de sustancias volátiles o un excesivo desprendimiento de calor durante la reacción en el curado.

---

<sup>124</sup> Ver defectos en el proceso de fabricación en: CHAMORRO ALONSO, Francisco Javier, "Defectos en el proceso de fabricación. Su inspección y reparación", *Primer curso sobre materiales compuestos aplicados a la construcción naval*, Blanca Parga Landa, Madrid, 1991 y GARREN, Ramón A., "Effect of manufacturing defects and service-included damage on the strength of Aircraft composite structures", *Composite Materials Seventh Conference*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1986, pág. 5-33.

La deslaminación es la separación de capas contiguas del laminado, apareciendo normalmente en los bordes del mismo. Se puede producir por la acumulación de varias capas seguidas orientadas en el mismo sentido, por deformaciones producidas por la temperatura durante el curado, por la inclusión de impurezas en el material, por un desmoldeo incorrecto de la pieza o por impactos.

La porosidad en capa se manifiesta con pequeños poros de aire que aparecen entre dos capas contiguas del laminado. Las causas de este defecto pueden ser la escasez de resina en superficie o la no eliminación de sustancias volátiles, aunque en algunos casos el problema es directamente imputable al material utilizado.

La aparición de objetos extraños dentro de los laminados es debido en la mayor parte de los casos a errores humanos y falta de control durante la elaboración.

Clarke<sup>125</sup> describe otra serie de defectos en el material que se describen brevemente a continuación:

- Curado incompleto de la matriz, debido a un curado incorrecto o defectos en el material.
- Fracción volumétrica de fibra incorrecta, por exceso o defecto en la cantidad de resina.

---

<sup>125</sup> CLARKE, B. *An Introduction to the Ultrasonic Inspection of Composites*. Imperial College. London 1991. Citado por PARGA LANDA, B. en *El proceso de producción de Materiales Compuestos Avanzados: influencia de las variables de proceso en las propiedades finales de los laminados*, XXII Sesiones Técnicas de Ingeniería Naval, Alicante, 1992.)

- Defectos de adhesión, provocados por un curado incorrecto o por impurezas en el adhesivo o en las superficies a unir.
- Desalineación de fibras.
- Secuencia de apilación errónea, por fallos en el proceso de realización.
- Ondulación de las fibras, debida a una escasa compresión de las fibras de una capa.
- Defectos de las fibras, por falta de control de la calidad del material empleado.

La detección de defectos en el laminado puede hacerse por varios métodos siendo los más usuales la inspección visual, la comprobación de variaciones en el sonido al golpear ligeramente en la pieza y el uso de ultrasonidos y rayos X.

Además de estos pueden producirse otros defectos en la capa superficial del material compuesto, provocados también durante el proceso de fabricación<sup>126</sup>:

- Arrugamientos. Están causados por el ataque de disolventes del propio laminado en las capas superficiales de la resina, sobre todo por la falta de curado.
- Roturas superficiales. Cuando los componentes no han sido bien mezclados se pueden producir varios defectos, lo menos grave son moteados o estriados si se ha usado una pigmentación.

---

<sup>126</sup> Revisar además: *ASTM Designation: D 2563-70 Classifying visual defects in glass reinforced laminates and parts made therefrom*, pág. 616-628, donde se especifican los niveles visuales aceptables de los laminados de fibra de vidrio.

Si por vía húmeda se ha perdido homogeneidad en la aplicación o por presencia de ampollas o contaminación de suciedad ambiental en la capa anterior se producen deslaminaciones o saltados.

En casos graves cuando se producen curados distintos sobre todo dependiendo de la cantidad de catalizador, pueden aparecer roturas.

- Defectos superficiales en el acabado. Son pequeñas burbujas atrapadas en la capa superficial antes de su polimerización. Ocurre cuando la resina es demasiado viscosa.
- Trama de fibra visible. La trama de la fibra de vidrio reforzada es algunas veces visible en el acabado y se nota en la superficie. Esto ocurre cuando la resina es demasiado fina o el refuerzo se aplicó antes de que la capa superficial endureciera.
- Ojos de Pez. La resina seca produce en la siguiente capa unos puntos no impregnados en forma de redondeles mates hundidos que aparecen siguiendo las líneas del pincel.
- Craquelados. El craquelado puede ocurrir inmediatamente después de la creación de la obra o varios meses después. Aparece como unas pequeñas roturas en la superficie de la resina, la única evidencia inicial del craquelado es que la resina ha perdido su satinado en la superficie. Se produce por el uso de gran cantidad de resina o de una resina mal formada o deteriorada. Cuando a la capa superficial le ocurre este tipo de craquelados es que es demasiado dura y le falta elasticidad para las exigencias del laminado.

El craquelado que ocurre pasado algunos meses es debido a la exposición a la humedad o al ataque químico en una resina de no muy altas propiedades.

- Manchas internas secas. Aparecen en la utilización de refuerzos muy gruesos, y en la impregnación por vía húmeda de más de una capa a la vez. Este tipo de falta produce la total ruptura del compuesto por esa zona.

Cualquiera de los defectos descritos pueden ser reparados eliminando el material por capas hasta alcanzar el punto defectuoso y, una vez saneado el desperfecto, añadir láminas del mismo material encima con la posibilidad de reforzar la zona deteriorada<sup>127</sup>.

Este tipo de defectos pueden llegar a variar de forma importante las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los laminados. Sin embargo, su prevención es posible mediante un adecuado control del almacenaje de materiales y del proceso de fabricación y montaje del laminado, además de un estudio exhaustivo de las condiciones de servicio a que se verá sometido.

---

<sup>127</sup> Ver Reparación de materiales compuestos en: MIRAVETE, Antonio, *Los nuevos materiales en la construcción*, Centro Politécnico Superior, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1994, pág. 86-88 y CHAMORRO ALONSO, Op. cit., pág. 3.4.1-3.4.1.7.

En los soportes tipo sandwich se presentan una serie de problemas graves en las uniones de componentes y en la adhesión de las pieles o caras con el núcleo. Estos defectos se deben a deficiencias en el proceso de fabricación como contaminación de las superficies de adhesión o alineaciones inadecuadas de las capas a unir. La falta de métodos normalizados de inspección de las uniones adhesivas es un factor agravante de estas situaciones<sup>128</sup>.

---

<sup>128</sup> Para más información: ADAMS, R.D. y CAWLEY, P., "A review of defect types and non-destructive testing techniques for composites and bonded joints", *NDT International*, Vol. 21, nº4, Butterworth & Co., August 1988, pág. 208-222 y CARLSSON, Leif A. y PRASAD, Srinivas, *On facing/core debond fracture of sandwich beams*, Department of Mechanical Engineering, Atlantic University, Boca Ratón, Florida, pág. 1-23.

## II.3.5.- PROCESOS DE DEGRADACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos se ven afectados por una serie de procesos de degradación que pueden afectar a las propiedades finales de la obra. Estos procesos estarán determinados por las condiciones ambientales en las que se encuentre el material así como por las diferentes tensiones y cargas a las que puede estar sometido.

### II.3.5.1.- FRACTURA

En relación con este importante proceso de degradación de los materiales compuestos, resulta vital conocer tanto las causas que lo originan como su evolución en el seno del material.

*"La fractura en los materiales compuestos reforzados con fibras se caracteriza por el inicio y progresión de diversos mecanismos de fallo como son: fisuración de la matriz, despegue de la interfase, rotura de fibras y deslaminaciones entre las capas adyacentes de un laminado"<sup>129</sup>.*

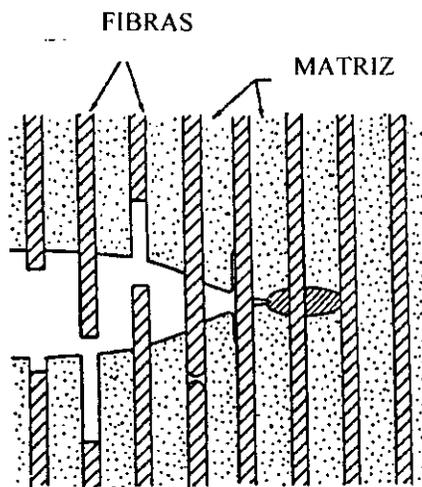
---

<sup>129</sup> PARGA LANDA, Blanca, Tesis doctoral: *Modelización de materiales compuestos a altas velocidades de deformación*, Madrid, 1988, pág 21.

De esta afirmación puede claramente extraerse que la resistencia a fractura del material y la posible aparición de fallos en él están determinadas por una serie de condicionantes como son: las propiedades de la matriz y las fibras, la resistencia de cada lámina y la del propio laminado, la secuencia de apilamiento de las láminas y sus espesores, el proceso de curado y el efecto de las condiciones ambientales, entre otros. Todos estos factores se tratarán posteriormente.

En relación con los componentes que integran el material compuesto, fibra y matriz, pueden definirse dos tipos posibles de fallos en el material<sup>130</sup>:

- 1.- Fisuras fibrilares, que dependen de las propiedades de la fibra. (En la Figura II.9 se muestra un esquema de la propagación de una fractura con rotura de fibras.)

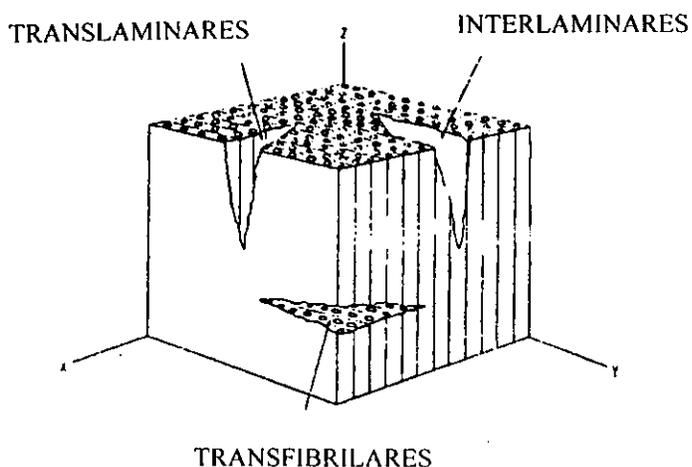


**Figura II.9** Fisuras fibrilares (Blanca Parga Landa, 1986, pág. 36)

---

<sup>130</sup> PARGA LANDA, Blanca, *Estudio de las delaminaciones en buques pesqueros*, ETSI, MADRID, 1986, pág. 36.

- 2.- Fisuras sublaminares, que son dominadas por las propiedades de la resina o matriz y pueden encontrarse en forma de: deslaminaciones o fisuras interlaminares, es decir, entre las laminas, y fisuras translaminares (en la Figura II.10 se pueden ver ilustrados los diferentes tipos de fisuras).



**Figura II.10.** Fisuras sublaminares (Blanca Parga Landa, 1986).

Las propiedades de la matriz y de las fibras que forman un material compuesto van a afectar directamente a las propiedades de éste. Así, aunque cada sistema fibra-matriz es único,



sus propiedades elásticas y de resistencia a rotura van a depender en gran medida de las de sus componentes, además de las condiciones de fabricación y procesado.

En primer lugar se van a tratar las principales propiedades que van a determinar el comportamiento ante la rotura de las fibras y matrices más usadas para la elaboración de los materiales compuestos: las fibras de carbono, las fibras de vidrio y las resinas poliéster y epoxy.

A continuación se tratará el tema de los procesos de rotura en los materiales compuestos partiendo de las propiedades de resistencia de las láminas unidireccionales y su comportamiento ante las diferentes tensiones que pueden aplicarse sobre ellas<sup>131</sup>.

### **II.3.6.- PROPIEDADES RESISTENTES DE LAS FIBRAS Y RESINAS.**

Las propiedades de resistencia de las fibras y de la resina van a determinar la posibilidad de aparición de fallos en el material compuesto<sup>132</sup>. En el caso de las fibras, la posible fractura de éstas, dentro del material, resulta ser un hecho crítico ya que son ellas quienes confieren en mayor

---

<sup>131</sup> En los apartados dedicados a las propiedades de resistencia y a la fractura se han seguido principalmente los planteamientos del profesor D. Hull.

<sup>132</sup> Ver datos sobre estas propiedades en las tabla II.1, Propiedades de las fibras de carbono y de vidrio a 20°C, pág. 39, y tabla II.2, Comparación de propiedades de las resinas epoxy, poliéster y fenólica, pág. 75.

medida al compuesto su rigidez y resistencia. Así, el tipo de fibra va a ser de gran importancia en la resistencia a fractura del material.

El tipo de matriz o resina elegido va a determinar las condiciones de aparición de fisuras sublaminares en el interior del laminado y el tipo de éstas.

### **II.3.6.1.- FIBRAS DE CARBONO.**

Las fibras de carbono están formadas por una serie de capas de grafito en las que los átomos se encuentran unidos entre sí por enlaces covalentes muy fuertes, mientras que entre las distintas capas las uniones son muy débiles<sup>133</sup>.

Debido a esto, las propiedades de módulo y resistencia tienen sus valores más altos en las fibras que presentan los planos de grafito orientados en la dirección paralela al eje de las fibras. La perfección en esta orientación varía de forma importante con los distintos procesos de fabricación y las condiciones en que se desarrolle. Si durante el procesado de las fibras aparecen imperfecciones, su resistencia se verá reducida debido a la acumulación de tensiones que se producirá en esos puntos débiles.

---

<sup>133</sup> Ver además: HULL, Op. cit., pág. 9-16.

La colocación que tengan los planos de grafito respecto al ancho de la fibra será determinante para las propiedades de resistencia en su dirección transversal.

Estas fibras son muy frágiles, siendo elásticas por debajo de su tensión de rotura. La deformación de rotura es menor en las fibras de alto módulo elástico que en las de alta resistencia. En todo caso, la resistencia de las fibras de carbono es muy variable de unas a otras.

### **II.3.6.2.- FIBRAS DE VIDRIO.**

La resistencia a la rotura de la fibra de vidrio se ve afectada por un factor muy importante que es el deterioro experimentado por las fibras durante los trabajos de procesado cuando rozan entre ellas. Para reducir los efectos de este desgaste se puede aplicar, en las etapas iniciales del proceso, una capa de ensimaje sobre las fibras que ayudará a protegerlas<sup>134</sup>.

El ensimaje a usar sobre las fibras depende de la función a la que se destinen éstas y su aplicación sobre ellas se realiza rociándolas con una solución de un polímero en agua para conseguir una fina cubierta. Las funciones que cumple esta capa de ensimaje son:

- Proteger la superficie de cada fibra del deterioro,
- Hacer de unión entre las fibras para hacer más fácil su procesado posterior,

---

<sup>134</sup> Para más información consultar: HULL, Op. cit., pág. 17-19.

- Realizar una acción lubricante para las fibras y reducir el rozamiento con los elementos de tensión e hilado en los trabajos de procesado,
- Reducir la producción de electricidad estática,
- Proveer una superficie de unión que favorezca la afinidad química entre la fibra y la futura matriz y sea compatible con ella para aumentar la energía de adherencia de la interfase.

Es inevitable que a pesar de todo se produzca algo de deterioro y, por consiguiente, aún van a sufrir variaciones considerables las propiedades de resistencia de las fibras.

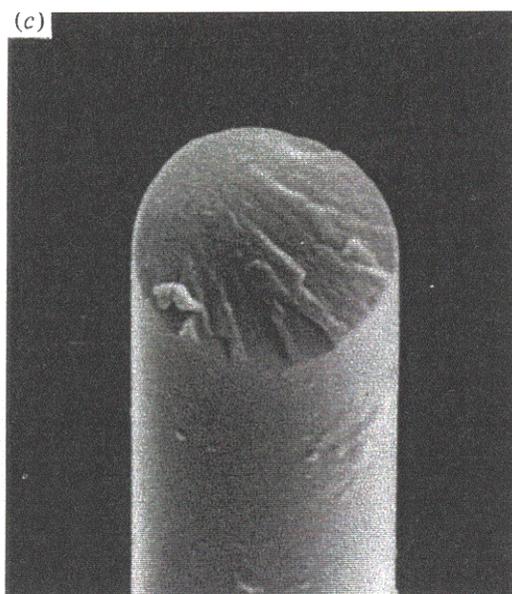
El deterioro mecánico se va a producir de manera aleatoria en las fibras y se manifestará con pequeños cortes en la superficie.

### **II.3.6.3.- IMPORTANCIA DE LA FLEXIBILIDAD.**

El curvado que las fibras van a sufrir durante su procesado va a dar lugar a esfuerzos de tracción que pueden producir su rotura. Si las fibras no disponen de la flexibilidad suficiente, se encontrará dificultad para manejarlas y se producirán roturas durante el proceso de manipulación. La facilidad que tengan las fibras para curvarse estará influenciada en gran medida por su diámetro.

Junto con los esfuerzos de flexión, pueden producirse otros de tracción en la dirección de la fibra durante su manejo o en el proceso de moldeo, que van a incrementar la posibilidad de que se produzcan roturas en las fibras<sup>135</sup>.

Durante la deformación y fractura de un material compuesto, y sobre todo en la zona donde se están propagando las grietas, la flexibilidad de las fibras, su diámetro y su resistencia van a determinar las características del proceso (en las Figuras 11 y 12 aparecen dos micrografías electrónicas de barrido de fibras rotas, una de carbono y una de vidrio. Extraídas del libro: HULL, Derek, *Materiales compuestos*, Reverte, Barcelona, 1987, pág. 25<sup>136</sup>).

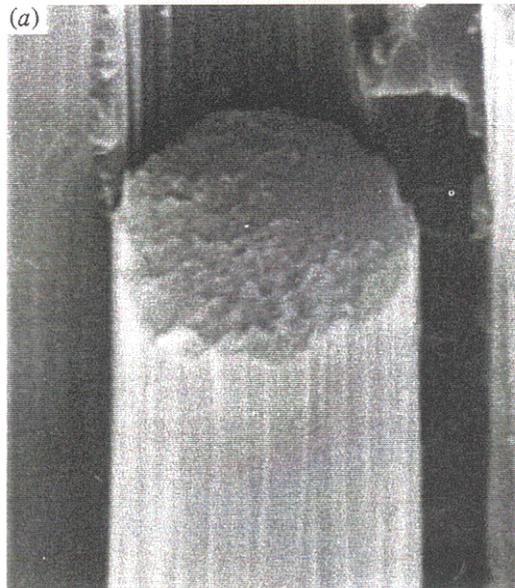


**Figura II.11.** Fibra de vidrio rota a tracción.

---

<sup>135</sup> Ver además: HULL, Op. cit., pág 25-28.

<sup>136</sup> En este capítulo se incluyen varias referencias gráficas extraídas de diversas fuentes bibliográficas (entre ellas principalmente *Materiales compuestos* de Derek HULL), debido a su aportación para clarificar algunos términos descritos.



**Figura II.12.** Fibra de carbono rota a tracción.

Durante los procesos de manipulación y tratamiento de las fibras, es importante que éstas no se rompan, resistiendo las operaciones simples a las que son sometidas y dando respuesta a los requerimientos que se le exigen. Se ha podido comprobar durante esta investigación que tanto las fibras de vidrio como las de carbono soportan adecuadamente la manipulación, sin romperse con facilidad.

#### **II.3.6.4.- RESINAS POLIÉSTER Y EPOXY.**

La propiedad de una resina que determina de forma más importante el comportamiento en fractura de un laminado es la tenacidad de fractura. Esta propiedad es la que va a condicionar principalmente la aparición y desarrollo de fisuras sublaminares en el material.

La tenacidad de fractura depende del tipo de resina y de las condiciones en que se realice su curado. Así, es posible aumentar la tenacidad de la resina mediante la aplicación de postcurados.

En este sentido, las resinas epoxy tienen un mejor comportamiento que las poliéster<sup>137</sup>, presentando mejores propiedades elásticas y de resistencia. Además, las resinas de tipo epoxy son también las que poseen una mayor resistencia de la interfase entre fibra y matriz en los compuestos<sup>138</sup>.

#### **II.3.6.5.- RESISTENCIA DE LA INTERFASE.**

Un factor que resulta determinante en las propiedades de resistencia a rotura de los materiales compuestos, así como en su comportamiento en presencia de humedad y agentes corrosivos, es la interfase fibra-matriz.

Los materiales compuestos que presentan una interfase débil tienen características de resistencia y rigidez que son relativamente bajas pero en cambio tienen una elevada resistencia a rotura. Sin embargo, los materiales que tiene una interfase más fuerte presentan propiedades de resistencia y rigidez elevadas pero son frágiles. Este comportamiento se encuentra relacionado

---

<sup>137</sup> Consultar además: HULL, Op. cit., pág. 28-31 y Thermosetting resins en KINLOCH, A. J., "Micromechanisms of crack extension in polymers", *Metal Science*, August-September 1980.

<sup>138</sup> Los datos relacionados con estas propiedades pueden verse en la tabla II.2.- Comparación de propiedades de las resinas epoxy, poliéster y fenólicas, pág. II.75.

con la facilidad con que se produzca el desprendimiento o rotura de la unión de la matriz y las fibras durante el proceso de propagación de la fractura<sup>139</sup>.

Entre los procesos de rotura que pueden producirse en la interfase fibra-matriz pueden distinguirse dos tipos: la rotura adhesiva y la rotura cohesiva. La rotura de tipo adhesivo se origina cuando se produce una separación en la interfase y la matriz se desprende de las fibras, mientras que la de tipo cohesivo requiere la rotura de las fibras o de la matriz.

El hecho de que se produzca el tipo de rotura adhesiva o cohesiva depende de las propiedades de resistencia relativas que presenten por un lado la interfase y por otro las fibras o la matriz.

### **II.3.7.- RESISTENCIA EN MATERIALES COMPUESTOS.**

Para el estudio de las roturas en los laminados resulta básico el conocimiento del desarrollo de la rotura en una lámina individual, ya que la fractura en modo secuencial de cada una de las láminas que forman el material, junto con los fallos interlaminares, van a condicionar el desarrollo de dicho proceso.

---

<sup>139</sup> Ver: HULL, Op. cit., pág. 37-39.

En primer lugar se va a analizar la influencia de las propiedades de la fibra y matriz que forman parte de una lámina unidireccional sobre el comportamiento elástico y la resistencia a rotura de la lámina. Esta estructura es la más sencilla y su estudio es útil para la determinación de las distintas propiedades de resistencia de los laminados<sup>140</sup>.

### II.3.7.1.- LÁMINAS UNIDIRECCIONALES.

Las propiedades de rigidez y de resistencia a tracción y a cortadura en una lámina unidireccional, al igual que ocurre con otras de sus propiedades, no son isotrópicas, es decir, son diferentes si se miden en distintas direcciones. En el caso de las propiedades citadas, son mucho menores en sentido transversal a las fibras que en la dirección paralela a las mismas.

Esto es debido a que las propiedades en sentido transversal vienen determinadas por las propiedades que tenga la matriz mientras que las que se pueden observar en la dirección paralela a las fibras están determinadas por las propiedades de éstas<sup>141</sup>.

La fractura de una lámina que se encuentra sometida a tensiones está condicionada por las características de la carga que se aplique y, para tener un conocimiento exhaustivo de los

---

<sup>140</sup> Revisar además: HULL, Op. cit., pág. 129 y REIFSDNIDER, Kennet L., "Damage-tolerant polymer composite systems", *Journal of Metals*, November 1988, pág. 53.

<sup>141</sup> AA.VV., "Application of the principles of linear fracture mechanism to the composite materials", *International Journal of Fracture*, Maritimus Nijhoff Publishers, Netherlands, 1982, pág. 3-15.

efectos sobre la lámina, hay que tener en cuenta que no todas las fibras que forman la lámina tienen la misma resistencia sino que ésta es variable de unas fibras a otras y está influida por los posibles defectos que puedan encontrarse en ellas.

El estudio de las tensiones que actúan sobre una lámina permitirá llegar a una explicación de los mecanismos de propagación de las grietas, a realizar un análisis de los niveles de energía que se requieren para su crecimiento y a establecer su relación con la interfase fibra-matriz y la resistencia de ésta.

Las resinas de poliéster y epoxy tienen un comportamiento de esfuerzos-deformaciones no lineal, pudiendo experimentar antes de la rotura una deformación viscoelástica elevada.

La respuesta que una lámina tenga a las tensiones depende de los valores relativos de deformación de rotura que tengan la matriz y las fibras (una representación esquemática de la rotura de dichos componentes, matriz y fibra puede verse en la Figura II.13). Cuando la deformación de rotura de la fibra de la lámina sea mayor que la de la resina, la matriz se romperá antes que la fibra y las cargas se transmitirán a las fibras (Figura II.13b.). Cuando la proporción de fibra dentro del laminado sea pequeña las fibras serán incapaces de soportar esa carga y se romperán. Cuando la proporción de fibras es grande la matriz absorbe solo una parte pequeña de la carga, de manera que, cuando se rompe, la transmisión de esfuerzos que se produce hacia las

fibras no resulta ser suficiente para provocar la rotura. En este punto la carga sobre la lámina puede incrementarse hasta alcanzar el valor de tensión de rotura de las fibras<sup>142</sup>.

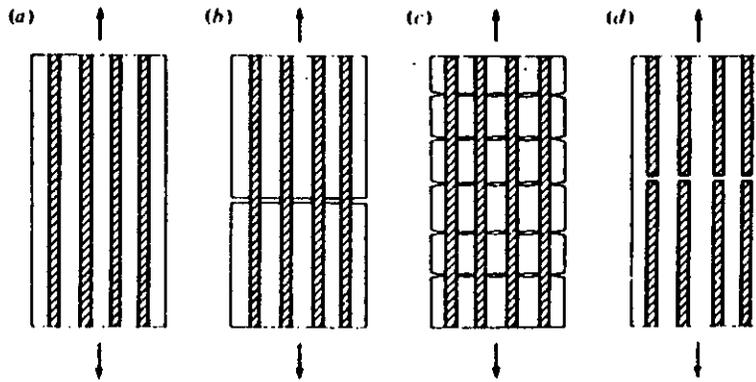
En este último caso puede producirse un agrietamiento múltiple en la resina cuando, debido a que la fibra y la resina están muy unidas entre sí, las primeras grietas no producen la descarga completa sobre las fibras de las tensiones que soporta la resina (Figura II.13c). La fractura total del material no llega a producirse y, a medida que va creciendo la deformación de la lámina, se van produciendo nuevas grietas<sup>143</sup>.

Cuando la deformación de rotura de la fibra de la lámina sea menor que la de la resina, las fibras se romperán antes que la matriz y transmitirán a ésta la carga que sostenían (Figura II.12d). Cuando la rotura de la fibra se produce en láminas de baja proporción de fibras, la tensión adicional que se descarga sobre la matriz no es suficiente para romperla. Sin embargo, por la presencia de los huecos en las puntas de la fibra, la capacidad de la resina para soportar la carga ha disminuido. Cuando la proporción de fibras en el material es grande, la carga transmitida a la matriz cuando se produzca la rotura de la fibra será muy grande y no podrá ser soportada por ésta haciendo que la matriz se rompa cuando se produzca la rotura de la fibra.

---

<sup>142</sup> Consultar: HULL, Op. cit., pág. 129-131.

<sup>143</sup> Ver también: "Damage-Tolerant Polymer Composite Systems", *Journal of Metals*, November 1988, pág. 52.



**Figura II.13** Distintos modos de rotura (Derek Hull, 1987, pág. 132).

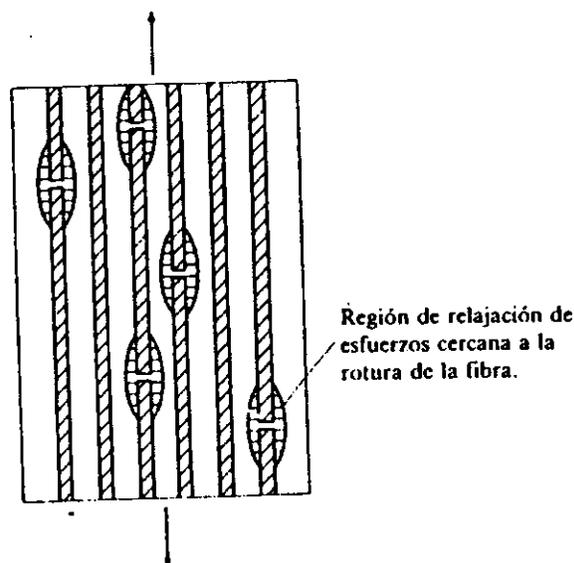
En los materiales compuestos basados en fibra de carbono y resina epoxy la deformación de rotura de las fibras de refuerzo es menor que la de la matriz.

En los materiales compuestos de fibra fabricados a partir de polímeros la aportación de la resina a la resistencia que presenta el material a la tracción longitudinal es pequeña.

Se han propuesto dos modelos para explicar la rotura de fibras en un laminado<sup>144</sup>.

<sup>144</sup> Ver también: HULL, Op. cit., pág. 139.

- *Modelo de debilitamiento acumulativo* (Debido a Rosen). Este modelo supone que los defectos en las fibras se distribuyen de forma aleatoria y, cuando se carga la lámina y a medida que la tensión crece, las fibras se rompen por los puntos en que se encuentran más debilitadas. La primera rotura puede propagarse inmediatamente a través de toda la sección, aunque esto solo sucede cuando las fibras están muy fuertemente unidas a la matriz y la matriz es muy frágil. En general, cuando se produce la rotura de una fibra aislada, ésta no se propaga de forma inmediata (en la Figura II.14 aparece una ilustración del Modelo de debilitamiento acumulativo).



**Figura II.14** Rotura de una lámina según el modelo de debilitamiento acumulativo de Rosen (Derek Hull, 1987, pág. 138).

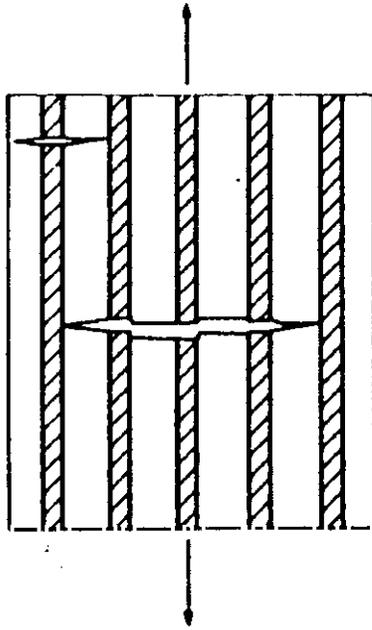
Las deformaciones que se producen en el material en los alrededores de los extremos rotos de la fibra provocan que haya una parte de la fibra que no soporte la carga completa. La resistencia a cortadura de la interfase va a determinar el volumen de material que se verá afectado en ese proceso.

El fallo progresivo de las fibras produce un debilitamiento acumulativo y, por tanto, una redistribución de la carga. Este modelo propone que la rotura sucede en el momento en que una capa transversal a la sección de la lámina se encuentra tan debilitada que no puede sostener más la carga aplicada sobre ella.

- *Modelo de propagación de la rotura* (Debido a Zweben). Para este modelo las etapas iniciales de la rotura son las mismas que para el modelo anterior. Sin embargo, a medida que se rompe cada fibra, la redistribución de los esfuerzos que ésta soportaba ocasionará tensiones adicionales en las fibras vecinas, es decir, hay un efecto de amplificación de esfuerzos. De esta forma se aumenta la probabilidad de que la rotura se produzca entre las fibras inmediatamente contiguas. La rotura de fibras se irá incrementando a medida que se produzca un aumento de la carga y se ocasione una rotura de forma secuencial de fibras<sup>145</sup> (en la Figura II.15 aparece una ilustración del Modelo de propagación de la rotura).

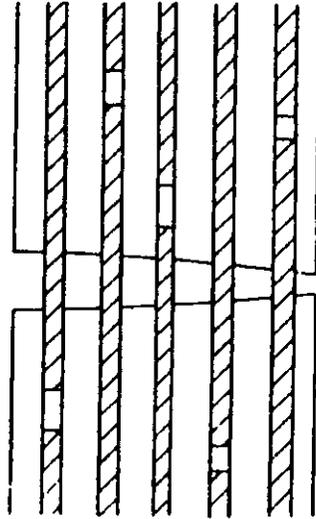
---

<sup>145</sup> Ver además: WELLS, J.W. y BEAUMOUL, P.W.R., *Correlations for the Fracture of Composites Materials*, Cambridge University, Engineering Department, National Technical Information Service, Jul 1981, pág. 1-16.



**Figura II.15.** Modelo de propagación de la rotura (Derek Hull, 1987, pág. 139).

El *modelo de debilitamiento acumulativo* despreciaba los efectos de concentración de esfuerzos alrededor de las fibras rotas, sin embargo, según este nuevo modelo la resistencia de la lámina a la rotura dependerá también de los procesos localizados de deformación y rotura que se presentan en los extremos rotos de las fibras, ya que determinan la importancia de la amplificación de los esfuerzos y el volumen de material sobre el que se producirá la redistribución de los mismos (en la Figura II.16 aparece un esquema descriptivo de fibras rotas).



**Figura II.16.** Fibras rotas en torno a una grieta en la resina (Derek Hull, 1987, pág. 149).

#### **II.3.7.1.1.- Interacción de las grietas sobre las fibras.**

Para una fibra que se halla perfectamente unida a la matriz, la máxima concentración de los esfuerzos cortantes en la dirección paralela a la interfase se encuentra localizada en el extremo de la fibra. Si en este punto se llega a superar la resistencia a cortadura de la interfase o la del material de la matriz más próximo, se producirá la rotura en la interfase o en la zona más cercana a ella. La rotura se originará en el extremo de la fibra y se propagará a lo largo de ella cuando vaya creciendo el esfuerzo que se aplica sobre el sistema<sup>146</sup>.

---

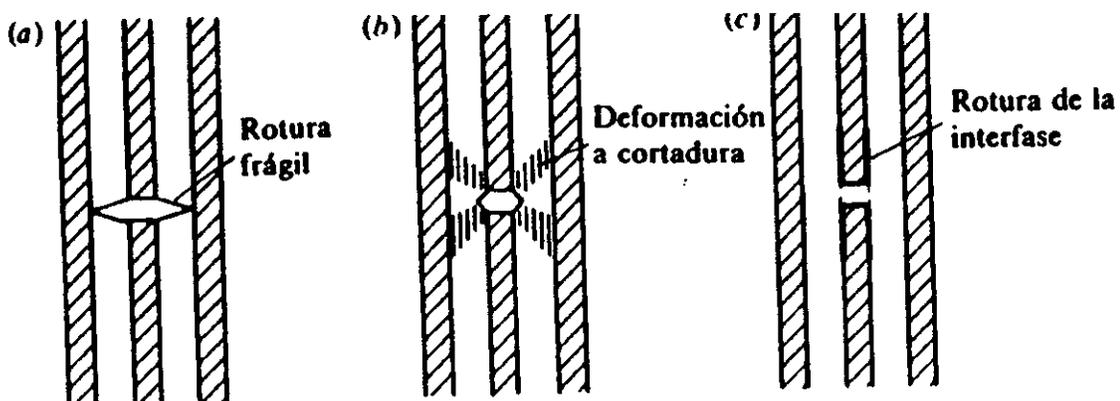
<sup>146</sup> Ver además: DOREY, Graham, *Fracture of composites and damage tolerance*, Materials Department, Royal Aircraft Establishment, Hampshire y HULL, *Ibidem*.

Los procesos más importantes que pueden ocurrir en una fibra que se rompe son:

- en un principio la grieta de la fibra se propaga a la matriz que la rodea en forma de una grieta frágil,
- como consecuencia de ello la matriz se deforma plásticamente para poder contrarrestar la grieta aguda y de esta forma se extiende la zona de deformación a lo largo de la fibra,
- debido a las tensiones producidas se produce el fallo a cortadura en la interfase o en la matriz que se encuentran en contacto directo con la fibra o en la fibra que está en contacto directo con la matriz permitiendo a las fibras no cargadas contraerse dentro de la matriz.

En la Figura II.17 aparecen estos procesos producidos alrededor de la rotura de una fibra:

a) rotura frágil, b) deformación de la matriz, c) rotura de la interfase.



**Figura II.17.** Procesos de rotura (Derek Hull, 1987, pág 140).

La importancia que tenga en su desarrollo cada uno de estos procesos depende de las propiedades de las fibras, de las de la resina y de la proporción de fibras.

Cuando se ha producido una grieta en la matriz y en su propagación encuentra una fibra, se produce un esfuerzo en el extremo de la grieta que tenderá a provocar la rotura de la fibra, otro esfuerzo causará la separación por tracción en la interfase y, por último, otra tensión provocará la rotura a cortadura en la interfase.

Estos procesos están afectados por factores como la química de la interfase y la resina, el tratamiento superficial que se haya aplicado a las fibras, la fracción de volumen de fibras en el material y por las condiciones ambientales como temperatura y humedad<sup>147</sup>.

En la interfase es más probable que se produzca un agrietamiento a cortadura que un agrietamiento a tracción y por lo tanto aquél se producirá antes que éste durante el proceso de rotura.

---

<sup>147</sup> Ver: WATANABE, T. y YASUDA, M., "Fracture behaviour of sheet moulding compounds Part 2, influence of constituents on mechanical properties", *Composites*, Business Press Limited, January 1982, pág. 59-65 y HULL, Op. cit., pág. 141-142.

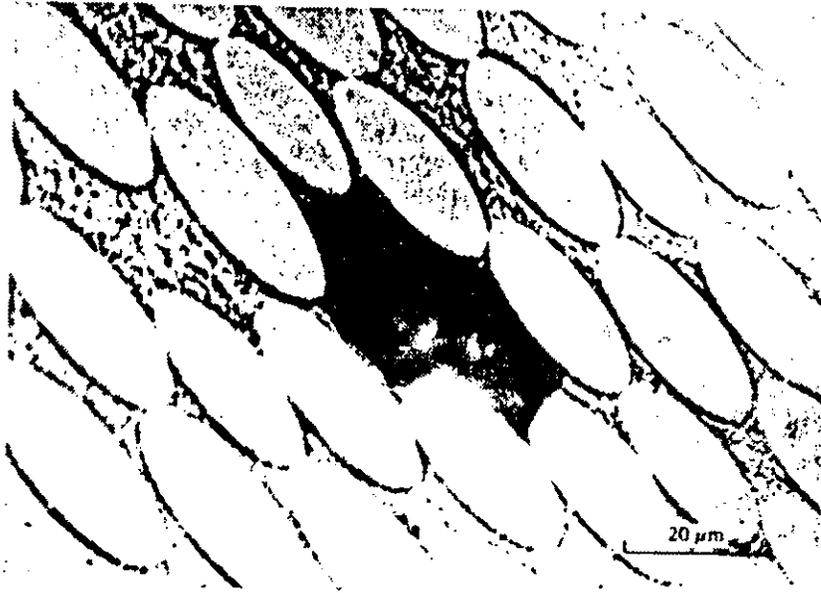
### II.3.7.1.2. Resistencia a tracción transversal

La utilización de láminas unidireccionales en el diseño de estructuras de laminados compuestos presenta el problema de la baja resistencia que tienen dichas láminas a tracción transversal. Aunque es posible orientar las fibras en direcciones paralelas a las cargas externas que hayan de recibir, resulta imposible evitar que se produzcan esfuerzos transversales que pueden causar la rotura del laminado.

La resistencia de una lámina a tracción longitudinal está determinada casi por completo por la resistencia de la fibra, mientras que la resistencia transversal está influenciada por muchos factores entre los que se encuentran las propiedades de la fibra y de la matriz, la resistencia de la unión de la interfase, la presencia de huecos en la matriz y su distribución (en la Figura II.18 se muestran los huecos aparecidos entre las fibras de una lamina de resina de poliéster-fibra de vidrio. Extraída del libro HULL, Derek, *Materiales compuestos*, Reverte, Barcelona, 1987, pág. 77), y la disposición interna de los esfuerzos y deformaciones debidos a la interacción entre fibras, huecos, etc<sup>148</sup>.

---

<sup>148</sup> Consultar también: AA.VV., "Interlaminar shear fracture of chopped strand mat glass fibre-reinforced polyester laminates", *Composites*, Business Press Limited, Volume 17, nº 2, April 1986, pág. 100-110 y HULL, Op. cit., pág. 150-158.

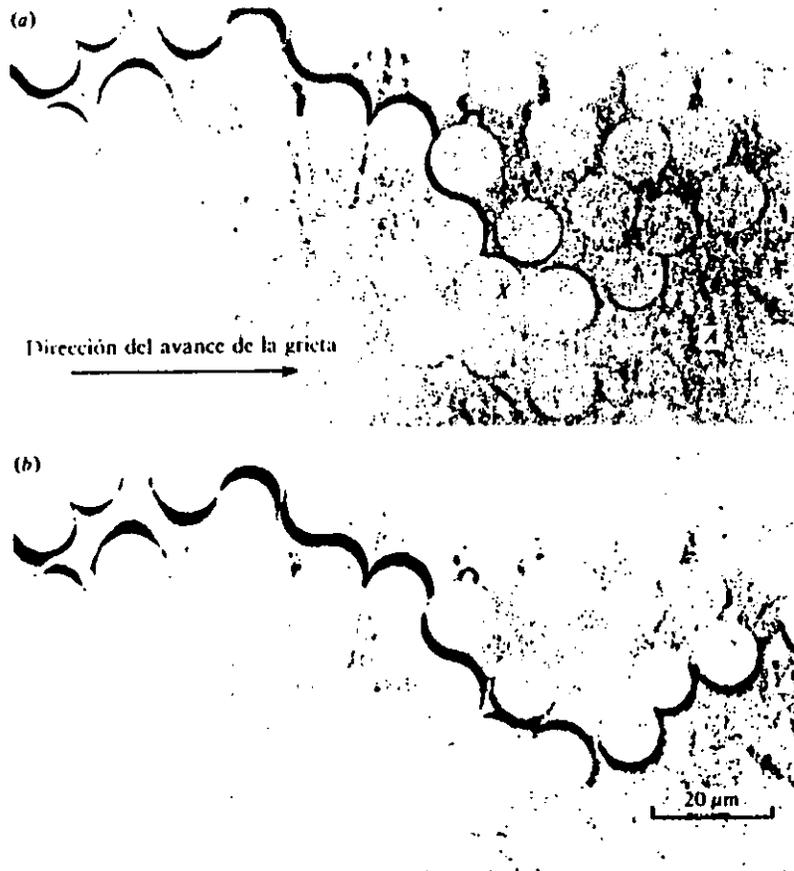


**Figura II.18.** Huecos entre las fibras en una lámina de poliéster-fibra de vidrio.

La característica más importante de la resistencia transversal de las láminas unidireccionales es que normalmente es menor que la resistencia que presenta la resina de origen, de forma que, al contrario de lo que ocurre con el módulo transversal, las fibras tienen un efecto negativo sobre la resistencia en la dirección perpendicular a ellas.

Algunos factores que suelen provocar la baja resistencia a tracción transversal de estos laminados son la desunión en la interfase previa a la rotura cohesiva de la resistencia y también la rotura cohesiva de la fibra.

En ambos casos pueden formarse grietas agudas que son capaces de producir la rotura total del material. La contracción que sufre el material durante su curado y las contracciones por diferencias de temperatura pueden ocasionar también un agrietamiento transversal en la estructura del laminado incluso sin la presencia de carga exterior. En la Figura II.19 aparece un esquema de una grieta transversal, extraído del libro HULL, Derek, *Materiales compuestos*, Reverte, Barcelona, 1987, pág. 154.



**Figura II.19.** Propagación de una grieta transversal en una lámina de poliéster-fibra de vidrio.

Para conseguir una mejor resistencia transversal en los materiales se hace necesario efectuar modificaciones en la estructura de la matriz tratando de reducir al mínimo los efectos negativos de la concentración de esfuerzos. Se han propuesto varias posibilidades de actuación como las que consisten en añadir una capa intermedia en la interfase fibra-matriz que provoque un cambio en la distribución de los esfuerzos y cause una reducción de la amplificación de esfuerzos.

La propagación de la rotura en el material puede producirse de dos formas, con un crecimiento inestable o estable. En el crecimiento inestable de la rotura las grietas se van propagando a través de los puentes de resina entre las fibras, mientras que en el crecimiento estable se producen muchas grietas de desunión en la zona de avance de la grieta principal.

#### **II.3.7.1.3.- Resistencia a compresión longitudinal.**

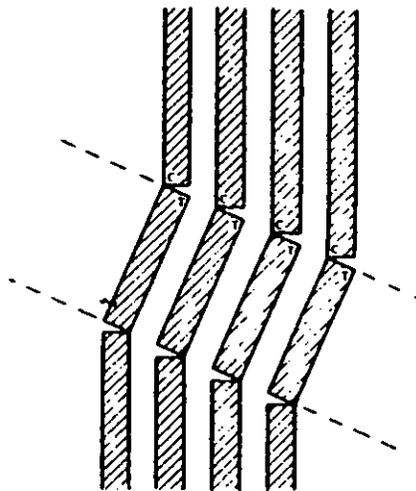
La resistencia a compresión longitudinal depende de muchos factores entre los que se incluyen las propiedades de la fibra y la resina, la resistencia de la unión de la interfase y la presencia de huecos en la matriz. El modo en que se produzca la rotura depende en gran medida de la fracción de volumen de fibras en el material y de las propiedades de la resina<sup>149</sup>. Entre estas últimas tienen especial influencia las propiedades elásticas.

---

<sup>149</sup> Para más información: AA.VV., *Effect of Local Fibre Distribution Ahead of Crack on the Fracture Toughness of FRP*, Faculty of Engineering, Keio University en Fibre Science and Technology, 1983, pág. 151-162 y HULL, Op. cit., pág. 158-166.

Existen varios factores que pueden provocar una reducción en el efecto de refuerzo que ejercen sobre la fibra la matriz y las fibras más próximas y que pueden facilitar que la compresión produzca un microcurvado en la fibra y que cause la rotura en esa zona:

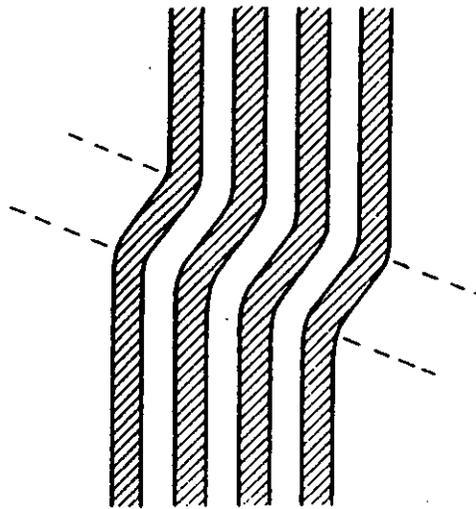
- El apelmazamiento de fibras en algunas zonas provocará la presencia de regiones localmente abundantes en resina. La resistencia es menor en estas regiones que la que existe en las zonas donde el ordenamiento de fibras es uniforme. En estas regiones es más posible que se inicie la rotura a compresión del material (ver Figura II.20).



**Figura II.20.** Zona de rotura a compresión (Derek Hull, 1987, pág. 160).

- La existencia de huecos que, dependiendo de su tamaño, pueden producir reducciones significativas en la resistencia a compresión. Esta reducción es más significativa en las zonas ricas en resina.

- La orientación inadecuada de las fibras puede dar como resultado zonas que favorezcan el curvado (Figura II.21).



**Figura II.21.** Zona de curvado por compresión (Derek Hull, 1987, pág. 160).

- Como consecuencia de las diferencias existentes entre los coeficientes de Poisson de la matriz y de las fibras pueden producirse zonas con separación de las fibras y la resina y estas fibras desunidas se curvan con más facilidad que las fibras que están bien unidas. La tensión producida por la contracción durante el curado y por las contracciones causadas por diferencias térmicas hacen aumentar las consecuencias de estos defectos.

- La resistencia a cortadura de la matriz disminuye cuando se producen en ella deformaciones viscoelásticas.

En las fibras de vidrio y en las de carbono la fractura se produce cuando se origina una rotura frágil en la zona de tracción de cada fibra y a continuación una rotura a cortadura o por aplastamiento en la región de compresión. También es importante la rotura a compresión que se debe al curvado de las fibras<sup>150</sup>.

La rotura a cortadura puede ser causada por los esfuerzos cortantes que se generan en las láminas. Este tipo de rotura se producirá antes que la debida al curvado de las láminas cuando la resistencia a cortadura sea menor que la resistencia al pandeo.

En los sistemas basados en resina epoxy y fibra de carbono se produce una transmisión de la rotura a cortadura a la rotura por curvado de fibra que está determinada por el módulo de cortadura de la resina y por la resistencia a cortadura de las fibras<sup>151</sup>.

El modo de curvado de las fibras se ve favorecido a altas temperaturas ya que el módulo de la matriz disminuye de forma muy rápida con el calor.

---

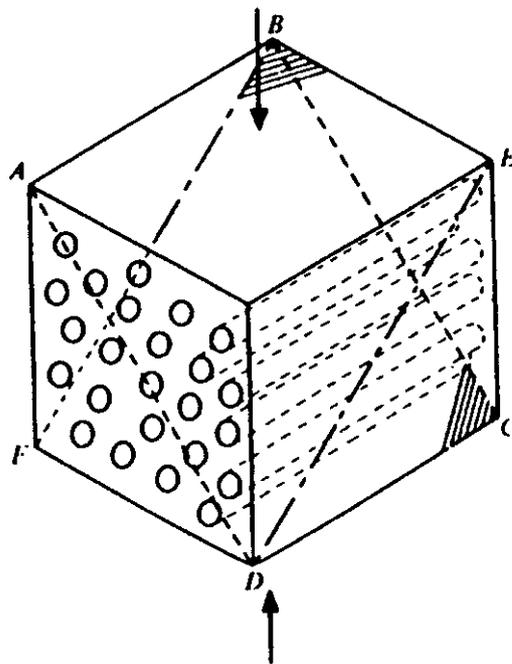
<sup>150</sup> Examinar: CHON, Tsu-wei y KELLY, A., "The effect of transverse shear on the longitudinal compressive strength of fibre composites", *Journal of Materials Science*, nº 15, Chapman and Hall Ltd, 1980.

<sup>151</sup> Ver también: AA.VV., "Application of fracture mechanics to graphite fibre-reinforced composites", *Composites*, Business Press Limited, July 1981 y HULL, Op. cit., pág. 166-167.

La absorción de agua también conduce a una reducción importante del módulo de la resina y a una tendencia mayor de la fibra a la rotura por curvado.

#### II.3.7.1.4.- Resistencia a compresión transversal.

En un material sometido a compresión en una dirección transversal a las fibras se produce un efecto cortante que tiene su valor máximo a  $45^\circ$  del eje de compresión. Si su intensidad es suficiente, este efecto puede producir la rotura a cortadura del material en un plano con esa inclinación y con mayor probabilidad se producirá en un plano que esté orientado en la dirección de las fibras (este efecto se describe en la Figura II.22).



**Figura II.22.** Material sometido a compresión transversal a las fibras (Derek Hull, 1987, pág. 166).

Sin embargo, las superficies de cortadura presentan una dificultad para deslizarse unas sobre otras que es aun mayor cuando se está aplicando un esfuerzo de compresión sobre la superficie. Esto hace que la resistencia a cortadura en este plano oblicuo sea mayor que la resistencia a cortadura plana, es decir, en un plano paralelo a las láminas de material<sup>152</sup>.

De manera excepcional, las resistencias a cortadura en estos dos modos son muy semejantes para los materiales basados en fibra de vidrio y resina epoxy.

#### **II.3.7.1.5.- Resistencia a cortadura plana.**

La dirección en que se produzcan los desplazamientos en cortadura cuando se aplica una tensión sobre un material compuesto va a determinar su resistencia intralaminar, o resistencia a cortadura plana.

La resistencia del material a este tipo de rotura viene determinada por las propiedades de la resina ya que la expansión de las grietas puede producirse sin fractura de las fibras, cortando solamente la matriz. Así, para cada tipo de resina, la resistencia a cortadura plana va a depender de la resistencia de la interfase y de la influencia de las concentraciones de esfuerzos que se producen en las zonas contiguas a las fibras y los huecos.

---

<sup>152</sup> Para más datos: SMITH, C.S., *Design of Marine Structure in Composites Materials*, Elsevier Applied Science. New York, pág. 71-94 y HULL, Op. cit., pág. 167-169.

En las láminas que cuentan con resinas flexibles no se producen relajaciones de esfuerzos debidas a deformaciones de tipo local y, debido a ello, la resistencia intralaminar es muy similar a la de la resina pura con la influencia ya citada de los huecos y de la fortaleza de las interfases.

#### **II.3.7.1.6.- Variación de la resistencia con la orientación.**

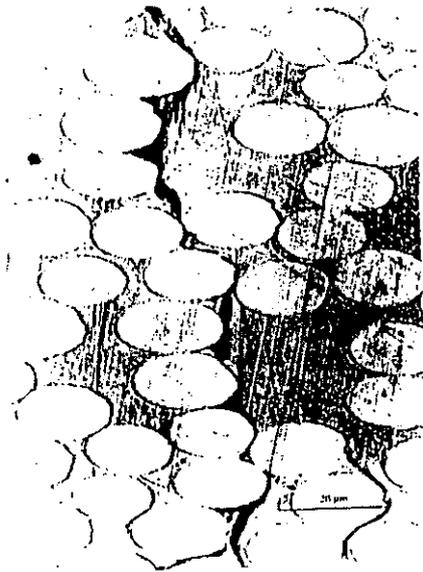
Los materiales se encuentran habitualmente sometidos a cargas bidimensionales y tridimensionales durante su aplicación práctica.

La teoría del esfuerzo máximo de rotura trata de explicar los procesos de rotura de las láminas y predecir la resistencia a rotura del material sometido a esfuerzo. Esta teoría afirma que la fractura del material se va a producir en el momento en que los esfuerzos que se están produciendo en las direcciones principales del material lleguen a alcanzar el valor crítico de rotura. Las direcciones principales consideradas son las que determinan las roturas a tracción longitudinal y a tracción transversal y la rotura por cortadura intralaminar<sup>153</sup>.

En la Figura II.23 aparece una grieta por cortadura intralaminar en una lámina de resina de poliéster y fibra de vidrio (extraída del libro HULL, Derek, *Materiales compuestos*, Reverte, Barcelona, 1987, pág. 169, donde se cita como fuente la tesis de doctorado en física de M.L.C. Jones, University of Liverpool 1981).

---

<sup>153</sup> HULL, Op. cit., pág. 169.



**Figura II.23.** Grieta a cortadura intralaminar en una lámina de poliéster- fibra de vidrio.

Las diferencias existentes entre las resistencias a rotura por tracción y por compresión uniaxiales deben ser consideradas a la hora de definir los criterios de rotura de un material.

### **II.3.7.2.- RESISTENCIA DE LOS LAMINADOS.**

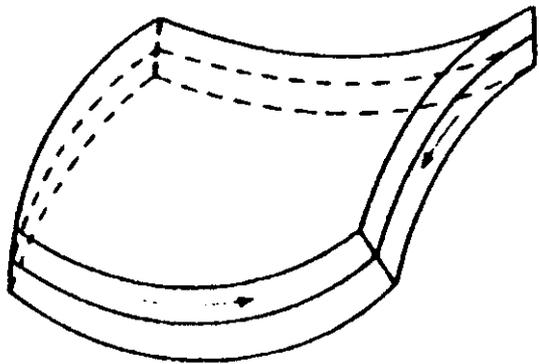
Las propiedades elásticas de los laminados van a ser determinadas por la orientación y distribución de las diferentes láminas dentro de él y por las propiedades de éstas.

Según la teoría de laminación clásica, pueden calcularse las tensiones soportadas por el conjunto de un laminado a partir de las fuerzas que actúan sobre cada una de las láminas que lo

forman. Las propiedades que van a afectar a la rigidez del laminado serán la orientación y orden de disposición de las laminas, el grosor de cada una de ellas y sus propiedades elásticas.

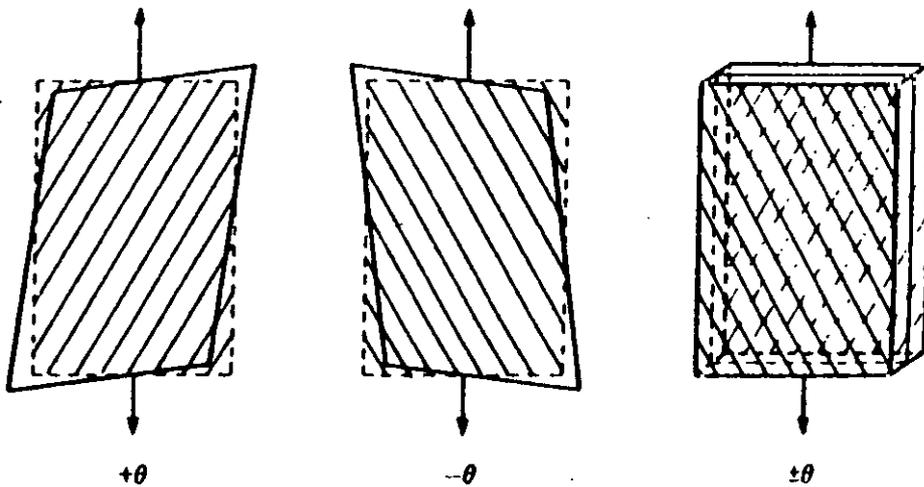
Así, por ejemplo, los posibles problemas que podría plantear en el laminado la gran anisotropía de las láminas unidireccionales pueden evitarse disponiéndolas en diferentes ángulos unas respecto a otras.

En este sentido, si se toma un laminado compuesto por dos láminas unidireccionales con las direcciones de sus fibras dispuestas en ángulo recto y se le aplica una tensión a tracción unidireccional, se producirá un alabeo en el laminado debido a la diferente respuesta de las laminas que lo forman (en la Figura II.24 se refleja de manera esquemática dicho efecto).



**Figura II.24.** Alabeo de un laminado de dos capas cruzadas (Derek Hull, 1987, pág. 116).

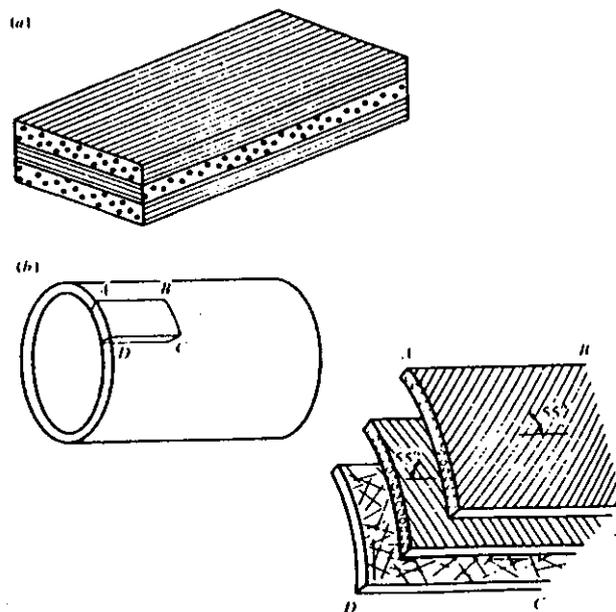
Si ambas láminas no estuvieran unidas, cada una de ellas sufriría una deformación diferente ante la aplicación de la fuerza externa. Cuando las láminas se encuentran formando parte del laminado, la diferencia de esfuerzos provoca la aparición de fuerzas de acoplamiento que originan tensiones en la dirección perpendicular a la de la fuerza aplicada que hace que el laminado se doble (en la Figura II.25 se representa un doblamiento o curvamiento del laminado).



**Figura II.25.** Cambio de forma de una lámina única y de un laminado sometidos a tracción unidireccional (Derek Hull, 1987, pág. 117)

Este efecto puede prevenirse con la realización de laminados simétricos, es decir, laminados en los cuales el número y espesor de las laminas están simétricamente distribuidas respecto al plano medio. En este tipo de laminados no se presentan fuerzas de acoplamiento como las descritas anteriormente.

Teniendo en cuenta las características de las láminas, también es posible mejorar las propiedades de resistencia a fractura del material e incluso prevenir la rotura durante su utilización disponiendo las distintas capas unidireccionales en sentidos distintos. El diseño final del laminado dependerá de las aplicaciones a que se vaya a destinar (en la Figura II.26 aparecen dos laminados de distintas capas unidireccionales en sentidos distintos).



**Figura II.26** (a) Laminado plano con láminas unidireccionales a  $90^\circ$  unas de otras. (b) Laminado cilíndrico con una capa de mat y dos láminas unidireccionales (Derek Hull, 1987, pág. 62).

La rotura de los laminados está directamente relacionada con la resistencia de las láminas que lo forman. Con frecuencia se observa la rotura de láminas sueltas del material antes de que se produzca la fractura completa en el laminado. Esto se produce cuando éste es capaz todavía de soportar una carga que se incrementa aunque se hayan empezado a producir roturas en algunas láminas. La resistencia del material a este esfuerzo será diferente según el tipo de aplicación a que se dedique el material compuesto<sup>154</sup>.

La resistencia de rotura que presentará un laminado en una aplicación concreta puede predecirse siguiendo unas normas básicas:

- En primer lugar se calculan los esfuerzos que afectan a las láminas individuales cuando se aplican cargas sucesivamente más grandes sobre un laminado predeterminado y con unas condiciones dadas para la carga aplicada.
- Se realiza una comparación entre los esfuerzos que se obtengan para las láminas y los esfuerzos de rotura que se podrían predecir usando uno de los criterios de rotura establecidos.
- Puede suponerse que la rotura de una lámina y, por extensión, de todas las demás en el laminado orientadas en la misma dirección se va a producir cuando la carga que soporten sea suficiente como para satisfacer su criterio de rotura. En ese momento, la carga que era soportada por esas láminas se transfiere a las láminas que se

---

<sup>154</sup> HULL, Op. cit., pág. 179.

encuentran orientadas en otra dirección. Normalmente, en este primer nivel de la rotura la redistribución de los esfuerzos se realiza sin que la carga suplementaria sobre las láminas que no se han roto provoque el fallo de éstas.

- La nueva carga sobre las láminas sanas se puede calcular aumentando de nuevo el esfuerzo hasta que se satisfaga el criterio de rotura para otro grupo de láminas. Durante el proceso de distribución de esfuerzos en esta etapa puede producirse la rotura total del laminado.

La transmisión de las cargas soportadas por las láminas que se rompen hacia las sanas está influida por las propiedades de la unión interlaminar<sup>155</sup>.

La aparición de un agrietamiento transversal no provoca necesariamente la rotura completa del laminado ya que la carga se transfiere a las capas longitudinales exteriores, por lo cual, la resistencia a rotura final que presente el laminado será la determinada por la resistencia a rotura de las capas longitudinales del material.

Una vez que se ha originado una grieta transversal, y dependiendo de las propiedades de cortadura intralaminar del material, es posible considerar varios casos en el comportamiento posterior del laminado.

---

<sup>155</sup> Ver: RUSELL, A.I. y SREET, K.N., "Factors affecting the interlaminar fracture energy of grafite/epoxy laminates", *Progress in Science and Engineering of Composites*, ICCM-IV, Tokyo, 1982 y HULL, Op. cit., pág. 184-186.

- En caso de no existir fuerzas de unión o de fricción entre capas adyacentes se produciría una descarga completa de la lámina transversal con la aparición de una grieta transversal y no aparecerían nuevas grietas.
- Si la unión entre capas se produce exclusivamente por fuerzas de fricción se produce una resistencia a los desplazamientos por cortadura. A partir de la grieta se produce una reducción de los esfuerzos a tracción en la lámina transversal, que se transfieren a las láminas longitudinales más próximas. La lámina transversal sufre un agrietamiento a intervalos determinados por la reducción de esfuerzos.
- Si las capas se encuentran unidas elásticamente se produce también una descarga adicional sobre las capas longitudinales, pero el esfuerzo suplementario alcanza su máximo valor en el plano en que se ha producido la grieta transversal.

El comportamiento de esfuerzos-deformaciones de los laminados cruzados está determinado por la intensidad del agrietamiento transversal y dependerá de la resistencia de la unión interlaminar del material.

La capacidad que tiene la lámina transversal para soportar la carga se hace menor cuando el agrietamiento se incrementa.

### **II.3.8.- PROBLEMAS DE DETERIORO.**

El principal problema que va a afectar al trabajo del artista plástico son los cambios en las propiedades del material compuesto, tanto reversibles como irreversibles, que se producen con el contacto con ambientes húmedos y con las variaciones de temperatura<sup>156</sup>.

Las fluctuaciones en la temperatura ambiente van a afectar a las propiedades del material en tres aspectos. En primer lugar se producirán dilataciones en diferente medida en la fibra y en la resina, así como entre las láminas orientadas en distinto sentido, pudiendo ocasionar esfuerzos internos. En segundo lugar se van a producir cambios en las propiedades de los distintos materiales que lo forman, particularmente en la matriz. Por último, con los cambios térmicos pueden producirse deformaciones bajo carga constante que se deben a las propiedades viscoelásticas de la matriz.

La deformación del compuesto va a depender también de la absorción de agua por parte de la resina, factor que estará condicionado principalmente por la propia resina en sí y en segundo lugar por la temperatura y la humedad relativa del ambiente. La presencia de humedad provoca el hinchamiento de la resina creando esfuerzos y deformaciones. Asimismo, aparecerán tensiones internas por las diferentes características de absorción de las láminas adyacentes de material.

---

<sup>156</sup> HULL, Op. cit., pág. 238-242.

Estos cambios irreversibles serán de mayor importancia tras una exposición prolongada y van a depender en su intensidad de la química de la resina y en las resinas termoestables del grado de curado de las mismas.

Los procesos de deterioro mencionados van a producir, además, microgrietas en la interfase y en la resina, proporcionando nuevas vías de contacto del material con el ambiente.

El laminado de fibra de vidrio y resina poliéster son permeables al vapor de agua y la migración de vapor de agua ocurre a través del laminado y de un modo continuo y constante.

La alta temperatura ambiente aumenta el grado de penetración. El laminado no tendrá problemas hasta que las moléculas de agua condensadas en la superficie penetren en su interior, en las zonas higroscópicas.

Una vez que ha penetrado en el material, la humedad va a disolver cualquier parte soluble del vidrio y poliéster circundantes y va a producir tensiones en los huecos suficientes para causar grandes grietas de rotura y la formación de ampollas y, con el paso del tiempo, deslaminación.

Puntos especialmente sensibles son las posibles uniones de estos materiales mediante adhesivos, que, de no trabajar en las condiciones adecuadas, pueden presentar problemas de adhesión. Así un buen diseño de la obra repercute en unas buenas propiedades.

Las resinas formadas total o parcialmente por epoxy presentan también una absorción de agua procedente de la humedad del ambiente. Esta se produce en un principio superficialmente y de manera instantánea y más tarde se va difundiendo hacia el interior del material.

Otro deterioro grave que puede ocurrir al exponer el laminado al medio ambiente es el denominado lavado, caracterizado por una pérdida de resina del laminado dejando la fibra de vidrio expuesta al ataque de la humedad.

El "mat" de fibra de vidrio posee una constitución del refuerzo que es la causa de los fenómenos de "creep" o deformación bajo carga constante diferida en el tiempo que exhiben los laminados a base de poliéster reforzado con "mat".

La deformación permanente bajo carga constante ("creep") y el microagrietamiento producido por golpes también pueden acarrear, en períodos prolongados de tiempo, problemas de separación de los distintos componentes del material.

Como resultado de un impacto perpendicular al laminado, pueden aparecer craquelados en estrella. Este efecto se suele producir en laminados muy gruesos.

Por otra parte, el envejecimiento del material produce cambios en la coloración, generalmente amarilleamientos. Los laminados amarillean después de un período de exposición a la luz, son más visibles en obras traslúcidas y en obras pigmentadas en blanco.



Esto es debido a la absorción de rayos ultravioletas por parte del material con el paso del tiempo.

### **II.3.9.- HIGIENE Y SEGURIDAD EN LA MANIPULACIÓN DE LOS MATERIALES**

El trabajo con este tipo de materiales requiere asumir una serie de precauciones que son necesarias tanto en las condiciones de almacenamiento como en los trabajos de transformación. En este punto es necesaria la referencia a la normativa existente para estos procesos dentro del medio industrial, la cual marcará las pautas de actuación para los artistas en su estudio y en los lugares destinados al almacenamiento de materiales. La normativa de higiene y seguridad para las empresas del sector de los materiales compuestos se recoge en el Real Decreto de 18 de julio de 1.991<sup>157</sup>.

Trasladando estas referencias a los usuarios que se encuentran fuera de un entorno industrial, hay que destacar que éstos no se encuentran sometidos a los controles establecidos por la empresa para los ambientes donde se almacenan o manipulan materias peligrosas y, sin embargo, sí que deben observar las mismas normas rigurosas ya que pueden producirse consecuencias muy perjudiciales para su salud. Este tipo de usuarios tienen la dificultad de tener

---

<sup>157</sup> Consultar: YÁÑEZ CALVO, L., "Instalaciones. Seguridad e Higiene", *Curso de Materiales Compuestos*, E.T.S. Navales, Universidad Politécnica de Madrid, 1992 , pág. 3.3-1 y CLYDESDALE, Amanda, *Chemicals in Conservation. A guide to possible hazards and safe use*, SSCR, 1990.

que seguir unas reglas básicas que habitualmente desconoce o ignora la verdadera gravedad de no adoptarlas con rigurosidad.

### **II.3.9.1.- ALMACENAMIENTO DE MATERIALES**

Los principales problemas que se plantean en la fase de almacenamiento de los materiales que se van a utilizar se centran en que la mayoría de ellos son inflamables, aunque también es necesario tener en cuenta otras propiedades de los mismos que pueden resultar peligrosas:

- a).- RESINAS. Por su estado líquido se almacenarán en un lugar que haga de recipiente si se producen derrames. Deberán preservarse del sol y las fuentes de calor intenso.
  
- b).- INICIADORES. Es muy importante mantenerlos almacenados aparte de otros productos y en zonas apartadas del tránsito de personas ya que con el calor pueden dar lugar a reacciones explosivas con emanaciones tóxicas.
  
- c).- ACELERANTES. Deben mantenerse apartados de los iniciadores ya que favorecen las reacciones explosivas de éstos.
  
- d).- DISOLVENTES. Se suelen utilizar como disolventes generalmente líquidos inflamables como el estireno o la acetona. A la hora de almacenarlos será necesario

resguardarlos del calor y la luz y asegurar una buena ventilación del recinto, así como prevenir los posibles derrames.

### **II.3.9.2.- PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE LOS MATERIALES**

Durante los procesos de manipulación de las materias primas para la elaboración de los materiales compuestos existen igualmente una serie de riesgos que es necesario conocer. Esto es necesario para evitar los problemas que pueden surgir de la adopción de medidas de prevención y control insuficientes o inadecuadas.

Aunque estos procesos de transformación representan el momento de mayor peligrosidad en el ciclo de la fabricación de los materiales compuestos, es necesario tener en cuenta que los posibles efectos dañinos para el ser humano pueden prolongarse durante mucho tiempo después de terminada esta fase.

A este respecto, son varias las fuentes documentales<sup>158</sup> que defienden la teoría de que con frecuencia los materiales compuestos siguen produciendo emanaciones de efectos perjudiciales para las personas y que debería establecerse un control de la emisión de estas sustancias por parte de los materiales plásticos empleados tan a menudo en centros de trabajo, locales públicos, etc.

---

<sup>158</sup> Sacado de las fuentes: HAGHIGHAT, Fariborz y DONNINI, Giovanna, "Emissions of Indoor Pollutants from Building Materials-State of the Art Review", *Architectural Science Review*, Vol. 36, pág. 13-22 y AA.VV., "Indoor Air Quality (IAQ), Pollutants, Their Sources and Concentration Levels", *Building and Environment*, Vol. 27. nº 3, Pergamon Press, Great Britain, 1992, pág. 339-356.

En todo caso, y teniendo en cuenta que no existe una regulación suficiente para estos casos, la prevención de los posibles efectos de estas emisiones pasa necesariamente por la adecuada ventilación de los locales en que pueda presentarse este problema, como son los mencionados anteriormente, así como en los lugares de almacenamiento de piezas terminadas, salas de exposición, etc.

Sin embargo, dejando aparte estos posibles efectos posteriores, este apartado se va a centrar en los principales problemas que puede presentarse durante los procesos de elaboración de los materiales compuestos, ya que la incidencia de los efectos peligrosos de los materiales utilizados es mucho mayor.

Así por ejemplo, hay que destacar que las resinas sintéticas, una vez que se ha completado su polimerización, no tienen la capacidad de producir daños sobre la salud de las personas debidos al contacto con ellas. Sin embargo, cuando la resina no se ha curado totalmente, pueden actuar como agentes dañinos por contacto tanto ella misma como los aditivos, disolventes, catalizadores, etc.

Por esta razón la incidencia de las afecciones por estos materiales se encuentra localizada casi exclusivamente entre los trabajadores de las empresas de elaboración y manipulación de resinas y en raras ocasiones entre los usuarios del producto terminado. Estos últimos se ven afectados principalmente cuando, debido a los modernos procesos mecanizados de fabricación, llegan hasta ellos productos con resinas polimerizadas de forma incompleta. Estos procesos

mecanizados consiguen, sin embargo, reducir la incidencia entre los trabajadores de las empresas de elaboración<sup>159</sup>.

Cuando el origen de las afecciones se encuentre en el ambiente laboral, tanto a nivel empresarial como de usuarios individuales, se hace necesario analizar en profundidad las circunstancias en las que se produce la manipulación de los materiales que han producido los daños, siendo de gran relevancia las condiciones ambientales y la observación de las normas de seguridad e higiene, así como el seguimiento correcto de las indicaciones específicas sobre el trabajo con cada material.

En el caso de las industrias de manipulación de estos materiales es esencial la implantación por parte de la empresa de programas de formación y selección de los trabajadores que garanticen en la medida de lo posible el adecuado seguimiento de los procesos de manipulación y el establecimiento de sistemas adecuados de control. Asimismo, deberá proveer a su personal de los medios necesarios para el cumplimiento de la normativa sobre higiene y seguridad.

Trasladando esta situación al caso de la realización de estos procesos fuera de estas industrias, la responsabilidad de adoptar las medidas de protección necesarias, así como la adecuación de los procesos a las características de las materias utilizadas, ha de recaer necesariamente sobre la persona que va a llevar a cabo estas operaciones, siendo ella quien

---

<sup>159</sup> Ver además: CONDE-SALAZAR GÓMEZ, Luis y ROMAGUERA SAGRERA, Carlos, *Dermatitis de contacto por resina y plásticos*, Carreras Ginjaume, Barcelona, 1986.

deberá recoger toda la información necesaria para tener un adecuado conocimiento del material que va a utilizar, de los métodos de fabricación más adecuados y de las precauciones que debe tomar para su empleo. Dicha información podrá ser obtenida por los usuarios tanto del fabricante como del distribuidor de los materiales empleados.

Así pues, en estos casos, serán los usuarios quienes deberán conocer tanto los productos con los que trabajan como los riesgos a los que se encuentran expuestos, sirviéndose para ello de toda la información disponible. Igualmente deberán observar cuidadosamente las normas de seguridad y las medidas de higiene recomendadas, sobre todo en lo que se refiere a la utilización de los medios de protección personal como guantes, mascarillas, gafas y otras vestimentas especiales.

Es necesario tener en cuenta sobre todo que existen unos determinados grupos de riesgo para los que deben extremarse las precauciones durante el trabajo con estos materiales. Dentro de estos grupos se encuentran de un modo especial los niños, las mujeres embarazadas y las personas particularmente sensibles a los materiales utilizados o algunos de sus componentes.

Aunque este extremo no está confirmado, se tienen fundadas sospechas de que los efectos tóxicos de este tipo de materiales y la falta de medidas de protección tuvieron gran influencia en la desaparición de artistas como Eva Hesse o Nancy Graves, siendo los motivos que desencadenaron sus enfermedades y posteriormente su muerte.

Una de las principales precauciones a observar durante la manipulación de estos materiales será evitar el riesgo de un incendio fortuito favorecido por su alto nivel de inflamabilidad y por la acumulación de sus vapores en el ambiente de trabajo.

Son numerosos los casos en que los usuarios sufren incidentes por desconocer o no seguir adecuadamente las normas del fabricante durante estos procesos, presentándose situaciones de riesgo como incendios de pequeñas dimensiones o de mayor importancia. Las manifestaciones de diversos artistas sobre este particular han dejado constancia de que este desconocimiento y la falta de precauciones han sido las causas de accidentes de este tipo en sus estudios de trabajo.

Para prevenir estas situaciones, se deberá prevenir en la medida de lo posible la acumulación de electricidad estática en los útiles de trabajo y evitar el uso de soldaduras junto a los materiales inflamables, ya que en ambos casos pueden producirse chispas que provoquen el fuego. Del mismo modo será necesario eliminar completamente los restos de materias primas y disolventes al final de la jornada de trabajo y controlar que el vertido de los residuos se realice en lugar seguro.

Por otra parte, durante los procesos de transformación a los que se somete a estos materiales pueden producirse también daños en las personas debidos principalmente a la inhalación o contacto directo con alguna de las sustancias utilizadas.

Los problemas derivados del posible contacto de sustancias peligrosas con la piel, los ojos o la boca pueden ser objeto de prevención con la utilización del material de protección apropiado para cada caso.

Sin embargo, la inhalación de algunas de estas sustancias durante un tiempo prolongado puede producir daños en el organismo que solo pueden prevenirse eficazmente a través de un estricto control de la concentración de cada sustancia en el ambiente de trabajo. Este control tiene su base en el establecimiento de unos límites máximos que no deben rebasarse durante la manipulación de los materiales, establecidos oficialmente y que deben tener en cuenta la diversidad que puede observarse en la sensibilidad de cada persona a las mismas sustancias.

Esta importante precaución no suele observarse a nivel de los usuario inexpertos, quienes deberían orientarse mediante el conocimiento de los condiciones de trabajo establecidas para las empresas de este sector y tratar de aplicar la normativa a su lugar de trabajo.

Los límites máximos permitidos para la concentración en el aire de cada sustancia están regulados en el Real Decreto 2412, de 30 de noviembre de 1.961, pero en la actualidad la aplicación sobre las empresas del sector químico se realiza tomando como referencia los límites establecidos por la American Industrial Hygiene Association (AIHA). Estos límites están marcados por tres niveles máximos de exposición que dependen de la duración de la misma y de la sustancia que se manipule:

- TLV-TWA. Concentración máxima media para los trabajadores durante la jornada completa de trabajo.
- TLV-STEL. Concentración máxima admisible para períodos cortos de trabajo (15 min. y cuatro veces al día).
- TLV-C. Concentración máxima absoluta que no puede sobrepasarse en ningún momento.

Al igual que ocurre durante el almacenamiento de estos materiales, también durante los procesos de transformación es necesario contemplar una serie de precauciones teniendo en cuenta los posibles riesgos que presenta cada uno.

- RESINAS POLIÉSTER. En la composición de las resinas poliéster insaturado se encuentra de forma mayoritaria el estireno, sustancia que es responsable, en gran medida, de la toxicidad de éstas que manifiestan casi únicamente en el ambiente laboral, es decir, entre los trabajadores que manipulan estos materiales antes de su curado. Los efectos más comunes son la irritación en la piel, si se produce el contacto directo, y los trastornos en el aparato respiratorio y en los ojos si la concentración en el ambiente de trabajo sobrepasa los límites permitidos. Estos límites están establecidos por el Real Decreto 2412 de 1.961 en 100 ppm. (425 mg/m<sup>3</sup>), mientras que la AIHA aconseja un TLV-TWA de 50 ppm. (213 mg/m<sup>3</sup>) y un TLV-STEL de

100 ppm<sup>160</sup>. Otra causa común de sus efectos perjudiciales se localiza en la presencia de los catalizadores y acelerantes usados durante su curado.

- RESINAS EPOXY. Los responsables de los efectos irritantes de las resinas epoxy son la epiclohidrina y el Bisfenol A, que son sus componentes principales.

La incidencia de las afecciones a personas, así como las manifestaciones clínicas de éstas, pueden ser muy variadas, manifestándose en forma de trastornos importantes con reacciones de contacto de la piel con la resina no endurecida eczemas y procesos irritativos por contacto o sensibilización alérgica y afecciones respiratorias por inhalación de sus vapores, aunque estas últimas son menos frecuentes<sup>161</sup>.

- ACETONA. Es un disolvente muy utilizado en los procesos de transformación de estos materiales y su toxicidad no se considera elevada. Puede afectar a la piel y a los aparatos digestivo y respiratorio. El Real Decreto 2412 de 1.961 fija la concentración máxima permitida en 1000 ppm. (2400 mg/m<sup>3</sup>) y la AIHA establece un TLV-TWA de 1780 mg/m<sup>3</sup> y un TLV-STEL de 2380 mg/m<sup>3</sup>
- ACELERANTES. Son sustancias muy irritantes tanto por contacto como por inhalación. Entre los más comunes se encuentran las aminas, que si se encuentran en

---

<sup>160</sup> Consultar además: CONDE-SALAZAR GÓMEZ y ROMAGUERA SAGRERA, Ibidem.

<sup>161</sup> Ver también: CONDE-SALAZAR GÓMEZ y ROMAGUERA SAGRERA, Ibidem.

suspensión en el aire pueden llegar a producir pérdida de conocimiento, y los peróxidos, que pueden causar ceguera si entran en contacto con los ojos.

- FIBRAS DE VIDRIO. Pueden producir problemas leves en la piel por contacto y más raramente en el aparato respiratorio.
- FIBRAS DE CARBONO. Pueden producir igualmente irritaciones en la piel durante su manipulación. Además, durante el cortado del material se pueden originar concentraciones de partículas en dispersión que pueden provocar un cortocircuito en presencia de aparatos eléctricos.

Así, las precauciones que deben tomarse como norma general cuando se están manipulando estos materiales, consisten en lograr una buena ventilación y extracción de aire en el local de trabajo, usar material y ropas de protección para evitar el contacto con la piel, los ojos o la boca (principalmente guantes, mascarilla y gafas) y la aplicación inmediata de cuidados sobre la zona afectada por el contacto.

### II.3.10.- COLORACIÓN.

Se conoce como materias o sustancias colorantes a aquellos productos, en su mayoría artificiales, que se emplean para dar color a otros materiales añadiéndolos a éstos en disolución o en dispersión.

Se distinguen normalmente dos tipos de materias colorantes caracterizados sobre todo por su afinidad con el material a colorear. Se tratará aquí principalmente lo que se refiere a coloración de materias plásticas<sup>162</sup>.

En primer lugar se encuentran los colorantes, sustancias solubles en los polímeros que deben colorear o en alguno de los posibles disolventes a utilizar. Esta propiedad favorece la consecución de colores transparentes en el material. La acción colorante se produce por la absorción de luz a nivel molecular.

El segundo tipo de sustancias colorantes son los pigmentos, los cuales pueden clasificarse en dos grandes grupos: los pigmentos inorgánicos o minerales, presentes en algunos casos en la naturaleza, y los pigmentos orgánicos, procedentes del petróleo. Los pigmentos son generalmente insolubles en los plásticos por lo que la coloración se produce por dispersión en ellos del

---

<sup>162</sup> Revisar: GILI BAS, Enric, *Coloración de Materiales Plásticos*, Centro Español de Plásticos, Santa Perpetua de Mogoda, 1990.

pigmento. Para conseguir resultados óptimos es necesario que el proceso de dispersión se realice completamente, distribuyéndose el pigmento de forma homogénea.

Aunque existen métodos alternativos para la coloración de plásticos como las pinturas de recubrimiento o la tinte en baño acuoso, el sistema más utilizado y de mayor calidad es la coloración en masa mediante la utilización de colorantes disueltos o pigmentos introducidos en dispersión entre las moléculas del polímero.

En la selección de una sustancia colorante para una aplicación determinada se deben tener en cuenta una serie de factores condicionantes. El más importante de ellos es el tipo de polímero que se va a colorear, considerándose a continuación las condiciones en que se va a desarrollar su curado y manipulación y los requisitos que debe cumplir una vez completada su transformación.

Será necesario, pues, el conocimiento de las características del material a colorear así como del comportamiento en él de la sustancia colorante. Este comportamiento se manifestará en propiedades como la matriz, la capacidad colorante, solubilidad o dispersabilidad, resistencia a los agentes externos, etc.

### II.3.10.1.- PROTECCIÓN ANTE LOS ULTRAVIOLETAS.

Los rayos U.V. constituyen la parte de la radiación atmosférica más perjudicial para los materiales plásticos. Esto es debido a que éstos contienen grupos químicos o aditivos que favorecen la absorción de la radiación U.V., produciéndose un aumento en la energía de los materiales del polímero que causa la ruptura de enlaces. La aparición de radicales libres en las cadenas moleculares desencadena, además, otros procesos de degradación del material.

La protección del material ante los rayos U.V. se realiza mediante la adicción de los llamados absorbentes de U.V., que se encargan de atraer hacia sí la radiación nociva disminuyendo la cantidad absorbida por las moléculas del polímero<sup>163</sup>.

Otro efecto de estos aditivos de protección puede ser la interacción con los radicales libres de las cadenas a los que neutralizan evitando la aparición de procesos químicos de degradación. A estos aditivos se les llama "atenuadores del estado excitado".

Entre los absorbentes de U.V. puede citarse el negro carbón, capaz de transformar dicha radiación en infrarrojo disminuyendo sus efectos dañinos, mientras que la adición de

---

<sup>163</sup> Para más información consultar: AVENDAÑO SARMIENTO, Luis, *Iniciación a los plásticos*, Centro Español de Plásticos, Barcelona, 1994.

determinados pigmentos puede conseguir reflejarla y difundirla aportando una protección aceptable.

### **II.3.10.2.- COLORACIÓN DEL POLIÉSTER.**

La utilización de sustancias colorantes para la coloración de las resinas de poliéster insaturadas debe contemplar una serie de factores que resultan determinantes para la calidad final del producto terminado. Estos factores son la presencia de catalizadores que pueden presentar incompatibilidades y la exposición a altas temperaturas producidas durante el curado en caliente o debidas al desarrollo de reacciones exotérmicas<sup>164</sup>.

De igual modo es necesario tener en cuenta que puede ser necesario dotar a la resina de una resistencia a la luz y a otros agentes de deterioro, dependiendo de las condiciones de utilización previstas para el material.

Debido a que los colorantes orgánicos presentan problemas por la acción de los catalizadores y de la temperatura y producen a menudo un alargamiento de los tiempos de curado de la resina, la coloración del poliéster suele realizarse con pigmentos previamente dispersados en una pasta de plastificante polimérico compatible.

---

<sup>164</sup> Ver también: GILI BAS, *Ibidem* y WARRING, Ron H., *El libro práctico del poliéster y la fibra de vidrio*, Borrás Ediciones, Barcelona, 1978.

### **II.3.10.3.- COLORACIÓN DEL LA RESINA EPOXY.**

La coloración de la resina epoxy se realiza normalmente mediante la utilización de pastas de la propia resina con el pigmento en dispersión, aunque puede optarse igualmente por la incorporación de color previamente sobre un plastificante polimérico que se añadirá con posterioridad a la resina<sup>165</sup>.

La selección del pigmento debe hacerse teniendo en cuenta que no sea incompatible con los endurecedores utilizados. Así, pueden emplearse la mayor parte de los pigmentos inorgánicos además de algunos otros de naturaleza orgánica.

---

<sup>165</sup> Consultar también: GILI BAS, Op. cit., pág. 155.

## II.4.- ÚLTIMAS APORTACIONES EN SOPORTES

Retomando los aspectos artísticos de la realización de soportes, se va a tratar a continuación el tema de las aportaciones realizadas por los materiales compuestos al campo del arte y la conservación. Estos materiales van a salir de los sectores de actividad industriales de los que proceden para verse tratados como soluciones para la realización de soportes para la creación artística y para experiencias innovadoras en procesos de conservación-restauración.

*"Si se compara el arte moderno con el arte anterior, salta a la vista que el primero recurre a materiales mucho más numerosos y, en parte, heterogéneos. Emplea más de dos mil colores hasta ahora inéditos, técnicas nuevas, y a veces materiales que hubiese sido inimaginable encontrar en el arte antiguo... Pero sobre todo aparece claramente que, si por un lado el material es muy importante, no es, por otro lado, más que un vehículo de nuevas «ideologías»".<sup>166</sup>*

---

<sup>166</sup>

ALTHOFER, Heinz, "La teoría de la restauración de arte contemporáneo", *Comunicaciones de la 3ª reunión de trabajo, Grupo Español de Trabajo sobre Conservación y Restauración de Arte Contemporáneo*, Vitoria, 1991, pág 99.

Desde la aparición de los materiales compuestos, éstos han sido utilizados a menudo por algunos artistas para la realización de sus obras<sup>167</sup>. Los materiales más difundidos son los de tipo sandwich, compuestos de fibra de vidrio con resina poliéster y en menor medida con resina epoxy, y con una estructura formada por laminados y un núcleo de celdilla de abeja (las de mayor difusión son las realizadas de aluminio). Mayer dice a este respecto que "... los paneles de aluminio o de aluminio cubierto de fibra de vidrio se pueden utilizar como soportes seguros para cualquiera de los medios comunes de pintura..."<sup>168</sup> y hace la recomendación de realizar un acondicionamiento previo de la superficie pictórica, según la técnica a utilizar, creando una capa de agarre, bien con lijados previos o con un desengrasado.

Este tipo de materiales se ha venido aplicando en campos que van desde la realización de soportes pictóricos a la creación de objetos y formas tridimensionales<sup>169</sup>. Los procesos de fabricación y elaboración que se han utilizado para la realización de las obras son muy variados aunque los más generalizados han sido la utilización de un sistema de moldes, el modelado directo de las piezas y la fabricación de laminados para soportes artísticos<sup>170</sup>.

---

<sup>167</sup> Ya existen tratados recopilatorios de las diferentes fabricaciones o métodos de fabricación utilizados con los materiales compuestos realizados con poliéster y el epoxy. Ver: NEWMAN, Thelma R., *Plastics as an art form*, Chitton Books, Philadelphia, 1964. Ed. revisada, Thomas Yoseloff, Londres, 1969 y AA.VV., *A plastic presence*, Jewish Museum, Milwaukee Art Center, Milwaukee, 1969.

<sup>168</sup> MAYER, op. cit., pág. 340.

<sup>169</sup> Como en las obras de Frank Stella. Ver entre otros: AA.VV., *Frank Stella*, Centro de Arte Reina Sofía, Madrid, 1990 y AA.VV., *Un siglo de escultura moderna*, Centro de Arte Reina Sofía, Madrid, 1988.

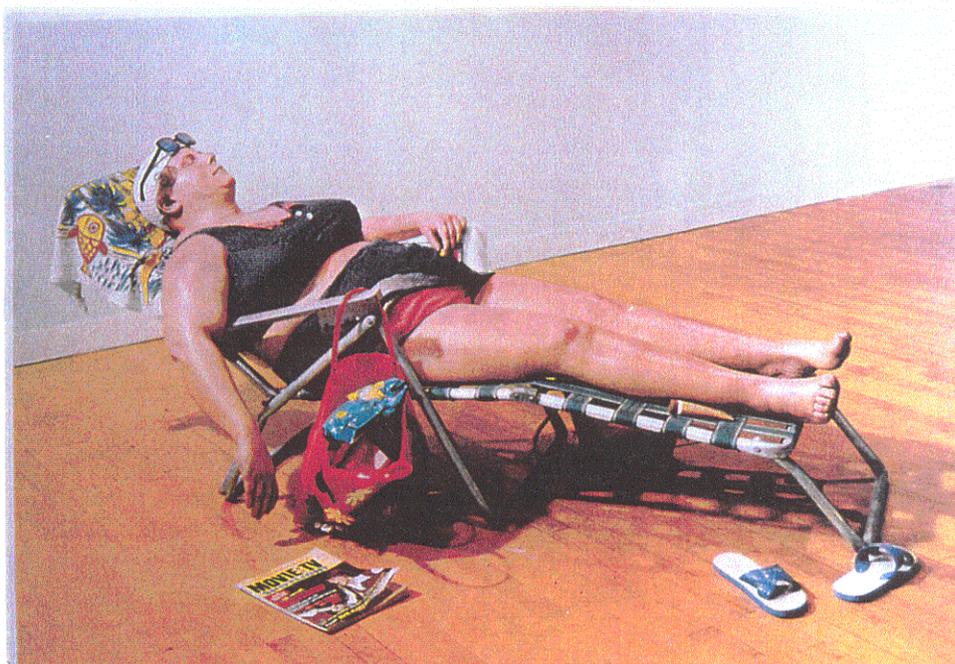
<sup>170</sup> Ver: NEWMAN, T. R., *Plastics as an Art Form*, Thomass Yoseloff, Londres, 1967 y STEPHENSON, Jonathan, *The materials and techniques of painting*, Thames and Hudson, New York, 1993.



**Figura II.27.** Frank Stella, Diepholz II, 1982 (Técnica mixta sobre aluminio y fibra de vidrio)(*Un siglo de escultura moderna*, 1988, pág. 122)

El proceso de elaboración por medio de moldes se ha generalizado para la realización de vaciados de obras creadas por el artista en diversos materiales no definitivos, como el barro o la cera, y que necesitaban un acabado final semejante a las técnicas de escultura en bronce o en piedra pero con una reducción del peso y del coste de la obra.

Un gran número de los escultores actuales han realizado reproducciones de sus obras eligiendo un método seguro y no muy caro como es la elaboración del acabado de la obra mediante un vaciado con resina poliéster y fibra de vidrio. Este es el caso de Duane Hanson en sus reproducciones de seres humanos<sup>171</sup>.

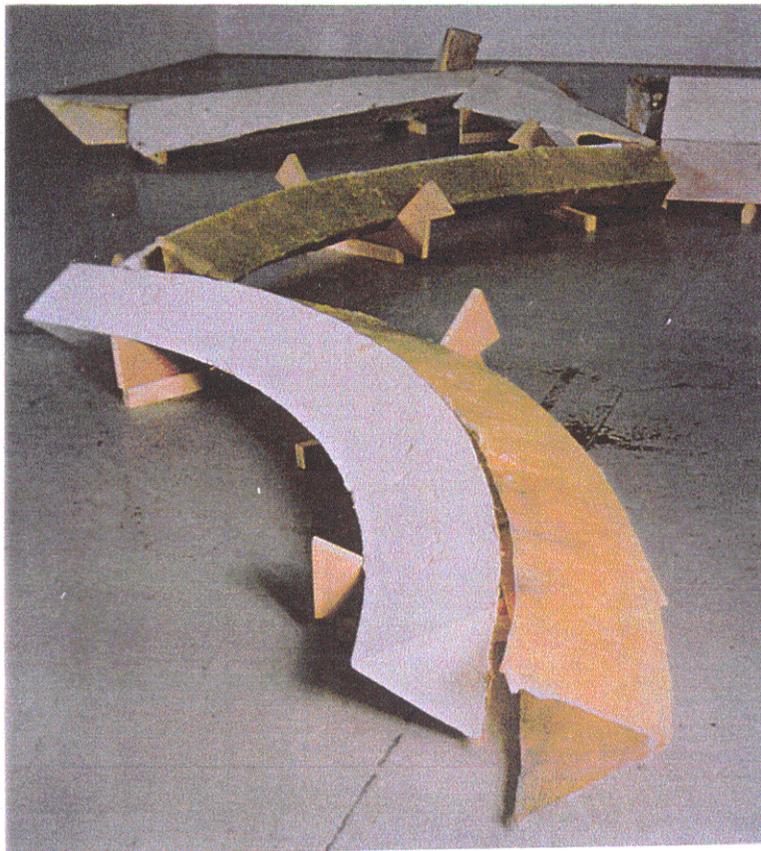


**Figura II.28** Duane Hanson, Sun bather, 1971 (resina de poliéster y fibra de vidrio) (*Le plastique dans l'art*, 1973, pág. 100)

---

<sup>171</sup> Consultar: AA.VV., *Le plastique dans l'art*, Editions André Sauret, Montecarlo, 1973.

En las ocasiones en que la obra no tiene volúmenes complicados, el autor puede utilizar un molde de madera y escayola o de metal para darle forma. Este proceso se encuentra en la realización de obras, entre otros, de Bruce Nauman<sup>172</sup>.



**Figura II.29** Bruce Nauman, 1980 (fibra de vidrio y madera) (*Bruce Nauman*, 1981)

Cuando la obra posee mayor complicación en sus volúmenes, se hace necesaria la realización de un molde de vaciado, para lo cual hay que disponer en principio del modelo y a partir de él elaborar el molde con escayola o silicona, como en algunas obras de John Duff.

---

<sup>172</sup>

Como en su obra *Untitled*, 1980 (fibra de vidrio y madera). Ver: AA.VV., Bruce Nauman, 1972-1981, Rijksmuseum kröller-Müller, Otterlo, 1981, pág. 69. Ver también: AA.VV., Bruce Nauman, *Prints 1970-89*, Castelli Graphics, New York y AA.VV., Bruce Nauman, *Whitechapel*, Basel, 1986.



**Figura II.30** John Duff. Infinite line with marker (The Bead) (fiberglass, enamel paint and steel cable) 1988-90 (*John Duff, 1990*)



**Figura II.31** John Duff. Anger (fiberglass, orange shellac, enamel paint and polypropylene cord) 1990 (*John Duff, 1990*)

De igual forma, Raquel Whiteread realiza vaciados de modelos formados por los espacios vacíos que ocupan los objetos y las arquitecturas, siendo estos vaciados la parte esencial de su trabajo<sup>173</sup>. Esta línea se refleja en su obra de 1995 "100 espacios", formada por 100 bloques de resina poliéster dominando un espacio rectangular.



**Figura II.32** Rachel Whiteread, 100 espacios (resina poliéster) (*Rachel Whiteread*, 1997, pág. 67)

<sup>173</sup> Mirar: AA.VV., *Rachel Whiteread*, Palacio de Velázquez, Ministerio de Cultura, Madrid, 1997.

El proceso de elaboración del vaciado comienza por dividir el modelo en secciones, de manera que ninguna de ellas presente problemas para elaborar y desmoldear la correspondiente pieza del molde.

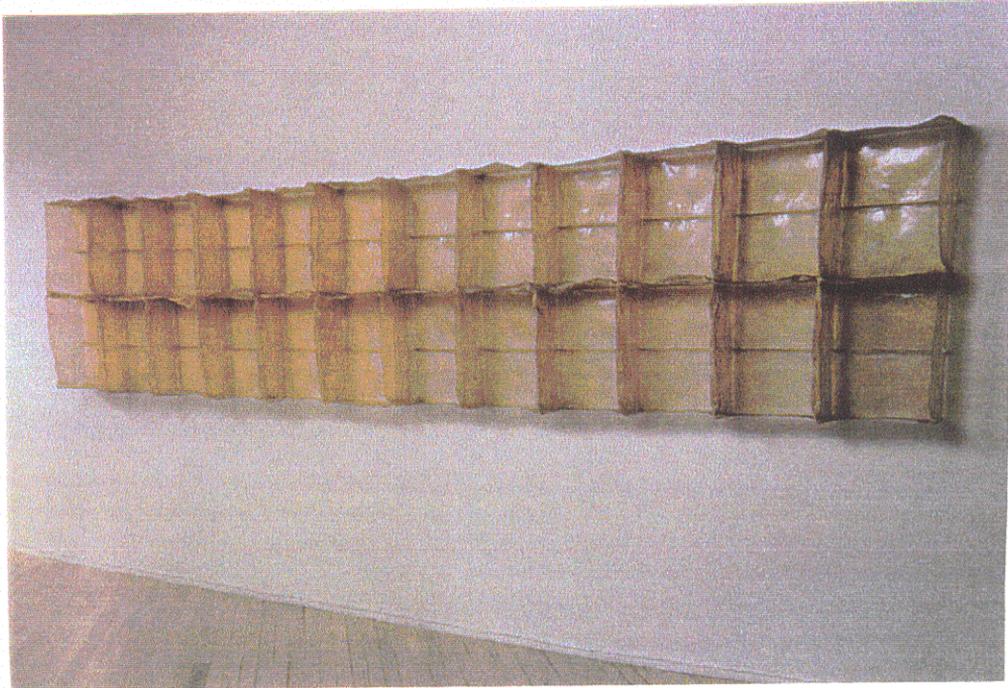
A continuación se van recubriendo progresivamente todas las piezas con el material elegido para realizar el molde hasta recubrir la figura. Al terminar se separa las distintas secciones del molde, que ensambladas van a definir la pieza completa.

Una vez aplicado a cada pieza un desmoldeante, pueden ya cubrirse con poliéster y fibra de vidrio. Cuando las piezas están terminadas se unen, se pegan y finalmente se despega el molde (Fig. II.33).



**Figura II.33.** Rachel Whiteread. Proceso de la obra “100 espacios” (Rachel Whiteread, 1997, pág. 44)

Otro proceso de elaboración muy utilizado ha sido la construcción de la obra mediante un proceso en el que se incorpora la fibra de vidrio y el poliéster sobre una armadura. Un artista que utiliza en alguna de sus obras este procedimiento es Eva Hesse<sup>174</sup>.



**Figura II.34** Eva Hesse, *Sans II*, 1968 (fibra de vidrio y poliéster) (Bill Barrete, 1989, pág. 185)

---

<sup>174</sup>

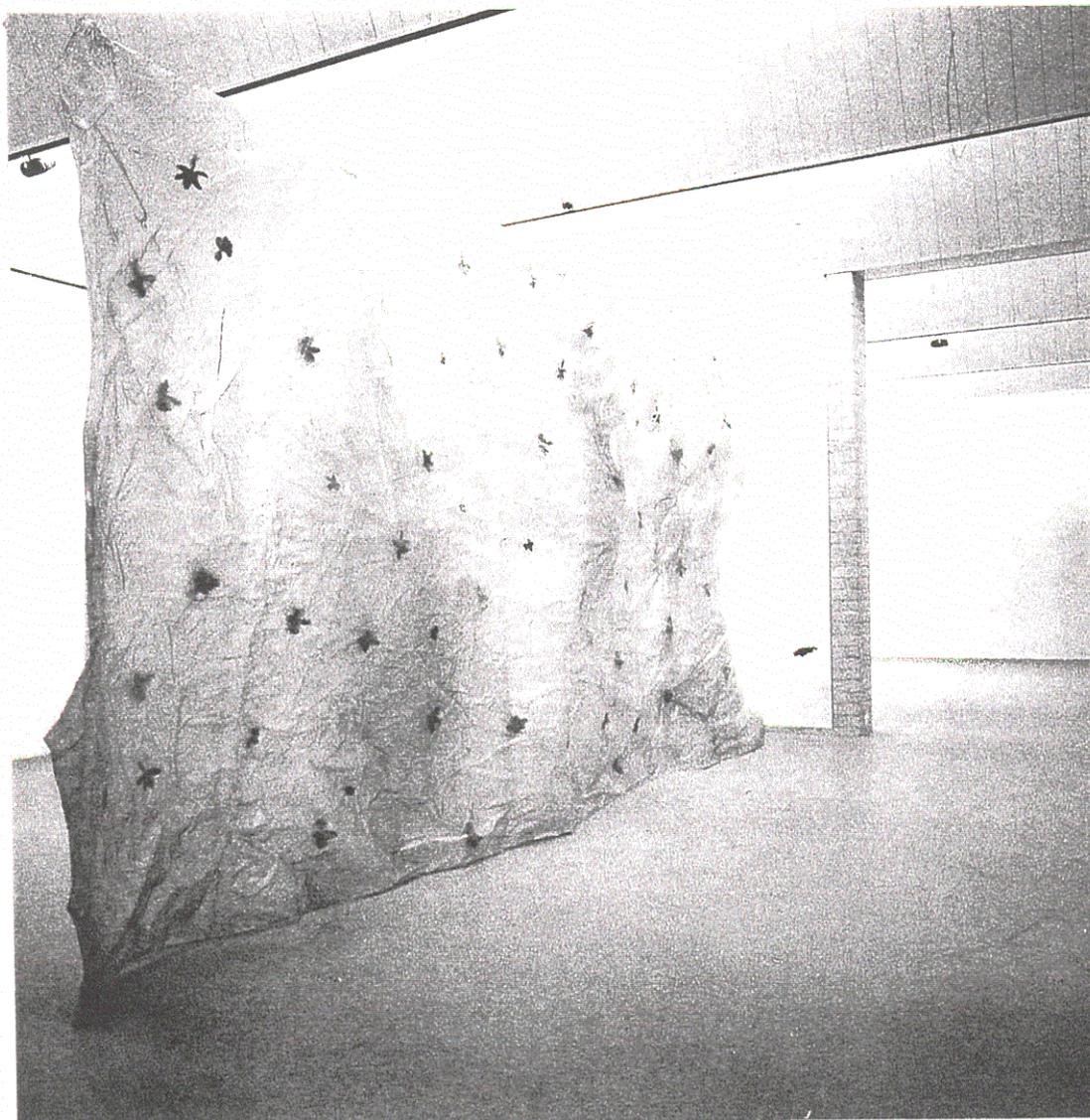
Ver además: BARRETE, Bill, *Eva Hesse, sculpture*, Timken Publishers, New York, 1989.

También Miguel Von Danger elabora alguna de sus obras partiendo de un armazón sobre el que modela los volúmenes de la obra. En este autor se encuentra también otro proceso en el que se utiliza el poliéster como una cápsula que va a contener los más variados materiales entre los que se cuentan innumerables residuos de la cultura y la naturaleza.



**Figura II.35.** Miguel Von Danger, Bienal de Venecia, 1993.

Niek Kems trata de salvar la belleza y conservarla en un envoltorio de poliéster, como hace en su obra “The Birth of Venus” (1982), donde utiliza como materiales poliéster y orquídeas<sup>175</sup>. En otras de sus obras realiza grandes estructuras con poliéster y fibra de vidrio como en su “Entre deux boîtes qui sont des maisons I y II”<sup>176</sup>.



**Figura II.36** Niek Kems, “The birth of Venus”, 1982 (poliéster, fibra de vidrio y orquídeas) (Niek Kems, 1988).

<sup>175</sup> Revisar: AA.VV., *Niek Kems, Twee twee deux*, Museum Boymans-van Beuninger, Rotterdam, 1988, pág. 20.

<sup>176</sup> Ver también: AA.VV., *Niek Kems*, Van Abbemuseum, Eindhoven, 1990.



**Figura II.37** Niek Kempes, “Entre deux boîtes qui sont des maisons I y II” (poliéster y fibra de vidrio) (Bienal de Venecia, 1993)

El tercero de los métodos más comunes de utilización de materiales compuestos convencionales es la realización de obras pictóricas en las que se emplea como soporte solamente un laminado fabricado con estos materiales o se incorpora éste sobre un bastidor, aportando de cualquier forma una transparencia que en algunos casos es imprescindible para las obras. El primero de los procedimientos es usado por Fernando Casas<sup>177</sup> mientras que el segundo lo emplea

---

<sup>177</sup> Puede verse por ejemplo en: AA.VV., *Fernando Casas*, Afinsa-Almirante, Madrid, 1992.

Gino de Dominicis. Otras formulaciones mucho más personales pueden verse en obras de Andrés Nagel<sup>178</sup>.



**Figura II.38** Andrés Nagel, “Piquillo, torero vizcaíno (es un bravo mozo)”, 1987 (técnica mixta sobre poliéster y fibra de vidrio) (*Andrés Nagel*, 1988)

Además de ser adoptados de forma individual por algunos artistas, los diferentes métodos de fabricación y manipulación de los materiales compuestos convencionales se convirtieron en parte de los planteamientos básicos de algunos movimientos artísticos del siglo XX que tenían entre sus características principales el gusto por la utilización de materiales industriales. Entre éstos, y de un modo especial, los materiales compuestos convencionales y las diversas posibilidades de tratamiento de los mismos fueron tomados como pilares fundamentales de la filosofía de estos movimientos.

<sup>178</sup>

Ver, entre otros: AA.VV., *Andrés Nagel*, Luis Adelantado Galería, Valencia, 1988.

## **II.4.1.- LOS MATERIALES COMPUESTOS EN MOVIMIENTOS EMBLEMÁTICOS DEL SIGLO XX. MINIMAL Y PROCESS.**

### **II.4.1.1.- LA RELEVANCIA DEL MATERIAL**

Los últimos años sesenta de este siglo representaron una época de cambios rápidos y convulsivos en la forma y el contenido del arte vigente en esos momentos. Estos cambios fueron promovidos en gran medida por la aparición del Pop Art en 1962-63, el surgimiento del Minimalismo en 1963-64 y el posterior del Process Art en 1965-66, todos ellos con la común intención de reinventar las formas utilizando con frecuencia nuevos e inexplorados materiales y con el empleo de nuevas formas de fabricación<sup>179</sup>.

A partir de estos movimientos surgidos en la segunda mitad del siglo XX los materiales compuestos convencionales empezaron a ser una parte importante, junto con otros materiales industriales, del conjunto de los utilizados por los artistas para expresar sus ideas.

El Pop, el Minimal y el Process fueron movimientos que evidenciaron nuevas y diferentes concepciones del material y de la técnica desde su aparición.

---

<sup>179</sup> Ver: AA.VV., *The new sculpture 1965-75*, Whitney Museum of American Art, New York, 1990, pág. 12.

El Pop Art hace uso de la estética del mundo industrial, usando los materiales propios de ese mundo, y le interesa de modo especial suscitar la ironía. Una de sus pretensiones era el acercamiento del objeto artístico y el no artístico. En el Pop se emplean materiales que nunca anteriormente se habían utilizado para la producción artística por su vulgaridad y sus bajas propiedades.

Como ilustración del espíritu de este movimiento podrían servir unas palabras de uno de los principales artistas estadounidenses del Pop, Claes Oldenburg:

*"Yo utilizo la imitación ingenua. Esto no se debe a que no tenga imaginación o a que quiera decir algo sobre el mundo cotidiano. Imito 1, objetos, y 2, objetos creados, por ejemplo, señales, objetos hechos sin intención "artística" alguna, y que contienen, ingenuamente, una magia funcional contemporánea. Tratar de ir más allá incluso, explorando mi propia ingenuidad, que no es artificial. Al decir que cargo esos objetos más intensamente, complico sus relaciones, trato de hacer "arte" con ellos. Esto es preciso que quede muy claro. Los imito porque quiero que la gente se acostumbre a reconocer el poder de los objetos; mi objetivo es didáctico."*<sup>180</sup>

---

180

Citado por Gene Baro en "Claes Oldenburg, or the Things of this World", en Art International, Nueva York, noviembre 1966. Extraído del libro LUCIE-SMITH, Edward, *Movimientos artísticos desde 1945*, Ediciones Destino, 1991.

El interés de Claes Oldenburg por la realidad queda patente en una de sus últimas piezas en materiales compuestos, en este caso de fibra de vidrio con un acabado de gel coat, "Inverted Collar and Tie", de 1994.<sup>181</sup>



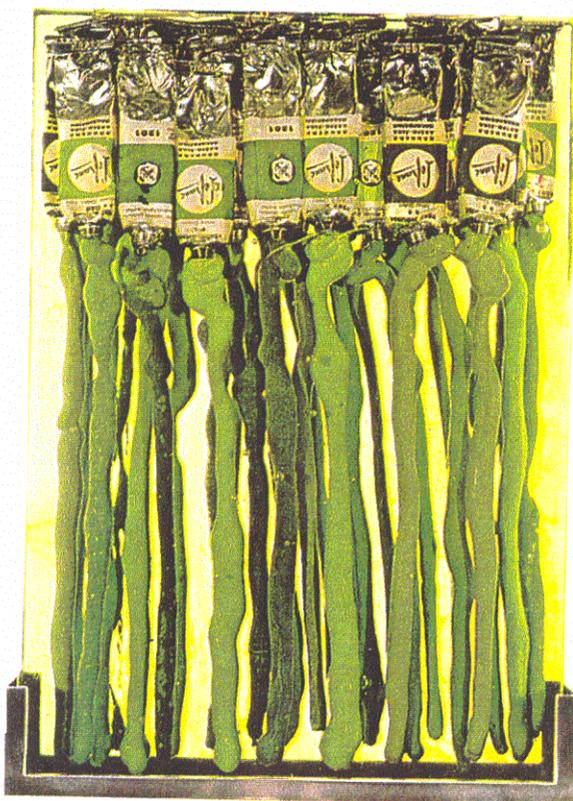
**Figura II.39** Claes Oldenburg, 1994 (fibra de vidrio-gel coat) (*Claes Oldenburg*, 1995, pág. 531)

---

<sup>181</sup> Mirar: AA.VV., *Claes Oldenburg: An Anthology*, Guggenheim Museum, New York, 1995.

El Pop Art tuvo ciertos paralelismos en Europa, como es el caso del Nuevo Realismo, el cual plantea entre sus conceptos una atención especial a la tecnología, la cultura popular, el consumo, la publicidad, el concepto de objeto y el uso del desecho.<sup>182</sup>

Entre sus autores, Arman acumula objetos de diferentes contextos, cotidianos artísticos y musicales, para encapsularlos en sus cajas de poliéster. Su trabajo con estos materiales.<sup>183</sup> comenzó en 1961 y se refleja en piezas como "Torse aux Gants" o "In the Jungle", ambas de 1967 y formadas por inclusiones en poliéster.



**Figura II.40** Arman, "In the jungle", 1967 (tubos de pintura y poliéster) (Pierre Restany, 1973, pág. 23)

<sup>182</sup> Consultar: OSTERWOLD, Tilman, *Pop Art*, Taschen, Köln, 1992, pág. 116.

<sup>183</sup> Más información en: RESTANY, Pierre, *Le Plastique dans l'art*, Éditions André Sauret, Monte Carlo, 1973.

Pero, si bien el Pop Art se sirve de los materiales compuestos convencionales para la representación de sus ideas, tanto el Minimal como el Process hacen de la utilización de estos materiales y de sus procesos de tratamiento una parte esencial de su trabajo creativo. De estos dos movimientos se podría hablar como ejemplos de métodos contrapuestos de fabricación del mismo material, dándole la misma importancia dentro de sus contenidos. El Minimal, con su fabricación preferentemente mediante procesos industriales, y el Process, con procedimientos de elaboración más manuales, van a ser tratados a continuación con mayor profundidad.

#### II.4.1.2.- MINIMAL ART

El arte minimal<sup>184</sup> se origina en los años sesenta y aunque la simplicidad de las formas parece ser su mayor característica, solo su representación es minimal. Estos artistas no proponen un arte de la reducción o de la austeridad estilística, sino más bien una nueva experiencia artística desembarazada de toda aura expresiva.

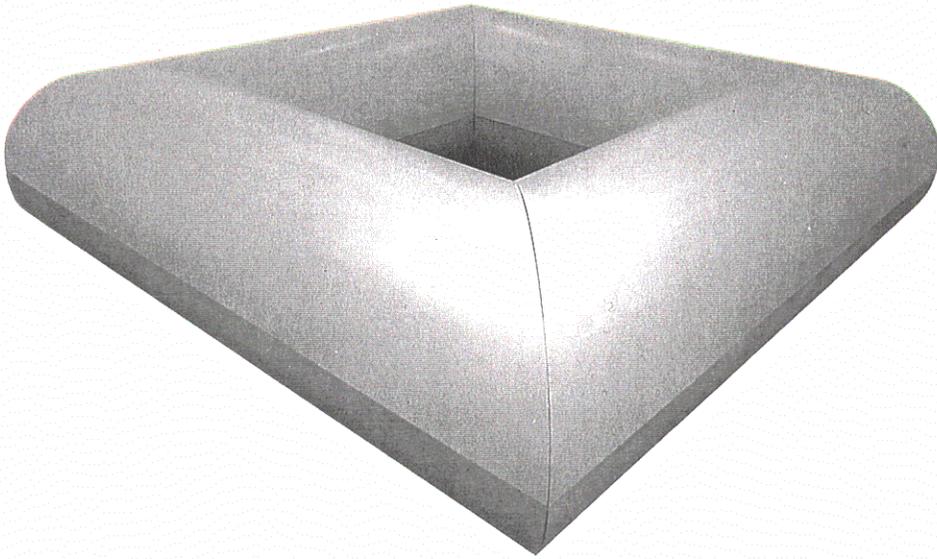
El minimal trae consigo un universo limpio y pulido cuyas características principales son los ángulos rectos, los planos impecables, la frialdad del acabado del material, el rigor, el orden continuo, la racionalidad y la negación del movimiento que es propio y exclusivo de cada material, además de una factura impersonal y la representación del concepto de una manera definida.

Este arte aboga por la producción en serie y los materiales industriales. La elección de estos materiales, entre los que se incluyen materiales compuestos como los de fibra de vidrio con poliéster o resinas epoxy, facilitaba la utilización de un proceso industrial seriado de producción por medio de moldes que suponía un método idóneo para la fabricación de sus obras de una forma precisa (Ver figura II.41).

---

<sup>184</sup>

Ver entre otros: AA.VV., *Art Minimal I, De la ligne au parallelepipedo*, Musee d'Art Contemporain de Bordeaux, 1985, AA.VV., *Art Minimal II, De la surface au plan*, Musee d'Art Contemporain de Bordeaux, 1986 y MARCHAN FIX, Simón, *La historia del cubo: minimal art y fenomenología*, Rekalde, S. L., Bilbao, 1994.



**Figura II.41** Robert Morris, “Sin título”, 1967 (fibra de vidrio) (Pierre Restany, 1973, pág. 144)

Los minimalistas utilizan materiales generados necesariamente mediante un proceso industrial, que precisan para su elaboración de una maquinaria específica y de un personal cualificado. Por esta razón las obras son realizadas directamente en la propia industria de fabricación del material o bien se utiliza éste tal y como sale de la fábrica.

La elección de los productos de la industria está determinada por la voluntad de crear objetos que no remitan más que a sí mismos, que no muestren las marcas de su historia y que no estén cargados de ninguna emoción, excluyendo incluso la destreza manual del artista.

El material va a ser una de las claves para respaldar sus teorías. Ellos rechazan todo su contenido tradicional de perdurabilidad y huyen de la peana como elemento centralizador. Mientras en épocas pasadas los materiales nobles eran utilizados con mayor profusión debido, en gran medida, a su perdurabilidad en el tiempo más que por el material en sí, el minimal trae incluso la necesidad de no eternidad.

Se dejan llevar por cualquier material que no tenga las cualidades artísticas "tradicionales", buscando nuevas soluciones en ambientes industriales y desarrollando actividades que se enmarcan en unos procesos que son para ellos tecnológicamente nuevos y muy diferentes a los anteriores.

Entre los materiales que responden a esas características se encuentran maderas industriales, como contrachapados y formicas, hierros y aceros, así como resinas de poliéster y epoxy y otros plásticos como siliconas, vinilos, poliuretanos o polietilenos, todos los cuales tienen la posibilidad de poderse colorear superficialmente o en masa, empleando colores tanto opacos como transparentes. Los minimalistas se interesaron por el plástico y los materiales compuestos convencionales debido a sus cualidades estructurales y a su ligereza.

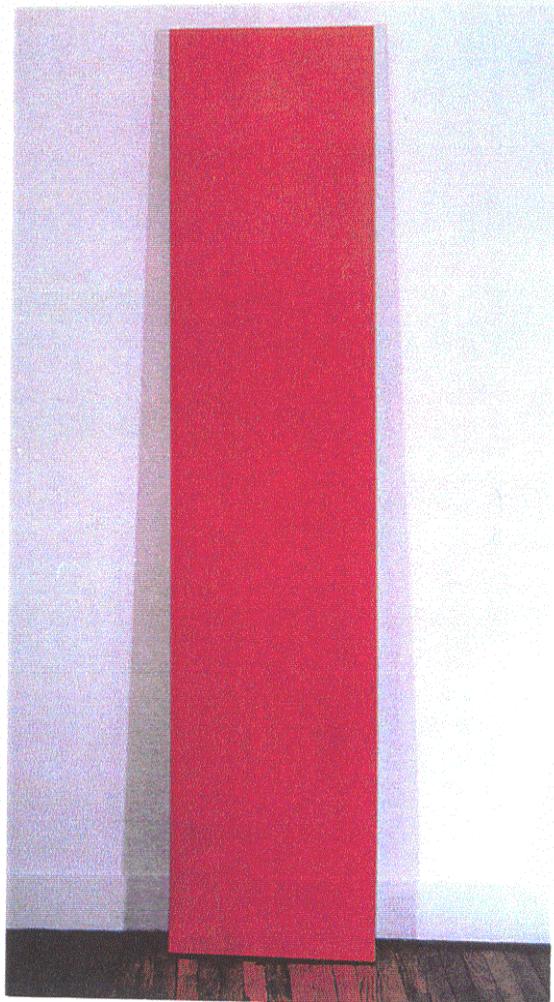
De igual modo, el color va a ser tratado de una forma diferente a los planteamientos artísticos anteriores. Así el uso del color, restringido tradicionalmente al ámbito de la pintura, es utilizado de una forma generalizada por los minimalistas haciendo uso de las técnicas industriales específicas para algunos materiales como son los recubrimientos o revestimientos superficiales<sup>185</sup>.

---

<sup>185</sup>

En el Apartado II.3.10.-Coloración, se encuentran las diferentes formas de coloración de los plásticos

El color es una cualidad más del material como lo es la forma y en muchas ocasiones es utilizado para subrayar esta última. Este es el caso de las obras de John McCracken que combina los materiales compuestos convencionales con madera que lacaba con colores vivos, como en su obra de 1973 "Orange wall relief" (madera y fibra de vidrio).<sup>186</sup>



**Figura II.42** John McCracken, "Orange wall relief", 1973 (madera y fibra de vidrio) (*The maximal...*, 1985, pág. 36).

---

<sup>186</sup>

Examinar: AA.VV., *The maximal implications of the minimal line*, Bard College, New York, 1985 y AA.VV., *Los Angeles*, The Vancouver Art Gallery, 1968.

Estos objetos han de ser capaces de establecer con el espectador una relación que implique una experiencia concreta en un espacio concreto.

La forma escultórica está concebida como el origen de un proceso de organización enfocado hacia el exterior que no tiene ya necesariamente una estructura de tipo interno.

El minimal da una gran importancia a la repetición modular y a la seriación como elemento organizador, eligiendo el cubo como la unidad estructural más representativa. Mediante este elemento el artista plantea al espectador un sistema global de distribución del espacio, utilizando los principios de la Gestalt sobre la “buena forma”<sup>187</sup>.

Se produce una polarización del entorno, la escultura se integra con él, transformándolo y creando un nuevo espacio activo para el espectador donde los conceptos bipolares de vertical-horizontal, interior-exterior de las cosas, de pintura y escultura se varían. Las obras hacen una relectura del espacio a partir de sí mismas, no se limitan a ellas sino que aluden a un orden espacial superior.

La función de la escultura consiste en ocupar el espacio, no solo de una manera abstracta, sino haciendo una intervención concreta en su lugar de emplazamiento y empleando una escala que implique de forma física al espectador, dentro de un orden arquitectónico.

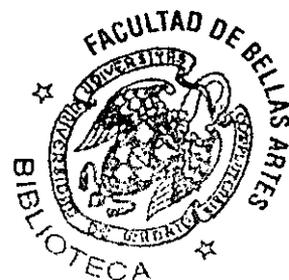
---

<sup>187</sup> Ver bibliografía sobre la Escuela de la Gestalt y la teoría de la “buena forma”, por ejemplo: KOFFKA, Kurt, *Principios de la psicología de la forma*, Paidós, Buenos Aires, 1973, GUSKI, Raines, *La percepción. Diseño psicológico de la información humana*, Herder, Barcelona, 1992 y ARNHEIM, Rudolph, *Arte y percepción visual*, Alianza, Madrid, 1984.

El papel del espacio en la obra de arte transcurre dentro de un espacio perceptivo, donde el espectador no tiene otra elección visual que dirigirse del objeto hacia el entorno. La obra de arte minimal tiende a adecuar su presencia material con la experiencia espacial y temporal del espectador. Dicho de otra manera, intenta hacer una aproximación hasta confundir el punto de vista del espectador y el terreno de su acción. Para este fin pone en escena su propio mecanismo que sirve de referencia espacial, definiendo en su entorno límites, cualidades, dimensiones e invitando al espectador a concentrar su mirada sobre el conjunto creado: objeto-espacio-tiempo.

El objeto artístico no es ya una presencia en un espacio dado y durante el tiempo de su contemplación. Por primera vez el espacio entero es percibido como una estructura geométrica, un volumen estructurante en el interior del cual son confrontados el observador y las esculturas que son dispuestas en él.

Así, principalmente el arte minimal centra la atención en la relación entre la obra y el espacio que la rodea y se dota a ésta de una presencia más real, que establece un contacto más estrecho con el espectador.



#### II.4.1.3.- EL PROCESO COMO FUNDAMENTO.

A mediados de la década de los sesenta, y de forma paralela al arte minimal, una serie de artistas manifestaron una ruptura con la estética anterior con actitudes más abiertas ante la expresividad de la obra de arte que las de los criterios minimalistas<sup>188</sup>. Estos artistas introdujeron en su entorno nuevos elementos que reivindicaban el proceso de la obra artística, movimiento que originó lo que algunos denominarían "arte procesual"<sup>189</sup>. Su etapa más destacada se desarrolló entre 1.968 y 1.975, dándose una coexistencia con el minimal que favoreció la aparición de artistas que se integraron en uno u otro movimiento en distintas fases de su producción creativa.

Ante la visión minimalista, la actitud abierta de los artistas procesuales de aquellos años, que buscaban identificarse con su obra hasta pertenecer a su sustancia, devolvió al arte elementos que habían sido excluidos intencionadamente por el minimal y la crítica formalista.

El interés por la materia y por la gravedad como medio conduce al artista del process a formas que no se han proyectado previamente. Las obras procesuales se identifican con una

---

<sup>188</sup> Basado en la Conferencia *El proceso como fundamento*. Diciembre de 1994. Conferencia en "Entorno -Conferencias y Debates sobre el Espacio y el Arte" Facultad de Bellas Artes U.C.M.

<sup>189</sup> AA.VV., *Diccionario del Arte Moderno*. Ed. Fernando Torres. Valencia, 1979.  
PROCESS-ART: "...el arte procesual se refiere a una de las actitudes básicas del arte contemporáneo, en la que importan cada vez más los procesos formativos de constitución que la propia obra física. Desde el "minimal art" y el arte cibernético hasta las diversas manifestaciones de la desmaterialización del arte se ha constatado un desentendimiento progresivo del objeto a favor del proceso."

fluidez orgánica, respaldándose en la naturaleza, y en ellas se produce un rechazo de las limitaciones de la forma y una afirmación del movimiento de los materiales que anteriormente se negaban. El proceso se encuentra asociado con el azar, la contingencia y la indeterminación.

Al tratar de superar la separación entre el artista y el objeto de arte e iniciarse una preocupación por poner de manifiesto de una manera propia sus imágenes mentales idealizadas, se provoca un cambio de los procesos impersonales que evolucionan hacia el culto de la personalidad de cada artista, del espectador y de sus experiencias en el tiempo.

La introducción del tiempo real como parte integrante de la obra, desde que se empieza hasta que se acaba, produce una reconsideración del papel de la escultura y del objeto de arte, siendo el tiempo un factor nuevo que sugiere al espectador la simultaneidad de pasado, presente y futuro de la obra, a través de una complejidad inesperada.

La obra de arte se convierte así en un trabajo para un tiempo y un espacio emocional definidos, con realidad desde el momento de su concepción y donde todos los cambios posteriores son absorbidos como una circunstancia más de la obra. Tiene un carácter transformable, efímero y adaptable, tanto por la fragilidad de un material sin estructura ni forma como por la forma de presentarla o exponerla, donde se tiene la posibilidad de introducir modificaciones.

Los artistas del arte de proceso experimentan en el campo de las relaciones sensoriales, usando combinaciones de materia y forma que se encuentran en conexión directa con el mundo que las rodea. Examinan la capacidad emotiva inherente a unos materiales y unas formas determinados cuando se colocan en un espacio determinado.

Se abren nuevas posibilidades para la liberación del hechizo del objeto artístico y su colocación en el medio, sustituyendo los acabados de fábrica por los subproductos de la civilización industrial y optándose por relacionar objeto y ambiente.

La pintura se ha visto absorbida por la escultura dado que el artista necesita utilizar toda la dimensión física de la obra para expresar su idea.

La conciencia de la escala viene dada por la comparación como metáfora del propio cuerpo y el objeto, donde lo vertical tiene una especial trascendencia. Así, Eva Hesse o Bruce Nauman plantearon como fundamental la relación de sus obras con las dimensiones de su cuerpo y del espacio que les rodeaba, ya que no se preocupaban tanto por el valor semántico de los materiales como por las sensaciones que traducían y por su experiencia. En este sentido, parte de la obra de Eva Hesse alude al cuerpo como un sistema de desagüe, particularmente en algunas de sus obras de poliéster y fibra de vidrio.



**Figura II.43** Eva Hesse, Repetition nineteen III (fibra de vidrio y resina poliéster) (Bill Barrete, 1989, pág. 173)

Cuando se añade a las obras elementos externos como la luz, las posibilidades expresivas aumentan y la relación entre la escala real y la emitida es un factor enriquecedor; así Hesse utilizó la luz como parte integrante de su obra y pieza importante de su espacio. La condición traslúcida de la fibra de vidrio le permitió hacer de la luz uno de sus elementos de trabajo.

A algunos artistas de esta corriente se les asocia directamente con un material mientras que otros entran en una fructífera competencia en el uso de uno de ellos. Esto ocurre en el caso de la fibra de vidrio y el poliéster.

Robert Morris utiliza la fibra de vidrio para comprimir y expandir el espacio, para dar forma a la atmósfera que le rodea como si fuera una sustancia sólida.

En las obras de Bruce Nauman en fibra de vidrio destacan las interesantes propiedades positivas y negativas, interiores y exteriores, de las formas huecas, abiertas y macizas y sus espacios cerrados y llenos.

En ocasiones el artista se sirve de este material para manipular directamente el espacio, dibujando sobre él. Este es el caso de obras de Bary, Hesse y Bolinger.

En el arte procesual la materia bulle, en contraposición con el acabado perfecto y geométrico del minimalismo. Los artistas procesuales eliminan cualquier parecido con objetos artísticos de acabado perfecto, rígido y definido, mudando hacia materiales industriales blandos, flexibles y sin estructura como son la fibra de vidrio y el poliéster, además de otros como el latex, la goma, la cuerda, el plomo, el tubo de neón, la tela, etc., que eran elementos antiesculturísticos en el sentido tradicional y ahora son una parte primordial de los objetos artísticos, propiciando una dimensión pictórica de la escultura.

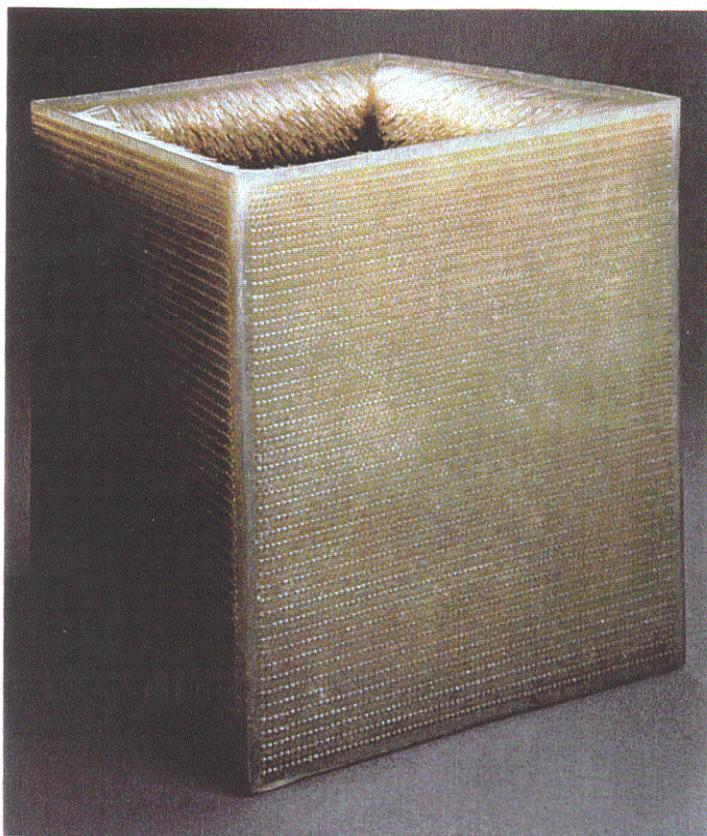
El process se contrapone también al minimal al huir de las técnicas de fabricación industriales, de los métodos seriados e impersonales, de los moldes. Se replantean los procesos de fabricación. que ya no necesitan medios técnicos y humanos especializados sino que son los propios artistas los que elaboran sus obras mediante un proceso de factura manual, directo y personal. Esta participación del artista se opone al "anonimato" de la fabricación industrial.

El uso de las propias técnicas directas de manufactura en la elaboración de obras con estos materiales industriales va creando un hábito técnico en los artistas que los utilizan, connotando un mundo de operaciones manuales en cierto modo alienantes y repetitivas.

El artista está interesado ante todo por el proceso y adquiere un compromiso muy claro con sus materiales, haciendo de la fase de elaboración de las obras un punto directo de conexión con ellos al optar por una técnica directa de manufactura. En los procesos de elaboración se incorporan gestos cotidianos como anudar, alinear, verter, sumergir, arrugar, etc. Las formas dejan su lugar a los comportamientos y actitudes. Se deja llevar por su obra, por lo que en ella sucede y trata de ser fiel al material que se utiliza y hacer un uso directo de él. Quiere trabajar con las cualidades abstractas que representan el material, la forma que va a tomar, el tamaño, la escala, la posición, el lugar donde se va a emplazar, etc.

La fibra de vidrio era un material inédito hasta mediados de la década de los sesenta (como ya se indicó, la producción industrial de esta fibra se inició hacia 1940) y fue utilizado a partir de ese momento por una gran mayoría de autores, para quienes resultó muy fructífero, valorando en él dimensiones nuevas. Se utilizó con sus cualidades intrínsecas, con sus características táctiles, reivindicando la materia, dejándola libre, utilizando sus marcas, salpicaduras, líneas, sombras, sin ningún tipo de prejuicio formal.

"Hesse... Accession... El descubrimiento de esta cualidad táctil era importante y la artista lo retoma en tres ocasiones, utilizando en las versiones siguientes una caja en fibra de vidrio de donde eran extraídos los tubos de plástico. "Titulé Accession a esa gran caja que realicé en 1967. Primero la hice de metal y luego de fibra de vidrio. Exteriormente adopta la forma de un cuadrado perfecto y el exterior resulta muy limpio. Interiormente, por el contrario, tiene un aspecto extraordinariamente caótico, aunque solo sea por el pedazo de tubo que lo atraviesa. Es demasiado bello, como una piedra preciosa, está demasiado bien."<sup>190</sup>



**Figura II.44** Eva Hesse, Accession III (fibra de vidrio y tubos de plástico) (Bill Barrete, 1989, pág. 173)

---

<sup>190</sup> PIRSON, Jean-Françoise, *La estructura y el objeto*, PPU, Barcelona, 1988.

## II.5.- UTILIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS EN RESTAURACIÓN

Del mismo modo que para los artistas la utilización de los materiales compuestos ha supuesto abrir una amplia gama de posibilidades para trasladar al terreno físico sus premisas artísticas, para los restauradores el uso de estos materiales ha significado el descubrimiento de un extenso campo de trabajo en el que pueden encontrarse soluciones a una gran cantidad de problemas planteados con anterioridad en sus trabajos de restauración. Las principales aplicaciones de este tipo de materiales han estado localizadas en la realización de soportes para arranque de pintura mural y de mosaicos<sup>191</sup>.



**Figura II.45** Mosaicos arrancados, pegados a un sandwich, en proceso de restauración. Supraintendenza Archeologica di Roma.

---

<sup>191</sup> DÍAZ-MARTOS, Arturo, *Restauración y Conservación del arte pictórico*, Arte Restauro S.A., Madrid, 1975, pág. 51.

## **II.5.1.- TRANSFERENCIA DE PINTURA MURAL**

La transferencia es el último recurso en la restauración de pintura mural, sólo utilizable si la obra no se puede salvar por otros medios. Para que el levantamiento de la pintura del muro y su posterior adhesión a un nuevo soporte se realice con éxito deben de optimizarse cada una de las fases del proceso<sup>192</sup>.

En primer lugar es de suma importancia realizar un estudio previo de los materiales que componen el muro y su dibujo. El objetivo de dicho estudio es lograr que los cortes que resultan indispensables para la operación sean los más sencillos y causen el mínimo deterioro a la pintura.

Posteriormente el restaurador debe realizar un diagnóstico del estado del muro para seleccionar el método de arranque que estime más adecuado.

---

<sup>192</sup> DÍAZ-MARTOS, Op. cit., pág. 833.

## II.5.2.- TIPOS DE ARRANQUE DE LA PINTURA

Existen tres métodos operatorios para el arranque de pinturas. Estos son "stappo", "stacco" y "stacco a masello".

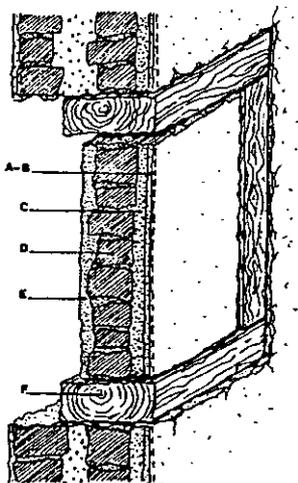
"... 1.- El "stappo" es el método de arrancar la pintura del sustrato por medio de una tela que se pega a la superficie y de la cual se tira.

2.- El "stacco" es el arranque de la pintura y el sustrato, cortando éste con instrumentos adecuados.

3.- En el "stacco a masello" se desprenden pintura, sustrato y parte del soporte mural...<sup>193</sup>

Stacco a masello.

A y B . Capa pictórica e intonaco  
C. Arricio  
D. Soporte mural  
E. Dorso del muro tras el arranque  
F. Bastidor de madera utilizado para contener la pintura y su soporte y facilitar el transporte.



112

**Figura II.46** Stacco a masello (Guido Botticelli, pág. 112)

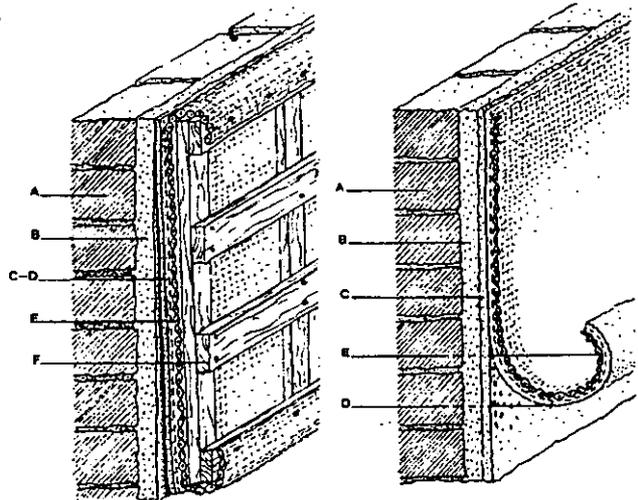
<sup>193</sup> Ibidem, ver además: TINTORI, Leonetto y THOMSON, G., "Methods used in Italy for detaching murals", *Recent advances in conservation*, IIC, Butterworths, London, 1963, pp. 118-122 y BOTTICELLI, Guido, *Metodologia di restauro delle pitture murali*, Centro Di.

Stacco

- A. Soporte mural
- B. Arriccio
- C y D. Intonnaco y capa pictórica
- E. Tela y cola
- F. Soporte de sustentación.

Strappo

- A. Soporte mural
- B. Arriccio
- C. Intonnaco pictórico
- D. Capa pictórica
- E. Tela y cola



113

**Figura II.48** Stacco y strappo (Guido Botticelli, pág. 113)

Una vez definido el método operativo de arranque es preciso seleccionar el método de protección de la capa pictórica, que vendrá determinado por el primero. La protección consistirá básicamente en la aplicación de un cartonaje o unión de lienzos con aglutinantes reversibles.

Finalmente el restaurador precisa de un soporte rígido, que sustituya al muro arquitectónico, sobre el que trasladar la pintura mural.

### II.5.3.- PROPIEDADES DEL SOPORTE IDEAL.

Llegados a este punto, conviene relacionar las cualidades que los restauradores buscan en lo que podría denominarse "soporte ideal". Estas se refieren a los siguientes puntos:

- Adaptabilidad al original.
- Resistencia a la humedad.
- Elasticidad.
- Estabilidad dimensional.
- Mínimo peso y grosor y facilidad de transporte.
- Resistencia a los agentes atmosféricos y biológicos.
- Resistencia al agua y a los disolventes usados en restauración.
- Sencillez de la estructura.

Mora y Phillipot fueron quienes las concretaron, definiendo los requisitos que ha de cumplir un soporte para este fin. Estos requisitos se describen a continuación, tomados en síntesis de su libro *Conservation of wall paintings*<sup>194</sup>.

---

<sup>194</sup> MORA, Paolo y PLILLIPOT, Paul, *Conservation of wall paintings*, Butterwoths, ICCROM, 1984, pág 262 -265.

1.- Adaptabilidad a las dimensiones, formas y textura de la superficie pintada, de manera que el nuevo soporte preserve o reproduzca la forma exacta del soporte original.

2.- Las propiedades mecánicas del soporte deben incluir una cierta elasticidad para permitir absorber los posibles choques sin que lleguen a afectar las capas quebradizas de la pintura.

3.- Estabilidad dimensional. El soporte ideal debe tener un coeficiente bajo de expansión térmica, correspondiente tanto como sea posible, a aquel supuesto para la capa de pintura, de tal manera que no tienda a separarse del soporte o desintegrarse por cambios en la temperatura ambiente. Las dimensiones del panel no deben ser afectadas por la humedad u otros factores climáticos.

4.- Conductividad térmica y capacidad térmica deben ser tan bajas como sea posible. El panel debe impedir en todo momento que la capa de pintura sea la superficie mas fría, lo que provocaría condensaciones de la humedad en ella.

5.- El soporte debe impedir que la humedad del muro alcance la capa de pintura. La acción química de cualquier clase es potencialmente destructiva para la pintura y como dicha acción es incentivada por la presencia de humedad, la pintura debe de estar siempre seca.

La humedad, además, hace que crezcan hongos, algas, etc., mientras que en condiciones razonablemente secas no debería haber ninguna preocupación sobre este tema. Así pues, el soporte debe ser impermeable tanto al agua como al vapor de agua.

6.- Para la construcción de soportes no debe ser necesario tener que recurrir a procesos que están más allá de los propios medios del autor o restaurador de la pintura o que requieran materiales que sean difíciles de obtener comercialmente. El precio del soporte por unidad de área debe ser relativamente bajo ya que por la naturaleza de la obra se puede trabajar con superficies muy grandes.

7.- El soporte debe ser reversible. Siempre debe ser posible separar la pintura del soporte mediante un mínimo de operaciones simples para fijarla en un nuevo soporte sin ningún tipo especial de precauciones. Para ello es necesario aplicar una capa de intervención separable de la capa de pintura.

8.- Debido a que las dimensiones de las pinturas murales despegada suelen ser considerables, el peso del soporte por unidad de área debe ser tan ligero como sea posible. Esto simplificará enormemente el transporte y reducirá las posibilidades de daño.

9.- Resistencia a los disolventes y al agua. Una pintura que ha sido desplegada y puesta en un nuevo soporte puede acomodar polvo en el curso de su conservación. La superficie de la pintura debe ser limpiada con disolventes de uso corriente y, por tanto, el soporte debe ser tal que no exista riesgo de que se despegue o que el soporte mismo se vea alterado por la acción de líquidos que puedan haber penetrado en la superficie.

10.- El espesor del soporte no debe ser más grande que aquel del original de manera que cuando se reponga la pintura "in situ" no haya necesidad de adelgazar la pared original o modificar la arquitectura a causa de que la pintura va mas allá de la superficie de la pared.

11.- Incluso si la pintura transferida va a ser exhibida en un medio ambiente favorable, todos los materiales usados en el soporte deben ofrecer una resistencia máxima en condiciones atmosféricas desfavorables, en particular a la alta humedad y a la luz ultravioleta.

12.- Se debe tener una buena resistencia a los agentes biológicos. Los materiales usados para el soporte no deben proveer ningún incremento para el moho, las algas o los hongos. Tampoco deben soportar ningún daño que pueda estorbar su función mecánica cuando entran en contacto con materiales nutritivos que han sido objeto de ataques biológicos.

El soporte ideado por Mora y Phillipot estaba fabricado a base de materiales compuestos convencionales y respondía satisfactoriamente a los requerimientos arriba expuestos, tanto en la realización como en la restauración de pintura mural. Este soporte consistía en un sandwich de poliéster con fibra de vidrio y núcleo de celdilla de abeja<sup>195</sup>

---

<sup>195</sup> Ver descripción del soporte en el apartado II.5.4.3.2.- Soportes basados en materiales compuestos con estructura tipo sandwich., en la pág. II.203.

## II.5.4.- ANTECEDENTES DE SOPORTES MURALES PARA RESTAURACIONES QUE NECESITABAN UN LEVANTAMIENTO DE LA PINTURA MURAL.

Desde antiguo restauradores y artistas han venido utilizando materiales diversos en su continua búsqueda del "soporte ideal" para el levantamiento de pintura mural<sup>196</sup>.

De la elección del soporte a utilizar para el traslado de la pintura mural puede depender la salvación de la obra de arte o, por el contrario, si no se ha elegido el adecuado, la degradación irreparable o pérdida total de la obra.

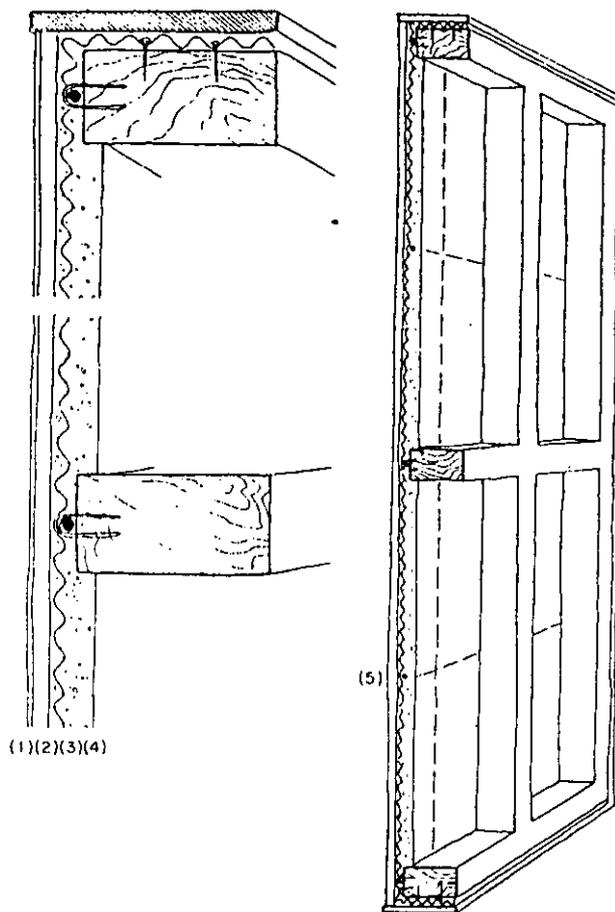
Los soportes que se usaban tradicionalmente presentaban una serie de problemas de conservación, peso excesivo, falta de la necesaria estabilidad dimensional, adaptabilidad, etc. Estas deficiencias no permitían que fueran soportes aptos para sustituir al muro como soporte de la pintura y hacían de ellos materiales poco convenientes para este uso. Entre estos soportes, los más importantes han sido los que se citan a continuación.

---

<sup>196</sup> Teniendo en cuenta que existen bastantes tratados recopilatorios de las experiencias realizadas en el campo de los traslados de pinturas murales, aquí se va a realizar solamente una visión general de los antecedentes de arranques de pintura mural con los casos más relevantes. Para una mayor información puede consultarse la bibliografía sobre este tema, donde destaca con interés especial: MORA, Paolo y PHILLIPOT, Paul, *Conservation of wall paintings*, Butterwoths, ICCROM, 1984. Es éste un tratado fundamental y de necesaria referencia en el que se realiza una enumeración de los diferentes soportes utilizados en arranque de pintura mural. Pueden verse además las tesis doctorales de RODRÍGUEZ SANCHO, Isabel, *Nuevos soportes rígidos con fines artísticos*, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 1994 y de FERRER MORALES, Ascensión, *La pintura mural, su soporte, conservación, restauración y las técnicas modernas*, Uniyersidad de Sevilla, 1995.

### II.5.4.1.- SOPORTES RÍGIDOS TRADICIONALES.

Estos soportes rígidos se realizaban con armadura metálica y yeso, con cemento, o, más recientemente, con películas de asbestos.



**Figura II.49** Soporte rígido tradicional. 1-Capa de pintura, 2-Intonaco original, 3-Armadura metálica, 4-Intonaco, 5-Refuerzos metálicos (Paolo Mora, 1984, pág. 266).

En algunas épocas del pasado se tendía a realizar para este fin soportes minerales tendidos sobre una red metálica que se encontraba sujeta por un bastidor metálico o de madera.<sup>197</sup>

Los defectos de estos soportes han hecho que algunos de ellos hayan sido ya sustituidos por otros como en el proceso descrito por Vlad Borrelli en 1981, en el cual se ha utilizado un soporte realizado con fibra de vidrio y poliuretano<sup>198</sup>.

Los soportes fabricados con yeso dieron un buen resultado en su comportamiento mecánico pero tienen varios inconvenientes: por un lado la red metálica y el bastidor producen con el paso del tiempo oxidaciones y movimientos que ponen en peligro la estabilidad de la obra arrancada, el yeso puede reblandecerse y debilitarse en presencia de humedad por la absorción de agua perdiendo la cohesión con la capa de pintura, además, en estos soportes se producen migraciones de sales hacia la superficie y resultan pesados y de difícil manejo.<sup>199</sup>

---

<sup>197</sup> Ver también: BOTTICELLI, Guido, *Metodologia di restauro delle pitture murali*, Centro di, Florencia.

<sup>198</sup> VLAD BORRELLI, Licia, "Le pitture e la tecnica della conservazione", *Pompei 1748-1980: i tempi della documentazione, catalogo della mostra, luglio-settembre 1981, Pompei*, Multigrafica Editrice, Roma, 1981, pp. 81-87.

<sup>199</sup> Ver además: CAGIANO DE AZEVEDO, Michelangelo, "Procedimenti conservativi per i dipinti della Casa Romana della Farnesina", *Bollettino dell'Istituto Centrale del Restauro*, n° 7-8, 1951; CAGIANO DE AZEVEDO, Michelangelo, "Il restauro degli affreschi romani del Museo di Mariemont (Belgio)", *Bollettino dell'Istituto Centrale del Restauro*, n° 11-12, 1952; SCHNEIDER, Thomas, "Methoden der freskovebertragung in Italien", *Maltechnik, Heft 1*, 1962 y JORGJIEVSKI, Giorgji, "Primena na novi nosachi-podlogi na simnatiot fresco-zhivopis", *Kulturno-istorisko nasledstvo vo sr Makedonija Kurturmo nasledstvo IV, Vol. 11*, 1972.

Se hicieron intentos para mejorar las prestaciones de este tipo de soportes con la sustitución del yeso por cemento pero, además de conservar anteriores defectos como el peso y el difícil manejo y los propios del bastidor y la red metálica, se añadían los problemas característicos del cemento. Este material, expuesto a cambios atmosféricos, causa migraciones hacia la superficie que producen eflorescencias e impiden la lectura correcta de la obra pictórica pudiendo llegar a hacer ilegible la pintura<sup>200</sup>, con especial mención al denominado Eternit (un tipo de fibrocemento)<sup>201</sup>.



**Figura II.50** Pisa, Camposanto Monumentale. “El triunfo de la muerte” durante su restauración (Leonetto Tintori, 1989, pág. 25).

---

<sup>200</sup> Para más información consultar: VLAD BORRELLI, Licia, “Le pitture e la tecnica della conservazione”, *Pompei 1748-1980: i tempi della documentazione, catalogo della mostra, luglio-settembre 1981, Pompei*, Multigrafica Editrice, Roma, 1981, pp. 81-87.

<sup>201</sup> Ver: LIBERTI, Salvatore, “Sui supporti rigidi per il trasporto degli affreschi”, *Bollettino dell'Istituto Centrale del Restauro, Year 1951, n° 5-6*, pág. 15-20, 1951 donde se hace especial mención de este soporte.

Liberti Salvatore señala que este soporte no debe ser utilizado y apoya su afirmación mencionando la restauración de "El Triunfo de la Muerte" del Campo Santo de Pisa (figuras II.50 y II.51), obra en la que se produjeron eflorescencias de difícil eliminación. Esta obra fue posteriormente restaurada en 1989 utilizando un sandwich formado por dos laminados de fibra de vidrio-resina y celdilla de aluminio, además de un estrato de intervención de corcho.<sup>202</sup>

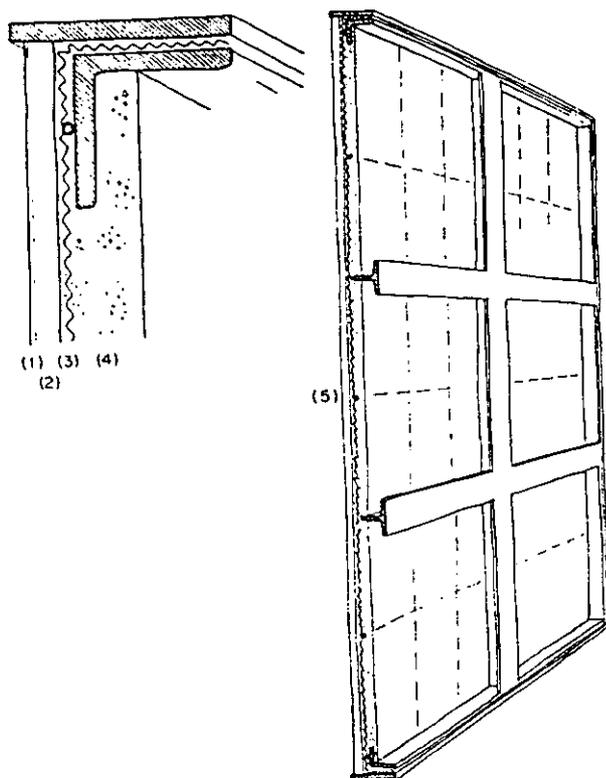


**Figura II.51** Pisa, Camposanto Monumentale. "El triunfo de la muerte" durante su restauración (Leonetto Tintori, 1989, pág. 21).

---

<sup>202</sup> Para más datos ver: AA.VV., *Il 'Triunfo della Morte' di Palermo: l'opera, le vicende conservative, il restauro*, Regione Siciliana-Assessorato dei Beni Culturali, Ambientali e della Pubblica Istruzione, Enzo Sellerio, Palermo, 1989.

El soporte realizado con asbesto, además de ser tóxico, está condicionado por su presentación industrial que hace que el mural tenga que adherirse a una superficie artificial y cuadrículada. Este efecto produce una ruptura en la lectura original, creando superficies fragmentadas e irreales. Otra variante de estos soportes son los realizados entre 1950 y 1955 con un sistema de travesaños en forma de T ó L<sup>203</sup>.



**Figura II.52** Sistema de travesaños en forma de T ó L. 1-Capa de pintura, 2-Intonaco, 3-Armadura metálica, 4-Nuevo intonaco, 5-Refuerzos metálicos (Paolo Mora, 1984, pág. 267).

<sup>203</sup> Revisar: Op. cit., MORA, Paolo y PHILLIPOT, Paul, pág. 267-269.

#### II.5.4.2.- SOPORTES DE MATERIALES NATURALES.

Este tipo de soportes han sido fabricados tradicionalmente en diversos materiales, entre los que puede destacarse la tela.

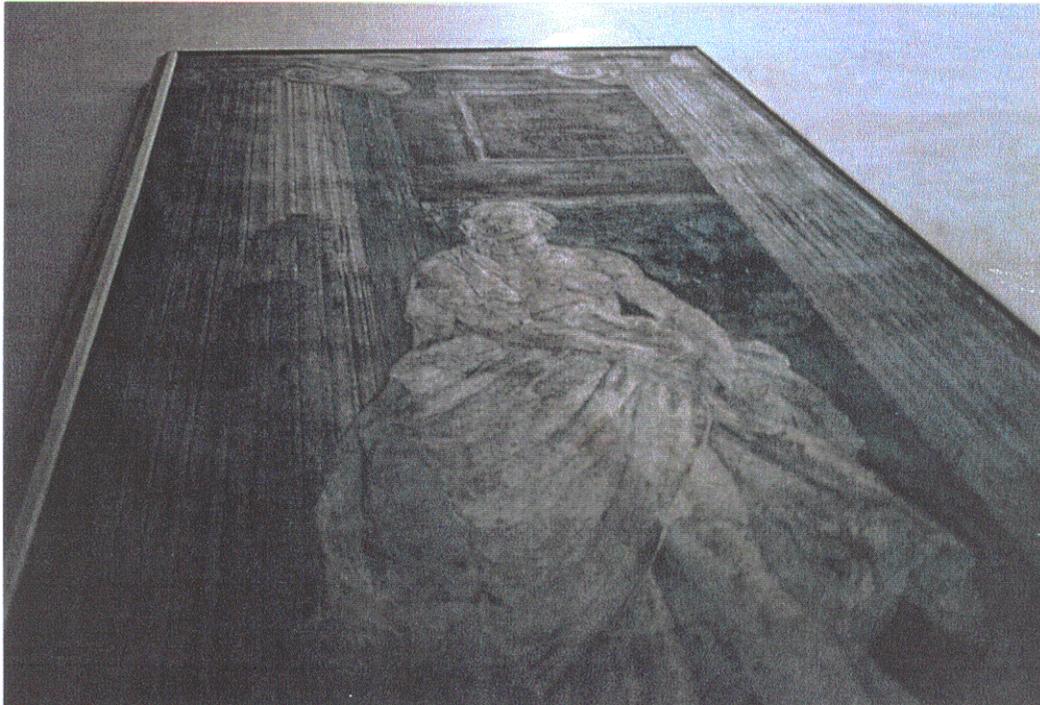
El lienzo, en comparación con los soportes anteriores, aporta mejoras como la ligereza y la posibilidad de solucionar los problemas de las grandes dimensiones de la pintura mural. Sin embargo, también posee algunos inconvenientes como el hecho de que, en soportes de grandes dimensiones, presente problemas en las uniones de los diferentes lienzos. Además, la incorporación de un soporte de este tipo altera las características de la técnica mural y añade los problemas propios de los materiales naturales<sup>204</sup>. Otro inconveniente es la imposibilidad de reproducir la forma de la pared original<sup>205</sup>.

---

<sup>204</sup> Estos problemas se describen en los Apartados II.2.1.1.- y II.2.2.2.2.- Agentes de deterioro. de esta tesis. Ver también: SCICOLONE, Giovanna C., *Il restauro del dipinti contemporanea*, Nardini, Florencia, 1993, pág 112-114.

<sup>205</sup> Ver también: BUCCI, Mario, *Camposanto monumentale di Pisa. Affreschi e sinopie*, Opera della Primaziale, Pisa, 1960; LARSEN, Erik, "Transfer of ancient paintings to new canvas", *Apollo*, Year 1955, n° 61, 1955, pp. 150-151 y CAGIANO DE AZEVEDO, Michelangelo, "Il distacco delle pitture della Tomba delle Bighe", *Bollettino dell'Istituto Centrale del Restauro*, Year 1950, n° 2, 1950.

Este tipo de estructuras pueden verse en muchos museos como el Metropolitan de New York o el Museo del Prado y, dentro de este último, son ejemplos de ellas las pinturas murales de la Ermita de la Cruz de Maderuelo (Segovia) o la obra de Goya “Duelo a garrotazos”<sup>206</sup>.

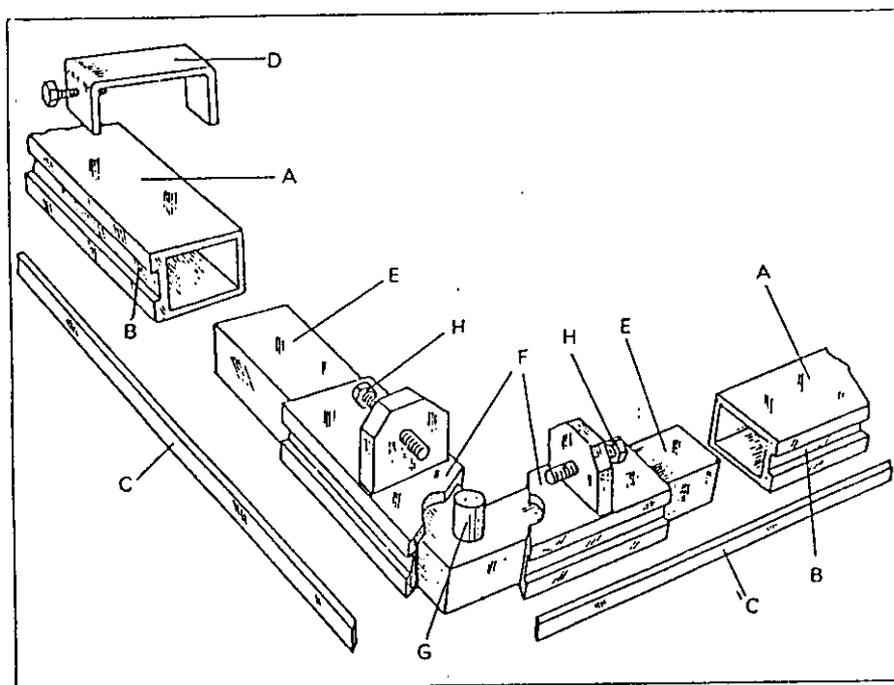


**Figura II.53** Pintura mural sobre tela en la que se observan destensamientos en la superficie de la tela producidos por las propiedades de la tela como soporte para sustentar el mural. Metropolitan Museum of Art. New York.

---

<sup>206</sup> Consultar: AA.VV., *El Prado vivo*, Museo del Prado, Madrid, 1992. Cesari Brandi hace referencia a este soporte en BRANDI, Cesare, "Sui problemi dei supporti", *Bolletino dell'Istituto Centrale del restauro*, Year 1950, n° 1, 1950, pp. 13-19.

Un intento de mejorar las características de este soporte se realizó mediante la incorporación al mismo de un sistema tensor de la tela que consiste en la colocación del lienzo sobre un bastidor de tensión regulable que dispone de un sistema de armaduras metálicas y una serie de muelles ajustables. Las ventajas que aportaba consistían principalmente en una cierta posibilidad de amoldarse a los contornos irregulares y evitar los destensamientos de la tela. Sus inconvenientes eran similares a los del soporte de tela, añadiéndose una gran complejidad para su manejo y para mantener la tensión regulada y constante<sup>207</sup>.



**Figura II.54** Esquema de una armadura metálica de tensión regulable (*Restauri in Piemonte*, 1971, pág. 24)

<sup>207</sup> Ver además: BRANDI, Cesare, "Sui problemi dei supporti", *Bolletino dell'Istituto Centrale del restauro*, Year 1950, n° 1, 1950, pp. 13-19, CAPPASO, Ada y SANTINI, Manlio, "Il distacco delle pitture di una tomba tarquiniese di recente scoperta", *Bolletino dell'Istituto Centrale del restauro*, Year 1958, n° 34-35, 1958 y CARITA, Roberto, "Supporti per gli affreschi rimossi", *Bolletino dell'Istituto Centrale del restauro*, Year 1958, n° 36, 1958.

### II.5.4.3.- SOPORTES BASADOS EN MATERIALES SINTÉTICOS.

Frente a los soportes basados en materiales tradicionales, la introducción de los soportes, rígidos o no, basados en materiales sintéticos, supone un gran cambio ya que éstos ofrecen la posibilidad de mejorar de forma importante las propiedades de los soportes tradicionales.

A continuación se van a describir los soportes más importantes realizados en estos materiales y que pueden resultar de interés para la presente investigación. Se realiza igualmente un pequeño estado de la situación en materia de soportes para restauración fabricados con materiales sintéticos. Entre ellos destacan principalmente los laminados de fibra-resina, con una especial dedicación a los soportes basados en laminados de fibra de carbono ya que son éstos el objeto esencial de los actuales trabajos de investigación.

#### II.5.4.3.1.- Soportes realizados en masonite<sup>208</sup>.

Este material está realizado con fibra de madera comprimida<sup>209</sup> y fue descartado para este uso porque, además de tener los mismos problemas que los soportes tradicionales de madera,<sup>210</sup> produce en presencia de humedad ambiental abombamientos,

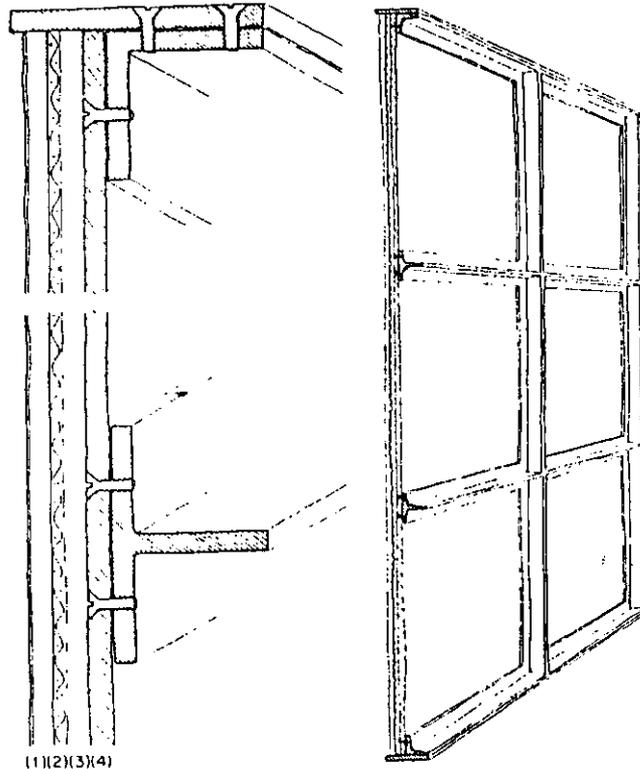
---

<sup>208</sup> Material considerado sintético por fuentes como MORA, Paolo y PHILLIPOT, Paul, *Conservation of Wall Paintings*, Butterwoths, ICCROM, 1984 y las tesis doctorales de RODRÍGUEZ SANCHO, Isabel, *Nuevos soportes rígidos con fines artísticos*, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 1994 y FERRER MORALES, Ascensión, *La pintura mural, su soporte, conservación, restauración y las técnicas modernas*, Universidad de Sevilla, 1995.

<sup>209</sup> Más información en: AA.VV., *Tecnica e restauro delle pitture murali*, Opificio delle pietre dure e laboratori di restauro, Firenze, 1980, pág. 84.

<sup>210</sup> Descritos en el Apartado II.2.1.1.- Agentes de deterioro, de la presente tesis.

desprendimientos y deformaciones de la capa de pintura. También tiene un peso considerable y su superficie rígida le impide la adaptación al muro original<sup>211</sup>.



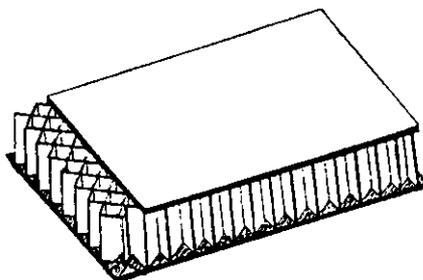
**Figura II.55** Soporte de masonite. 1- Capa de pintura e intonaco original, 2-Gasa y lienzo, 3-Capa de intervención, 4-Placa de masonite (Paolo Mora, 1984, pág. 272).

<sup>211</sup> Ver también: TINTORI, Leonetto, "Precisazioni sulle qualita effettive dei materiali usati nel restauro delle pitture murali quali risultano da osservazioni di campioni e da esperienze su affreschi alluvionati", *ICOM Committee for conservation plenary meeting*, Amsterdam, 1969.

### II.5.4.3.2.- Soportes basados en materiales compuestos con estructura tipo sandwich.

- Soportes con núcleo de celdilla de abeja o estructuras similares.

La celdilla de abeja utilizada para los soportes puede ser de cartón impregnado en resina<sup>212</sup> o de aluminio<sup>213</sup> o estar realizadas con materiales tan variados como cartones de huevos<sup>214</sup> o soportes de fibra de madera con perforaciones<sup>215</sup>.



**Figura II.56** Esquema de un sandwich de celdilla de abeja de aluminio y cartón (*La cappella Brancacci*, 1992, pág. 187).

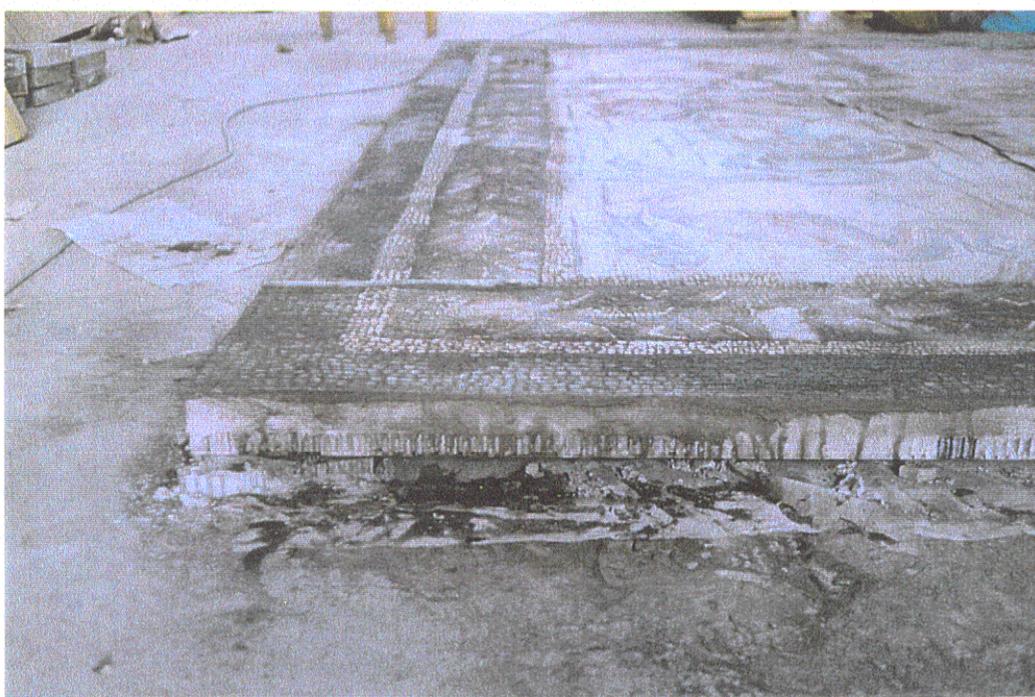
<sup>212</sup> Consultar: BAKER, Eve y BAKER, R. W., "An account of the conservation of the painted vault in the Chapel of The Guardian Angels, Winchester Cathedral", *The conservator*, Vol. 1, 1977 y SUBBARAMAN, S. Jayaramsunderam, "Separation of the chola and nayaka layers of paintings in the Brihadeeswara temple, Thanjavur, by the distacco process", *Symposium on mural paintings under the aegis of Indo-us Sub-commission on Culture, held in Ajanta in april 1980*, Archaeological Survey of India, Dehra Dun, 1980, pág. 5.

<sup>213</sup> Más información en: SAVKO, Michael, "La restauration d'une peinture murale de l'eglise d'Erpekorn transfere au Musee en plein air de Bokrijk", *Bulletin de l'Institut Royal du Patrimoine Artistique*, Vol. 9, 1966., BAKER, Wendy y MACKAY, Helen, "The conservation/restauration of the Brangwyn mural", *IIC-Canadian Group annual conference, june 20-24, 1982*, Universite Caval, Quebec, 1982. y KIERKEGAARD, Bo, "Transport af et 44 m<sup>2</sup> Asger Jorn-maleri", *Meddeleser on konservering*, n° 5-6, Nordisk Konservatorforbunds, 1990., BLANC, Patrick., "Restauration de la peinture de la rue Amyot", *Archaeologia*, 1987, pp. 32-33. y BLANC, Patrick., "La technique de restauration des peintures murales romaines de la rue Amiot", *Cahiers de la rotonde*, n° 8, 1985, pp. 70-77.

<sup>214</sup> Ver además: BIALEK-WORZNIAKIEWICZ, Borena, "Zastosowanie nowych typow konstrukcji przekadkowych jako podlozy do przekladkowych jako podlozy do przeniesionych malowidel sciennych", *Ochrona zabytkow*, Vol. 27, n° 3, 1974.

<sup>215</sup> Consultar: AA.VV., "Museums in the Ukraine", *Museum*, Vol. 19, n° 3, 1966.

Los laminados o pieles que recubren la celdilla de abeja pueden estar compuestos de fibra de vidrio con resinas poliéster, siendo éstas las resinas más frecuentemente utilizadas para obras que presentan zonas curvas o con irregularidades. También pueden usarse resinas epoxy<sup>216</sup> e incluso espumas de estas mismas resinas<sup>217</sup>. Estas pieles pueden ser también de aluminio, en cuyo caso la celdilla de abeja normalmente es también de aluminio<sup>218</sup>.



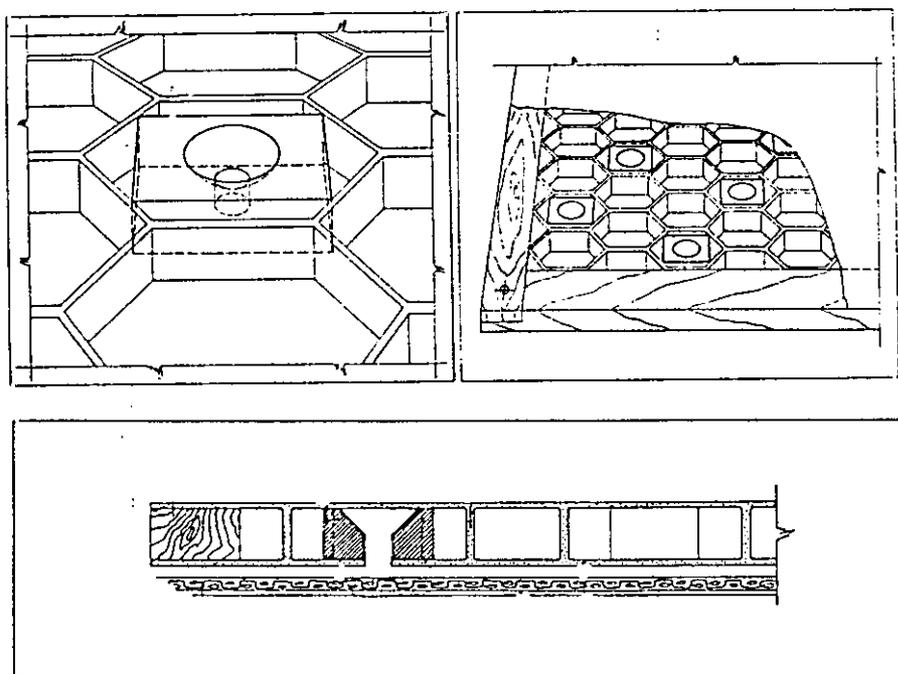
**Figura II.57** Proceso de restauración de un mosaico en un sandwich de celdilla de abeja de aluminio Supraintendenza Arqueologica di Roma.

<sup>216</sup> Ver más información en: AA.VV., "La restauration des peintures murales de la ville de Tunja (Colombie)", *ICOM committee for conservation 3th. triennial meeting*, Madrid, 1972.

<sup>217</sup> Puede encontrarse en: BONE, Lesley, "Teotihuacan mural project", *Newsletter (Western Association for Art Conservation)*, Vol. 8, n° 3, 1986.

<sup>218</sup> Consultar: AA.VV., "California State Capitol Restoration Project", *Newsletter (Western Association for Art Conservation)*, Vol. 4, n° 1, 1982, pp. 1-3.

Se han empleado igualmente laminados de fibra de vidrio-resina poliéster con celdilla de abeja de aluminio<sup>219</sup> o de cartón<sup>220</sup>.



**Figura II.58** Ejemplo de estructura de nido de abeja (*Restauri in Piemonte*, 1971, pág. 20).

<sup>219</sup> Ver: HUDKINSON, Ian, "Conservation and trasfer of an early 19th. century painted room", *APT Bulletin*, Vol. 14, n° 1, 1982, PASSALACQUA, Paola, "La 'Madonna in Gloria' di Pietro Perugino a Panicale: un esempio di collaborazione tra pubblico e privato", *Kermes*, Anno 4, n° 12, 1991, pp. 11-31, VLAD BORRELLI, Licia, "Il restauri dell'aula isiaca - il restauro", *Bolletino dell'Istituto Centrale del restauro*, Year 1967, 1967.

<sup>220</sup> Revisar: SUBBARAMAN, S. Jayaramsunderam, "Separation of the chola and nayaka layers of paintings in the Brihadeeswara temple, Thanjavur, by the distacco process", *Symposium on mural paintings under the aegis of Indo-us Sub-commission on Culture, held in Ajanta in april 1980*, Archaeological Survey of India, Dehra Dun, 1980, pág. 5 y HAMMER, Ivo, "The Beethovenfries by Gustav Klimt (1902). Aspects of its conservation", *Traitement des supports. Travaux interdisciplinaires. Paris, 2, 3 et 4 novembre 1989*, A.R.A.A.F.U., Paris, 1989, pp. 127-135.

En 1951, Salvatore Liberti y Cesari Brandi plantearon los primeros soportes rígidos de tipo sandwich utilizando fibra de vidrio y poliéster. Sin embargo, no se publicó un tratado sistemático sobre estos nuevos soportes hasta 1984. Es entonces cuando Mora y Phillipot, en su libro *Conservación de pinturas murales*, los describieron como una estructura de sandwich con una armadura de madera. Las pieles del sandwich son laminados formados por una resina termoestable de tipo poliéster, reforzada con varias capas de tejido de tipo "mat" de fibra de vidrio E. El núcleo de la estructura sandwich es de aluminio, tipo "honeycomb" o celdilla de abeja.



**Figura II.59** Construcción de un soporte de sandwich con mat de fibra de vidrio (*Restauro in Piemonte*, 1971, pág. 13).

Este sistema aporta ventajas importantes frente a los anteriores: es un soporte inerte a los factores climáticos, a los agentes biológicos y se adapta al soporte original. Pero no puede decirse que responda a lo que se ha denominado más arriba "soporte ideal" ya que presenta, todavía, algunos inconvenientes que se describen a continuación.

Las pieles que forman la estructura sandwich son laminados cuyas propiedades mecánicas no son las adecuadas desde el punto de vista del restaurador, quien busca en el soporte la rigidez y resistencia suficientes para soportar la carga por unidad de superficie del conjunto, además de que sea indeformable en el tiempo.

El mat, usado frecuentemente para la elaboración de las pieles del sandwich, es un tejido formado por fibras cortas aleatoriamente distribuidas en el plano, y es precisamente esta constitución del refuerzo la causa de los fenómenos de "creep"<sup>221</sup>, o deformación bajo carga constante diferida en el tiempo, que exhiben los laminados a base de poliéster reforzado con "mat" de fibra de vidrio.

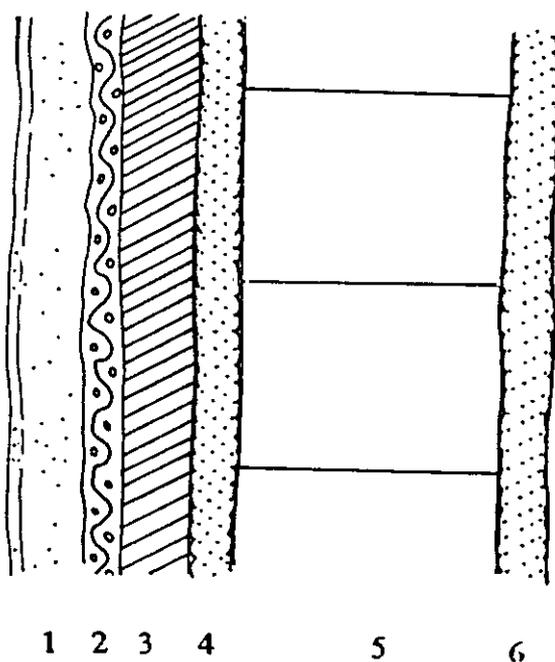
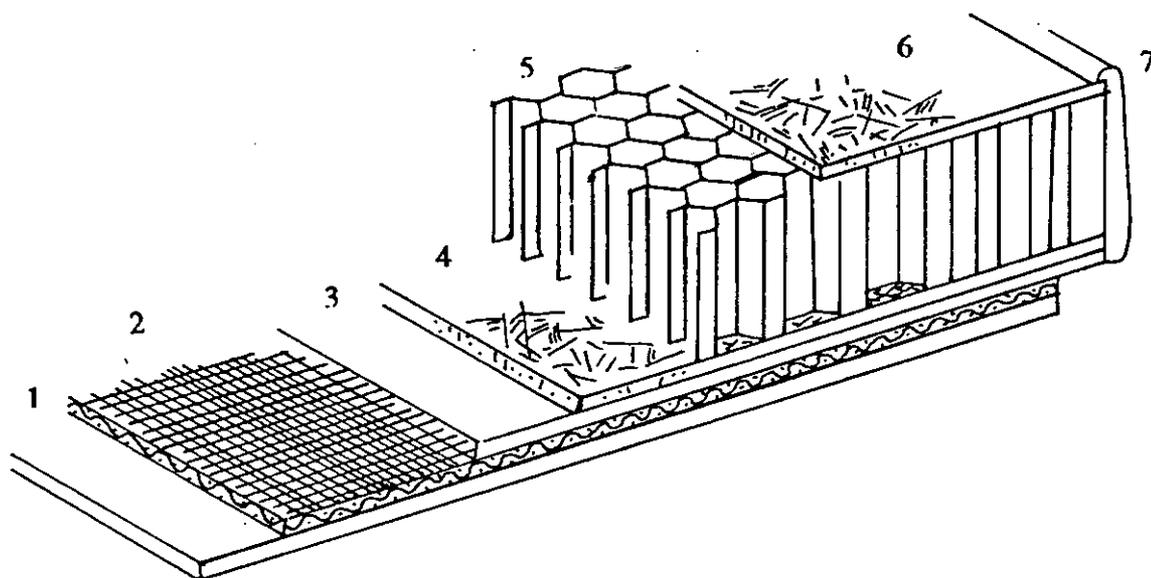
El aluminio utilizado en el soporte tiene la desventaja de poseer una gran conductividad térmica<sup>222</sup>.

---

<sup>221</sup> Mirar también: AA.VV., "Restauro e materiali compositi: un caso esemplare." *Revista Prefabbricazione*, nº 22, 1986, pág. 717-720 y SCICOLONE, Giovanna C., *Il restauro del dipinti contemporanea*, Nardini Editore, Firenze, 1993, pág 37.

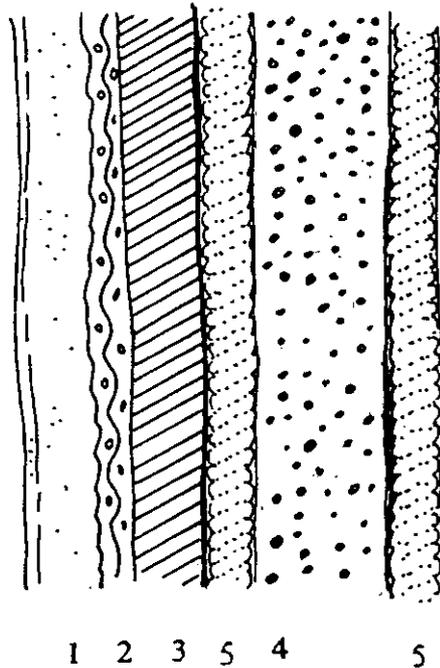
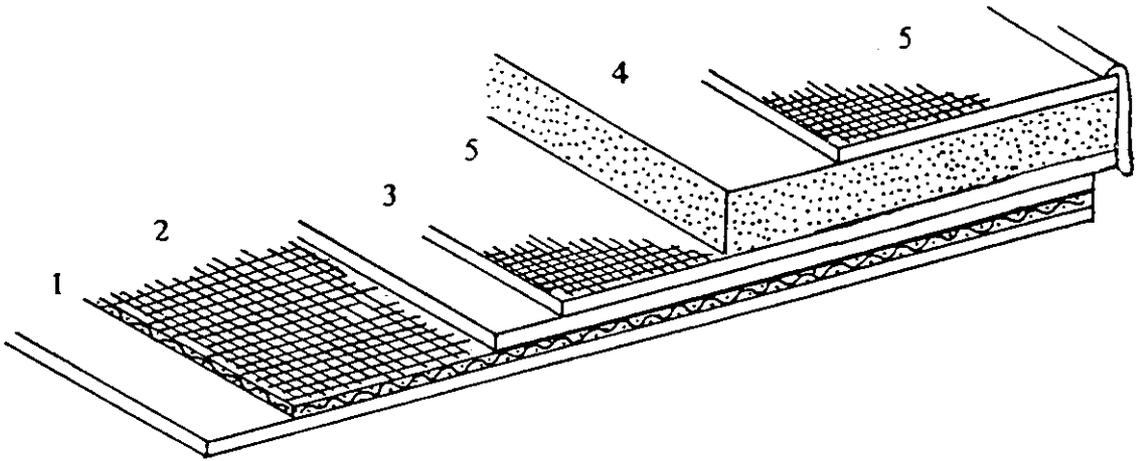
<sup>222</sup> Para más datos: POMERANTZ, Lovis, "Treatment and mounting of Ceres, a large mural painting on fabric by John Norton", *Journal of the American Institute of Conservation*, Vol. 24, nº 1, 1984, pp. 14-22.

Otro inconveniente de este tipo de soportes es que poseen un cierto grosor y, por último, el hecho de que sea una estructura tipo sandwich introduce un punto crítico añadido: las uniones de las pieles al núcleo, que de no trabajar en las condiciones adecuadas pueden presentar problemas de adhesión.



**Figura II.60** Soporte de sandwich con celdilla de abeja. 1.-Capa pictórica, 2.-Tejido de gasa, 3.-Capa de intervención, 4 y 6.-Fibra de vidrio (mat y resina), 5.-Celdilla de abeja, 7.-Armadura de madera.

En 1986 se propone en Italia un nuevo soporte, realizado, entre otros, por Sabino Giovanoni para las experiencias de la Capella Brancacci<sup>223</sup>, también de estructura sandwich y basado en laminados de tejidos de fibra de carbono de tipo continuo (en este



**Figura II.61** Soporte de sandwich con fibra de carbono. 1.-Capa pictórica, 2.-Tejido de gasa, 3.-Capa de intervención, 4.-Poliuretano, 5.-Fibra de carbono con matriz de resina epoxídica.

<sup>223</sup> Ver: AA.VV., "I materiali compositi nel restauro scientifico degli affreschi: il supporto delle sinopie di masaccio e masolino", *Quaderni del restauro*, n° 10, La Cappella Brancacci-La scienza per Masaccio, Masolino e Filippino Lippi, Olivetti, Milano, 1992 y AA.VV., "Restauro e materiali compositi: un caso esemplare", *Prefabbricazione*, n° 22, 1986, pag 717-720.

caso son dos telas de dicha fibra) con matriz de resina epoxy y un núcleo de poliuretano de 7 centímetros de grosor<sup>224</sup>.

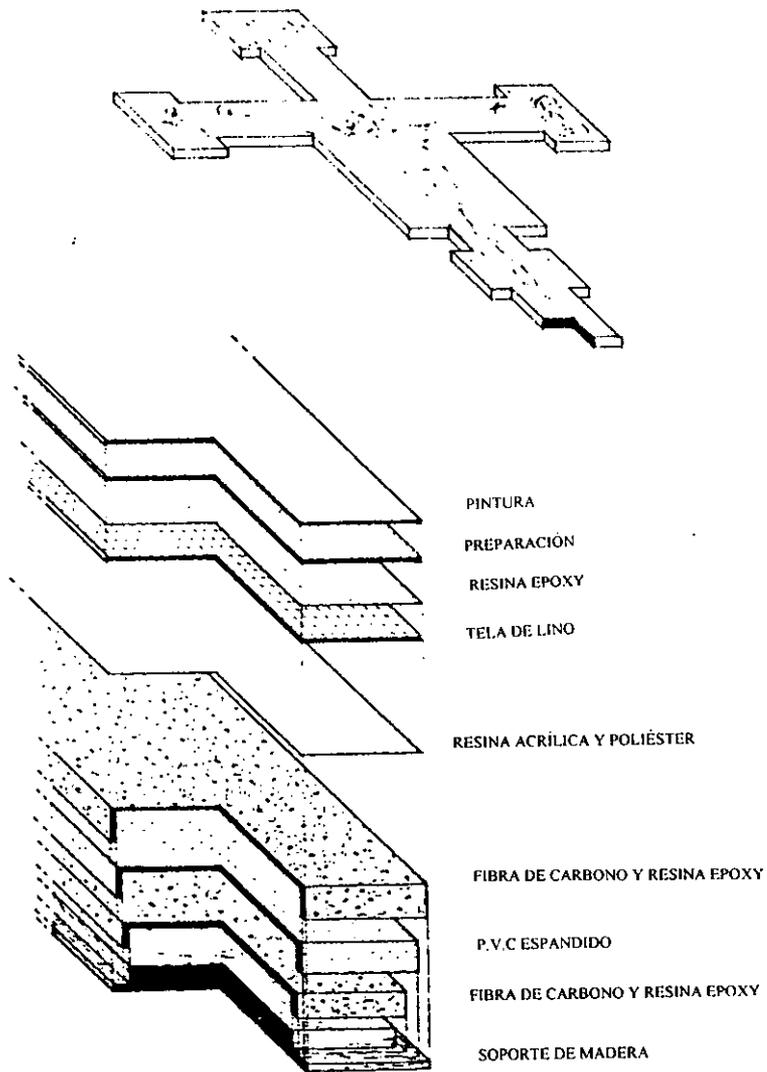
Este soporte aporta mayor ligereza, tiene estabilidad dimensional y es estable a la temperatura y a la humedad, presentando buenas propiedades mecánicas y resistencia al calor, junto con un buen aislamiento térmico. Es evidente que presenta mayor rigidez y ligereza que el propuesto por Mora y Phillipot y evita los problemas de "creep" anteriormente mencionados. Sin embargo, la espuma de poliuretano que se emplea como núcleo es un material celular muy sensible a la humedad -determinados poliuretanos curan reaccionando con agua- y presenta un coeficiente de expansión térmica elevado.

Estos mismos autores dieron el siguiente paso con la realización de un soporte similar pero cambiando el núcleo del sandwich por un PVC expandido. Su aplicación se produjo en la Cruz de Lippo di Benivieri, en Florencia, Museo de Santa Croce, Capella Canigiani Cerchi<sup>225</sup>.

---

<sup>224</sup> En el apartado II.5.5.- Relevantes especialistas en restauración de pintura mural con soportes basados en materiales compuestos. se refieren los resultados obtenidos durante la entrevista con los creadores de este soporte.

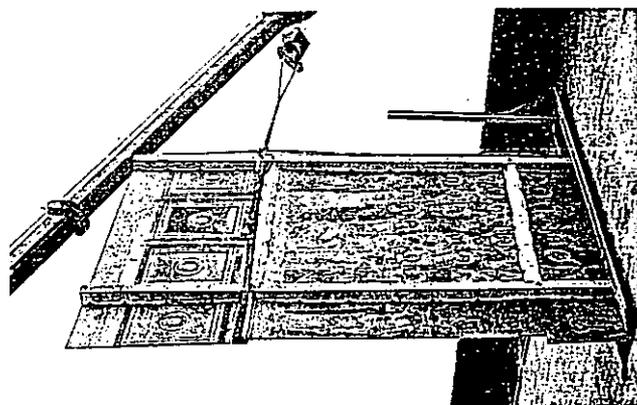
<sup>225</sup> Ver: AA.VV., *Capolavori & restauri*, Arte SpA, Firenze, 1986.



**Figura II.62** Esquema del soporte de la Croce dipinta de Lippo di Benivieni, donde se utiliza fibra de carbono y resina epoxy (*Capolavori & restauri*, 1986, pág. 467)

#### II.5.4.3.3.- Soportes basados en materiales compuestos de fibra de vidrio-resina.

Los soportes fabricados a base de materiales compuestos, tanto con resina de tipo poliéster como epoxy, son los más frecuentemente utilizados para pinturas que poseen curvaturas, como es el caso de las bóvedas, o irregularidades, para las cuales se precisa un mínimo de grosor y ligereza. Este fue el caso de "El Paraíso" de Nardo di Cione, en Sta. María Novella de Florencia y de la Croce de Taddeo Gaddi en el refettorio di Santa Croce<sup>226</sup>.

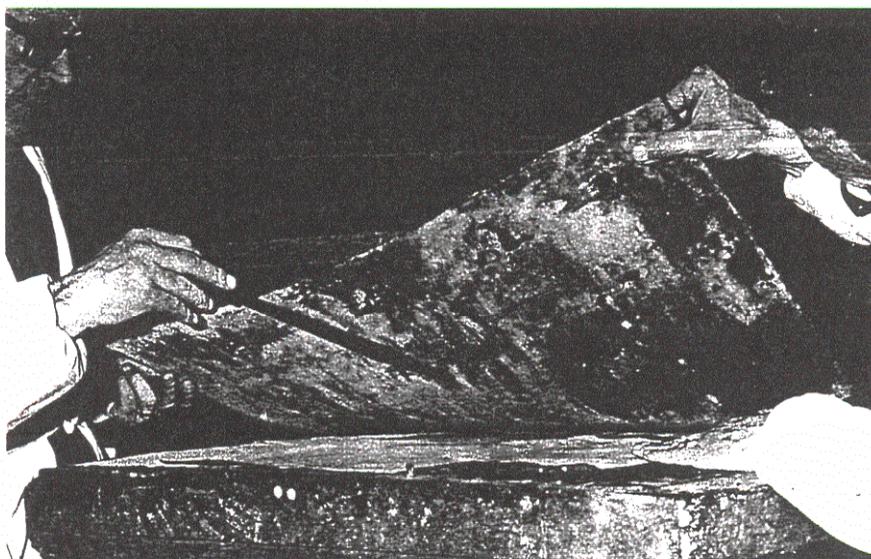


**Figura II.63** Sección de "El paraíso" de Nardo di Cione. Arrancado y transportado en un soporte rígido (Guido Botticelli, Centro Di, pág. 128).

<sup>226</sup> Posibles consultas: DANTI, Cristina, "Pitture murali", *Raffaello e altri. Il restauri dell'Opificio. Catalogo della mostra: Firenze, Orsanmichele 10 giugno - 30 settembre 1990*, Centro Di, Firenze, 1990, pp. 67-72, AA.VV., *Tecnica e restauro delle pitture murali*, Opificio delle pietre dure e laboratori di restauro, Firenze, 1980, FERNANDEZ, Guillermo, "Los soportes inertes en la pintura mural", *En torno a la pintura mural. Actas del segundo Curso Internacional de Restauración*, Centro de Estudios del Románico, Aguilar de Campoo, 1991, XARRIE I ROVIRA, Josep María, "Quelques problemes concernant les peintures deposees sur mur, ainsi que celler conserves in situ, en Catalunya", *La depose des peintures murales: actes du 4me. seminaire international d'art mural 22-24 avril 1992, Saint-Savin*, Centre International d'art mural, Saint Savin, France, pp. 39-42.

La fibra de vidrio es muy resistente pero puede producir deformaciones estructurales no tolerables en un soporte. Además, si se utiliza un mat podrán aparecer los inconvenientes anteriormente descritos, entre los que se encuentra el "creep"<sup>227</sup>.

También existen casos de arranque de pinturas sobre tabla utilizando este tipo de soporte como es el caso del Crucifijo de Cimabue, de Santa Croce<sup>228</sup>.

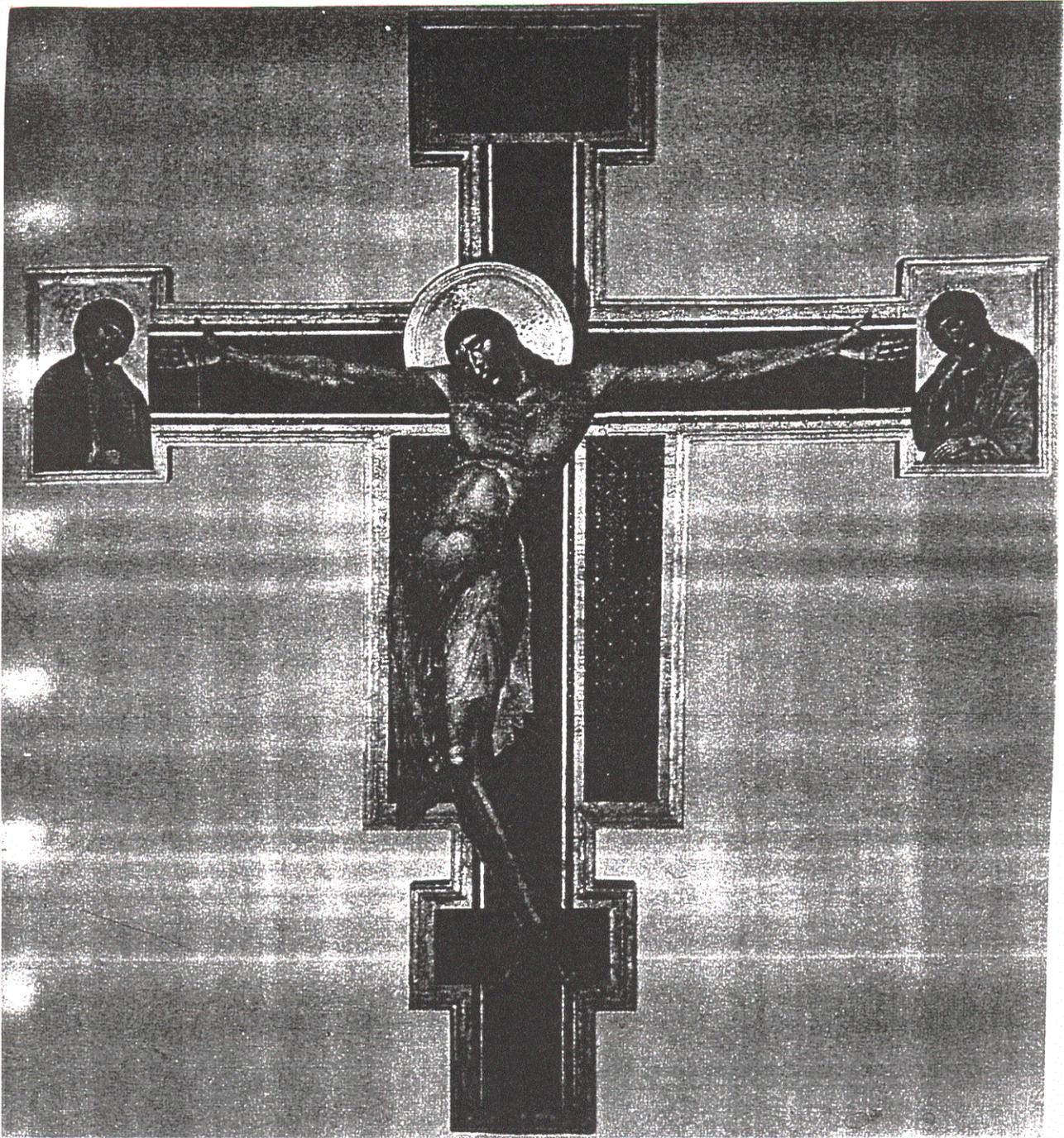


**Figura II.64** Restauración del Santo Cristo de Cimabue. Etapa preliminar de la separación de la pintura de su soporte de tabla (Umberto Baldini, Olivetti, pág. 94).

---

<sup>227</sup> Ver AAVV. Capella Brancacci, Olivetti, Milano, 1992, pág. 186-192.

<sup>228</sup> Consultar en: BALDINI, Umberto y CASSAZA, Ornella, *El Sant Crist de Cimabue*, Olivetti, Milano



**Figura II.65** El Santo Cristo de Cimabue antes de la inundación de 1966 (Umberto Baldini, Olivetti, pág. 81).

En la siguiente tabla aparecen algunos datos de los materiales más comúnmente usados para el arranque de pintura mural<sup>229</sup>, donde se observa que la fibra de vidrio presenta el valor más alto de módulo a compresión en comparación con la madera, el muro, el cemento Eternit y el aluminio. Junto a este último, presenta las mejores propiedades elásticas de estos materiales.

<b>TABLA II.4</b>			
<b>ALGUNAS PROPIEDADES DE MATERIALES USADOS PARA EL ARRANQUE DE PINTURA MURAL</b>			
<b>Material</b>	<b>Densidad (g / cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Módulo elástico (Kg/cm<sup>3</sup>x10<sup>3</sup>)</b>	<b>Módulo a compresión (Kg / cm<sup>2</sup>)</b>
<b>madera</b>	0,4-0,5	75	250
<b>muro</b>	1,1-1,9	-	80-150
<b>Eternit</b>	1,8-2,2	200	600-1000
<b>aluminio</b>	2,6-2,7	570-780	760
<b>fibra de vidrio</b>	2,4-2,8	727	1900

<sup>229</sup> Tomada de: Quaderni del Restauro, 10, *La cappella Brancacci*, Olivetti, Milano, 1992, pág. 186.

#### **II.5.4.3.4.- Soportes realizados con espumas sintéticas.**

Las espumas sintéticas se usaron en principio solamente como capa de intervención, aunque más tarde se utilizaron en combinación con otros materiales para la fabricación de soportes lisos o con volúmenes. En la figura II.59 aparece un ejemplo de una de estas espumas en combinación con un laminado de fibra de vidrio-resina.

Uno de los usos más extendidos de estas espumas ha sido como componentes de las estructuras tipo sandwich, en las que se utilizan como núcleo.

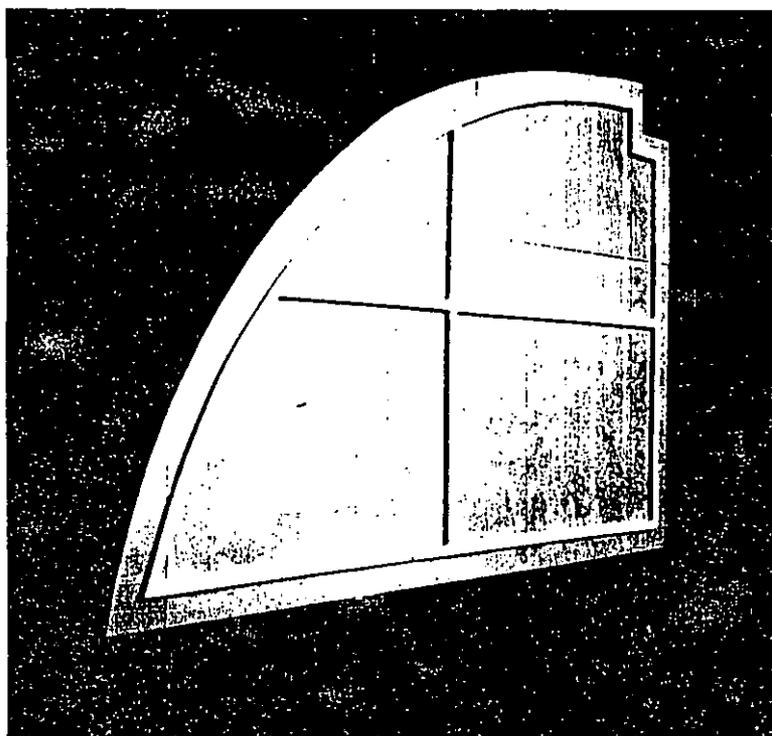
De todas las espumas sintéticas utilizadas para la realización de soportes, la que ha dado mejores resultados ha sido el llamado cloruro de polivinilo (PVC), que se ha usado también como capa de intervención. En ocasiones se ha utilizado calentado previamente para favorecer su adaptación a todo tipo de superficies.

Según se desprende de sus características, citadas en el apartado de las resinas termoplásticas (apartado II.3.3.1.4<sup>230</sup>, pág. II.57), el PVC aporta a este tipo de soportes una buena resistencia a los agentes de deterioro, aunque puede verse afectado por la acción de algún tipo de disolventes<sup>231</sup>.

---

<sup>230</sup> II.3.3.1.4 Policloruro de vinilo.

<sup>231</sup> Ver además:AAVV, *Restauri in Piamonti, 1968-1971*, Torino, 1971, Edizioni di Arte Fratelli Pozzo, Partes R 4 large mural, 1986.



**Figura II.66** Soporte de PVC con bastidor metálico, del fresco de la Capella Besorzi en San Mauricio. Monasterio Mayor de Milán (*Supporti curvilinei*, 1965, pág. 74).

Las espumas de poliuretano presentan una buena absorción de los golpes y se venden en una amplia gama que va desde sábanas a bloques rígidos y rollos. Como inconvenientes puede citarse que es sensible a los rayos ultravioletas, que hacen que se vuelva oscuro y frágil, y que el material flexible, debido a sus plastificantes, es susceptible de ser atacado por microorganismos<sup>232</sup>.

---

<sup>232</sup> Mirar; AA.VV., "Restoration and mounting of monumental painting and painted loess sculpture in the State Hermitage Museum", *ICOM committee for conservation 3th. triennial meeting*, Madrid, 1972, AA.VV., *Prototipo de soporte para una pintura mural al fresco*, KOZARZEWSKI, Martin y ZANKOWSKI, Ryszard, "Zwei Wandgemälde in der Marienkirche zu Danzig: Schichttrennung, Konservierung, Restaurierung und Neuanbringung", *Restaurio*, 94, n° 2, 1988, WOJTUNIAK-STRUZYNSKA, Janina, "The problem of the conservation of the mural paintings in the tomb of Queen Nefertari, western Thebes Egypt". *The tomb of Queen Nefertari: problems of conserving wall paintings*, Conservator's Information Centre, Warsaw, 1973.

El poliestireno expandido es muy ligero y barato pero tiene los inconvenientes de que es sensible a algunos disolventes y no puede ser expuesto a los agentes atmosféricos ni a los rayos de sol, ya que se degrada y se vuelve amarillento. Además, pierde su resistencia mecánica con la luz ultravioleta, su tiempo de vida está limitado a unos 12 años y es inflamable<sup>233</sup>.

Como ya se ha dicho, estas espumas se han utilizado a menudo para la elaboración de uno de los componentes que formaban parte de los soportes para restauración y que aseguraba la reversibilidad del material, la denominada capa de intervención, la cual permitía la eliminación del soporte con un mínimo de acciones. Díaz-Martos lo describe al explicar cómo la pintura mural arrancada es reforzada por la parte posterior con un soporte rígido "*... a base de masonita o panal de abeja y resina acrílica...*" y entre los dos soportes "*... deberá colocarse una plancha de corcho o de un material plástico espumoso para evitar que la superficie pintada se aplaste contra la tela y el soporte rígido y pierda su fisonomía característica. Como adhesivos el más recomendado es el de caseinato de calcio, aunque también se han ensayado con buenos resultados adhesivos de materias sintéticas, como emulsiones*"<sup>234</sup>.

Las materias sintéticas utilizadas pueden ser el poliestireno expandido o poliuretanos expandidos, materiales de gran ligereza y fácilmente reversibles. Sin

---

<sup>233</sup> Ver: Barbet, Alix, *La restauration des peintures de époque romaine*, Gallia, Vol 27, 1969, Bolletino del Istituto Centrale del Resturo, Year 1965, AA.VV., Consenza e conservazione. Alfa, Bilogna, 1981, Bone, L., Teotihuan, 1988.

<sup>234</sup> DÍAZ-MARTOS, Arturo, *Restauración y Conservación del arte pictórico*, Arte Restauo S.A., Madrid, 1975, pág. 51.

embargo, tienen como inconvenientes que pueden favorecer los robos ya que resultan demasiado fáciles de eliminar y su comportamiento ante el fuego no es el más adecuado. También se han utilizado para este fin el cloruro de polivinilo y otros materiales como los asbestos (el amianto principalmente) pero, como ya se ha dicho anteriormente, éstos tienen el gran inconveniente de su toxicidad. Los morteros han sido rechazados por su peso excesivo.

Los materiales citados han sido los más generalizados para su utilización como capa de intervención, existiendo multitud de variaciones y combinaciones de ellos, cuyo análisis sería demasiado extenso y alejaría la investigación de su tema primordial.

#### **II.5.5.- RELEVANTES ESPECIALISTAS EN RESTAURACIÓN DE PINTURA MURAL CON SOPORTES BASADOS EN MATERIALES COMPUESTOS.**

Como se ha visto, las experiencias con estos materiales han sido muy fructíferas, habiendo sido numerosas de ellas publicadas de forma bastante rigurosa. Sin embargo, hay que hacer hincapié en la escasez de descripciones técnicas de dichas experiencias.

Así, ya que una intención de la presente Tesis Doctoral era realizar una aportación inédita sobre los tratados anteriormente disponibles en el tema de arranque de pintura mural, se trató de

hacer una recopilación de algunas de las últimas experiencias en este campo y aclarar algunas dudas motivadas por la escasez de datos recientes.

Por este motivo, se planteó la necesidad de contactar directamente con las personas que se encuentran trabajando en estos temas en la actualidad y cuyos criterios y experiencias en este campo están considerados como referencia obligada en la investigación sobre este tipo de soportes y su utilización práctica. Se daba la circunstancia, además, de que las últimas experiencias realizadas por estos especialistas no se encontraban publicadas en la mayoría de los casos o solamente se habían recogido en informes que no tuvieron divulgación.

Así, se realizaron una serie de entrevistas localizadas en las dos ciudades italianas donde residen los principales centros en que se trabaja en la elaboración de estos soportes, Roma y Florencia.

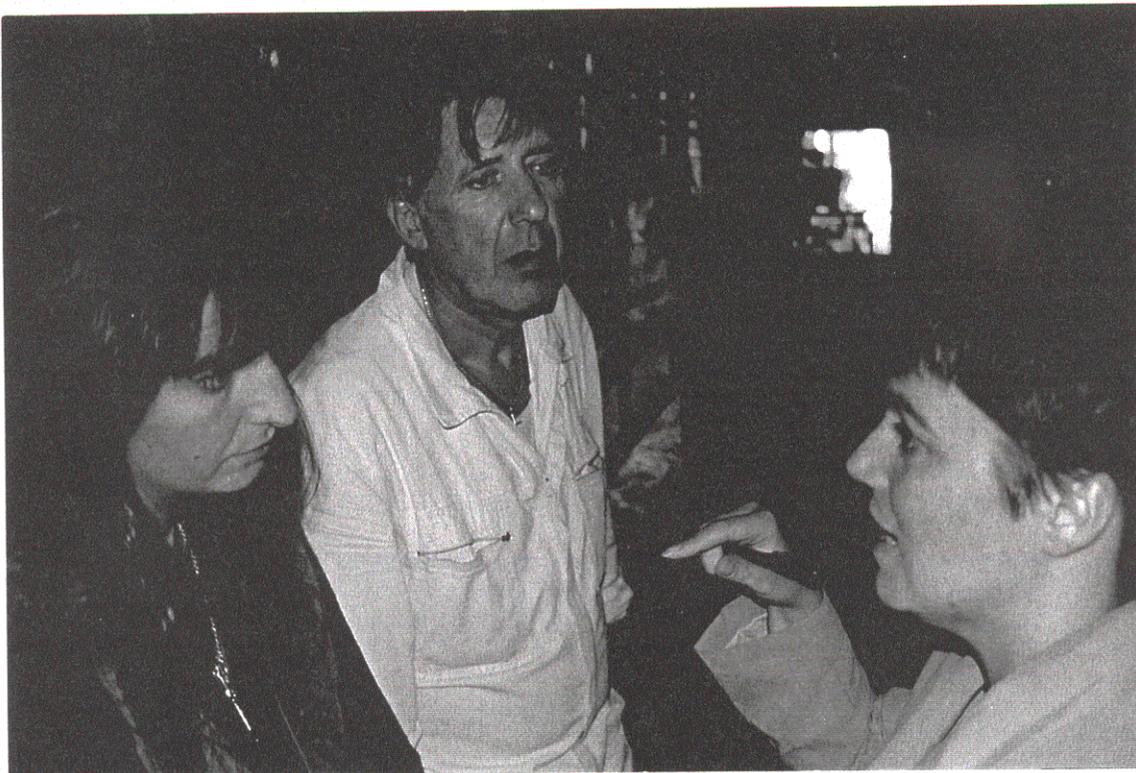
Las entrevistas realizadas pusieron de manifiesto los modos de actuación de distintos equipos de trabajo, obteniéndose una valiosa información destinada a aclarar y ampliar conceptos que son básicos en el trabajo con este tipo de materiales. De igual forma, sirvieron para conocer los más recientes trabajos de investigación con los nuevos materiales y técnicas.<sup>235</sup>

---

<sup>235</sup> Entrevistas mantenidas durante la Beca de estancias breves en el extranjero en el I.C.R.O.A. en Roma. Septiembre-Octubre de 1995. Profesor Giorgio Torraca, Profesores Laura y Paolo Mora, Profesor Baldini, Profesor Sabino Giovanoni y Profesor W. Schmid.

a) **PROFESOR S. GIOVANONI**

La Universidad Internacional del Arte es exponente del espíritu moderno de investigación en Florencia. Algunos de los miembros del equipo docente de esta Universidad han sido los únicos que han realizado experiencias con el material de fibra de carbono. Una entrevista con el profesor Giovanoni<sup>236</sup>, miembro del equipo que realizó dichas experiencias, permitió a quien suscribe conocer más profundamente los trabajos realizados por ellos con materiales sintéticos. De estos trabajos se resumen a continuación los puntos principales de actuación.



**Figura II.67** Momento de la conversación mantenida con el Profesor Sabino Giovanoni.

<sup>236</sup> Doctor Sabino Giovanoni. Profesor de la Università Internazionale dell'Arte de Florencia, Italia. Sector de Pintura Mural. Villa il Veentaglio. Via delle Forbbici, 24/26 50133 Firenze.

### **a.1) Experiencias realizadas con fibra de vidrio.**

En sus últimas experiencias con este material, el equipo del profesor Giovanoni ha empleado un sandwich rígido con caras formadas por laminados de fibra de vidrio y utilizando como núcleo una espuma de polivinilcloruro (PVC). Esta espuma se encuentra en el mercado en diferentes colores y espesores.

La espuma de PVC puede presentarse, además, en diferentes formatos, ya sea como un material continuo o troceado. Su presentación en trozos permite su uso como núcleo de sandwich destinados a superficies curvas, debido a que su estructura le permite adaptarse con relativa facilidad a cualquier forma.

El sandwich se encuentra recubierto en una de sus caras por fibra de vidrio y en la otra la superficie del material ha sido dispuesto de tal manera que posee una serie de cortes, formando pequeñas superficies cuadradas, que facilitan su adaptación a las superficies con volúmenes poco acusados.

Al adaptar el soporte a una superficie curva, se abren los cortes de la cara exterior de espuma de PVC, generando unos espacios que se rellenan con resina. Además, para facilitar el agarre, se efectúan en la espuma unas perforaciones que se rellenan igualmente con la resina que va a formar parte de los laminados del sandwich. Esto va a conseguir también una mejor adhesión entre las diferentes capas de éste.

El polivinilcloruro es un material celular que puede encontrarse con estructuras más o menos abiertas. El material tiene, en cualquier caso, unas características similares, pero una estructura celular más abierta provoca que una mayor cantidad de resina penetre con más facilidad en la superficie, haciendo que aumente la adhesión entre las diferentes partes del sandwich y mejorando la aportación de la resina a sus propiedades. De igual forma, una menor apertura de las células produce una menor presencia de resina en la estructura.

El tejido de fibra de vidrio utilizado no debe ser nunca unidireccional ya que si así fuera podrían crearse tensiones, encogerse y producir desplazamientos. En este soporte se utiliza una matriz que los miembros de este equipo definen como de resina autoextinguible o antiinflamable<sup>237</sup> con tejido y mat de fibra de vidrio.

La razón de aplicar juntos un tejido y un mat de fibra de vidrio se encuentra en la base teórica que contemplan los especialistas en materiales compuestos, que recomienda la utilización de un velo de mat muy fino para mejorar la adhesión del laminado con el núcleo del sandwich. Cuando se usan las dos presentaciones se suelen usar dos capas de mat por una de tejido.

El poliéster utilizado por ellos lleva una protección para la radiación ultravioleta y, en caso de necesitar aplicar una resina en superficies verticales, utilizan una resina tixotrópica. Ellos son partidarios de adquirir directamente la resina preparada por el fabricante en lugar de crear una resina tixotrópica por ellos mismos añadiendo un gel de sílice a una resina con características

---

<sup>237</sup> Ver: BALDINI, Umberto y CASAZZA, Ornella, *El Sant Crist de Cimabue*, Olivetti, Italia, donde aparece una capa de resina poliéster, de tipo Gabraster, antiinflamable. **Ver también el apartado II.5.4.3.2.- Soportes basados en materiales compuestos con estructura tipo sandwich.** de esta Tesis, pág. 210.

comunes. El interés de esta práctica reside en que el gel de sílice, añadido a la resina, afecta negativamente a algunas de las propiedades de ésta.

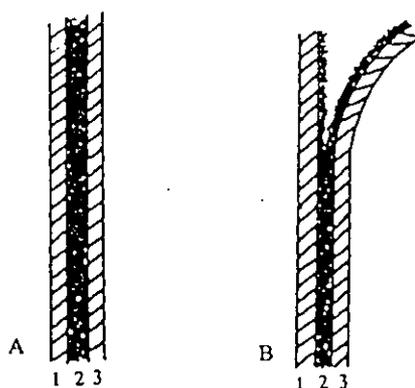
La empresa Montedison fabrica especialmente para ellos soportes planos con estas características pero, en las ocasiones en las que las obras tienen superficies curvas o con volúmenes, deben elaborarlos ellos mismos mediante un procedimiento manual.

Así, en los casos de superficies con volumen, el trabajo comienza con la aplicación en las superficies de trabajo de dos desmoldeantes para conseguir mayor seguridad en un proceso que resulta bastante costoso. Los desmoldeantes utilizados son un alcohol polivinílico y una cera normal o microcristalina.

Se impregna con resina poliéster o epoxy la fibra de vidrio, dependiendo de las propiedades que se necesiten, y después se pega la espuma de PVC, también mojada con resina. Se hacen unos agujeros en la parte abierta de la espuma y se llenan de resina los espacios que se han generado al adaptar el PVC a la superficie con volumen, con el fin de producir una mejor adherencia. Finalmente se moja de nuevo la superficie de la espuma ya rellena y se pone fibra impregnada encima para conformar el laminado que finaliza la estructura del sandwich.

Si en esta fase existen desniveles en la obra original, el soporte se debe realizar con la espuma dispuesta en distintas capas adheridas entre ellas formando escalones y con los correspondientes agujeros.

En Italia se han venido utilizando diferentes tipos de capa de intervención. En Florencia la más extendida es un papel de fractura predeterminada llamada "carta de frattura predeterminata", que posee tres partes, dos de celulosa natural y una tercera central sintética a base de fibra sintética "polifenólica". La separación del original de esta capa de intervención se efectúa tirando de las dos capas de celulosa. Este material se puede adquirir en rollos, listo para su utilización por el restaurador.



**Figura II.68** Esquema del papel de fractura predeterminada. 1 y 3.-Estrato externo sin fibra sintética, 2.-Estrato con fibra sintética (Sabino Giovanoni, "Quelques experiences...", pág. 75).

Esta capa de intervención puede presentar problemas al encoger con facilidad y por esta razón deben tenerse en cuenta una serie de recomendaciones a la hora de su construcción. No debe disponerse en tiras continuas a lo largo de la superficie ya que el peso de la obra haría que se deformara. Además, hay que colocar el material en piezas, tratando siempre de que no coincidan las juntas como si se tratara de aparejar ladrillos. La medida máxima de las piezas no debe exceder de  $1 \times 0,5 \text{ m}^2$ .

Esta disposición de los fragmentos es necesaria por varias razones:

- durante la limpieza de la pintura mural se utiliza agua y esta distribución disminuye el riesgo de encogimiento por absorción de humedad,
- evita los movimientos superficiales,
- las zonas donde se encuentran las uniones producen una disminución de las tensiones,
- esta estructura da la posibilidad de controlar la separación de esta capa y corregir sobre la marcha los problemas, ya que se consigue que no se elimine todo en una sola pieza.

Las adhesiones deben hacerse con un tipo diferente de cola en cada lado de la capa de intervención para posibilitar la desunión rápida. Suelen utilizarse una cola termoestable y otra termoplástica. Una cola reversible muy utilizada es el primal y se puede emplear en distintas concentraciones. Las composiciones utilizadas por el profesor Giovanoni<sup>238</sup> son:

- primal puro,
- un 70% de primal y un 30% de agua destilada,
- un 50% de primal y un 50% de agua destilada.

---

<sup>238</sup> Fórmula proporcionada personalmente por el profesor Giovanoni durante la entrevista mantenida con él en Florencia.

Antes de la adhesión al original se añade un inerte o material de carga, que puede ser puro o una mezcla de diferentes materiales como arena lavada de mayor o menor grosor, carbonato de bario en polvo y carbonato de calcio en polvo o en grano. Se suele mezclar el polvo y el grano para evitar el craquelado.

Otros estratos de intervención son el fabricado con aluminato de calcio o de bario, el del Instituto Centrale del Restauro o un estrato sutil de espuma de polivinilcloruro (no de poliestireno ya que éste no es estable en el tiempo).

#### **a.2) Experiencias con fibra de carbono.**

Los primeros soportes con resina poliéster se realizaron en 1962-63 tras las primeras experimentaciones realizadas en Florencia por el restaurador Dino Dini, que se llevaron a cabo con la colaboración de Lorenzo Cinelli, experto en materiales compuestos.<sup>239</sup>

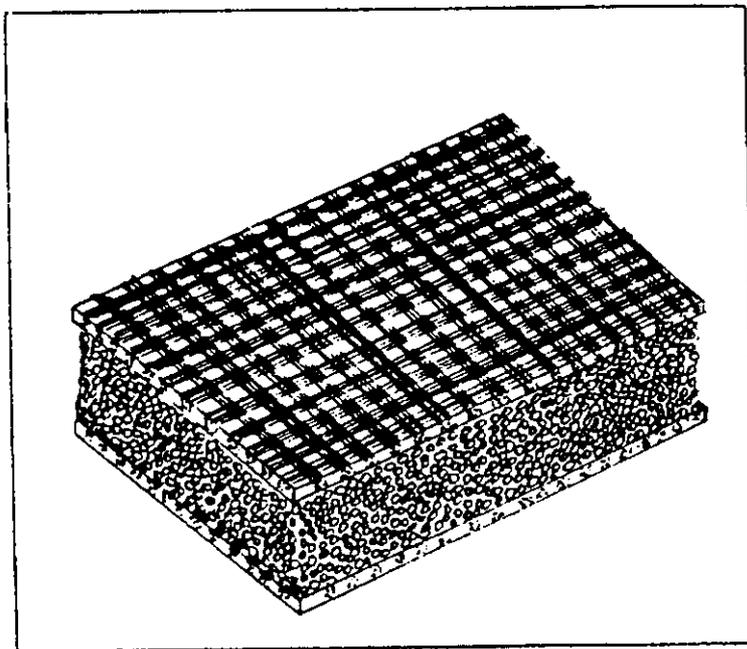
Cuando se descubrieron los inconvenientes que posee la fibra de vidrio utilizada para este fin<sup>240</sup>, se trató de encontrar un material compuesto avanzado que pudiera superar las características de éste. Un material que podía dar solución a esta cuestión era la fibra de carbono.

---

<sup>239</sup> Ver: Botticelli, Guido, *Metodologia di restauro delle pitture murali*, Centro Di, Florencia.

<sup>240</sup> Revisar Apartado II.5.4.- Antecedentes de soportes murales para restauraciones que necesitaban un levantamiento de la pintura mural.

Así, el primer soporte de fibra de carbono fue realizado por Giovanoni y descrito en la revista *Prefabbricazione* en 1986<sup>241</sup>.



8, 9. Schema strutturale e aspetto del nuovo composito a uretanica rigida.

**Figura II.69** Esquema del material compuesto avanzado de fibra de carbono-epoxy con espuma de poliuretano rígida (*La Cappella Brancacci*, 1992, pág. 190).

La fibra de carbono es un material de excelentes propiedades<sup>242</sup> que proviene de campos como la aeronáutica, la Fórmula 1 o la motonáutica. Con esta fibra puede conseguirse un sandwich de mejores propiedades que los realizados con fibra de vidrio.

---

<sup>241</sup> Revisar apartado II.5.4.3.2.-Soportes basados en materiales compuestos con estructura tipo sandwich, pág. II.200.

<sup>242</sup> Consultar Apartados II.3.2.2.- Fibras de carbono y II.3.2.3.- Comparación entre las fibras.

El sandwich se realiza normalmente con grosores que oscilan entre 1 y 5 cm. Este grosor está condicionado principalmente por la necesidad de igualar con el nuevo soporte el grueso original de la parte arrancada del muro, que depende a su vez de la profundidad del arranque y de la cantidad de material que se haya pulido previamente en la parte posterior.

La garantía de resistencia permanece inalterable con la variación de grosor debido a que sus características son suficientes en cualquier caso para la fabricación de soportes para pintura mural, que no requiere unas prestaciones tan altas como las aplicaciones ingenieriles de estos soportes.

La adhesión de las capas del sandwich se realiza aplicando vacío y con una temperatura de polimerización que depende de la resina y puede variar entre 25 y 400° C. No se debe utilizar para este tipo de soportes el tejido unidireccional porque se producen separaciones entre las fibras.

Hay que tener en cuenta que, en las ocasiones en que se tiene un límite reducido para el grosor de un sandwich e incluso se requiere un soporte lo más fino posible, puede obtenerse la rigidez precisada aumentando el número de capas del laminado de fibra de carbono y disminuyendo el grosor del sandwich.

Los sandwich de fibra de carbono se han realizado en una fábrica bajo su supervisión, presenciando él todas las fases del proceso y dirigiéndolo, pero no lo ha realizado por sí mismo debido a la gran toxicidad de la resina epoxy.<sup>243</sup>

El sandwich se realiza con una resina epoxy líquida, es decir, ésta se aplica por vía húmeda sobre el tejido antes de hacer el vacío. Además, el proceso se desarrolla en todo momento a bajas temperaturas<sup>244</sup> y no necesita la utilización de una resina de polimerización a altas temperaturas. Esto es debido a que no se requieren unas prestaciones muy elevadas y las propiedades obtenidas mediante este proceso son suficientes.

En la operación de adhesión del soporte a la obra original es muy difícil saber si el adhesivo se ha distribuido homogéneamente. Por ello siempre se realiza el proceso en vacío ya que así se elimina la posibilidad de formación de burbujas y se garantiza una homogénea distribución del adhesivo. El vacío "in situ" se hace aplicando a la bolsa de vacío un aspirador al que se ha hecho un agujero en el cuello para que no se estropee cuando el aire ha sido extraído por completo.

Entre el original y el nuevo soporte se sitúa la capa de intervención, realizando a cada uno de sus lados adhesiones que no sean compatibles. Para ello se utiliza en el lado del sandwich un adhesivo a base de resina poliéster o epoxy, que necesita un diluyente muy específico, y en el lado del original un acetato polivinílico en solución acuosa (un vinacril).

---

<sup>243</sup> En este punto debe afirmarse que, si bien es cierto que la resina epoxy posee una toxicidad elevada, ésta es aún mayor en las resinas de poliéster más utilizadas. (Ver toxicidad Apartado II.3.9.- Higiene y Seguridad en la manipulación de los materiales)

<sup>244</sup> No especificadas por el profesor Giovanoni durante la entrevista.

La unión en el lado del sandwich se favorece previamente creando en el nuevo soporte una superficie rugosa de contacto para la resina termoestable. Ésta rugosidad se obtiene sobre todo utilizando acetona, aunque puede conseguirse igualmente mediante un lijado o con chorro de arena.

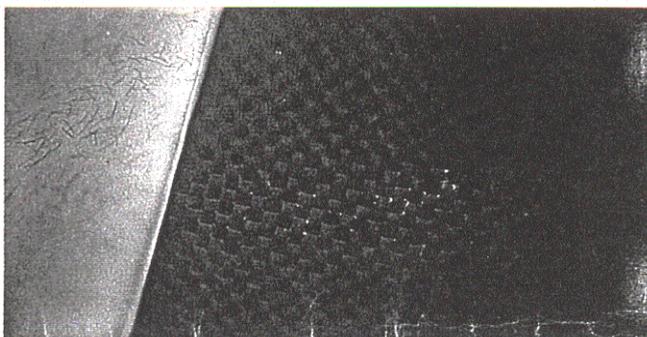
El sandwich de fibra de carbono se realiza poniendo en la superficie del molde los dos desmoldeantes antes mencionados y apilando las distintas capas que van a formar el soporte. Éstas son el tejido de fibra de carbono humedecido con resina que forma la primera lámina del sandwich, los diferentes estratos de la espuma de PVC siempre impregnados antes de ponerlos en el soporte, la siguiente lamina de fibra-resina, un tejido sangrador, un tejido de absorción (en este caso utilizan un tejido de lino) y un plástico.

Los soportes tipo sandwich que ellos realizan en fibra de carbono tienen un grosor de entre 2 y 3 cm. y suelen estar formados por tres capas de fibra de carbono y dos de espuma (de PVC) alternadas.

La mezcla de la resina y el endurecedor se hace al principio con el peso exacto de cada componente y, para que no polimerice antes de tiempo, se mete la resina epoxy ya catalizada en un recipiente con agua fría e incluso con hielo. Esto no ocurre con las resinas poliéster ya que, mediante la adición de diferentes cantidades de catalizador y activador y teniendo en cuenta la temperatura ambiental, puede lograrse una polimerización controlada.

En los murales que son muy grandes se prepara otro panel compuesto para la pared, al cual se van a sujetar el nuevo soporte y el original. En los murales grandes se une un soporte a otro mediante un bastidor o atornillándolos entre sí.

Según el profesor Baldini<sup>245</sup>, miembro del equipo de realización de dichas restauraciones, el soporte creado por ellos que consiste en un sandwich con fibra de carbono no ha presentado por el momento inconvenientes y sigue el proceso previsto de evolución (ver figura II.70).



**Figura II.70** Aspecto externo del soporte de fibra de carbono, durante la restauración de la Capilla Brancacci (*Restauro e materiali compositi: un caso esemplare*, 1986, pág. 720).

---

<sup>245</sup> Doctor Umberto Baldini. Director de la Università Internazionale dell'Arte de Florencia, Italia. Villa il Ventaglio. Via delle Forbbici, 24/26 50133 Firenze.

### **a.3) Experiencias con soportes flexibles.**

En el centro ubicado en Florencia se intenta, en la medida de lo posible, evitar tener que realizar secciones del conjunto en obras de grandes dimensiones. Se realizan, así, arranques completos de piezas que cubren grandes superficies (en caso de tener que arrancarlas), utilizando para ello soportes flexibles con laminados de resina poliéster armada con fibra de vidrio. El grosor de los soportes realizados para estas dimensiones varía entre 5 y 10 mm.<sup>246</sup>

Además de emplearse para estos grandes arranques, los soportes flexibles se han utilizado también para otros realizados en stappo. En este caso son láminas de mat de fibra de vidrio y poliéster que se pueden enrollar. Debido a que la capa arrancada del muro es muy fina, la superficie pictórica puede admitir los ligeros movimientos provocados por la utilización de un soporte flexible. Si por el contrario la capa arrancada estuviera conformada por un mortero grueso, estos mismos movimientos podrían provocar en la obra graves daños en forma de craquelados o saltados.

Es, pues, en los arranques muy finos en los que pueden llevarse a cabo este tipo de actuaciones..En muchos casos son arranques de pintura que tienen un tamaño demasiado grande para caber por la puerta de salida y se hace necesario realizar unos soportes móviles y flexibles que se puedan enrollar.

---

<sup>246</sup> Ver notas bibliográficas sobre “El Paraíso” de Nardo di Cione en Florencia en Sta. María Novella , en la nota 202 de éste capítulo, pág. II.203.

Este tipo de soporte se realizó en una ocasión solamente como soporte flexible, con una resina y mat, y en otra ocasión con una capa de intervención.

Algunas de las características de los soportes utilizados por el equipo de restauración de Florencia pueden apreciarse en los valores de la siguiente tabla, donde aparecen algunas de las propiedades de las fibras de refuerzo usadas en los soportes para arranque de muro<sup>247</sup>.

<b>PROPIEDADES DE LOS SOPORTES DE FIBRA DE VIDRIO Y FIBRA DE CARBONO</b>			
<b>Propiedades</b>	<b>Unidades de medida</b>	<b>Fibra de vidrio</b>	<b>Fibra de carbono</b>
<b>Tenacidad</b>	Kg/mm <sup>2</sup>	210	280
<b>Módulo elástico</b>	Kg/mm <sup>2</sup>	7000	24400
<b>Alargamiento de rotura</b>	%	3,2	1,2
<b>Recuperacion elástica después 1% de deformación</b>	%	99,8	99,8
<b>Deformación después de 24 horas con 14 Kg/mm<sup>2</sup></b>	%	0,3	0
<b>Densidad</b>	g/mm <sup>3</sup>	2,56	1,7-2,0

<sup>247</sup> Tomada de: Quaderni del Restauro, 10, *La cappella Brancacci*, Olivetti, Milano, 1992, pág. 186.



**Figura II.71** Profesor Giovanoni durante una operación de stappo. Salone del Cinquecento, Palazzo Vecchio, Florencia (*Técnica e restauro...*, 1980, pág. 84).

**b) PROFESOR W. SCHMID.**

El centro principal de la actividad en restauración en la ciudad de Roma es el ICCROM, el cual posee una gran divulgación de sus trabajos e investigaciones a nivel internacional. En relación con este centro se han recogido las experiencias realizadas por el profesor W. Schmid<sup>248</sup>, del Departamento de Pintura Mural.

Este profesor coincide con Giovanoni, Baldini o Paolo y Laura Mora en que la idea de conservación del original prima ante todo en los trabajos más modernos. Los stappos son actualmente irrealizables ya que siempre se puede encontrar una solución paralela para evitar una actuación tan drástica. Sin embargo, esta intervención puede realizarse en murales que han sido arrancados en el pasado y en los que se utilizaron materiales que no eran los más idóneos para cumplir estas funciones. Esto era debido a la precariedad de los métodos y medios disponibles en el momento del arranque, así como a algunas actuaciones que el paso del tiempo ha revelado como erróneas. En la actualidad se están cambiando los soportes que no eran apropiados por otros nuevos basados en estructuras de sandwich.

---

<sup>248</sup> Werner Schmid. Profesor del Departamento de Mural del ICCROM. Instituto Centrale del Restauro, Roma, Italia. Vía de San Michele nº 13. 00153 Roma.

En el ICCROM se utilizan preferentemente soportes tipo sandwich cuyas caras y núcleo están formados íntegramente por aluminio y otros formados por caras externas de laminados de fibra de vidrio-resina y con el mismo núcleo de celdilla de abeja de aluminio. Si se necesitan formas curvas se hace necesario fabricar el soporte por ellos mismos con fibra de vidrio y epoxy. Las espumas que utilizan son idénticas a las de polivinilcloruro usadas por el profesor Giovanoni. Para realizar la función de capa de intervención usan el corcho, encolado con resinas epoxídicas al nuevo soporte y con acetato de polivinilo a la pintura, el mortero de cal y la bermiculita.

En su opinión, no es necesario utilizar fibras de carbono para esta finalidad ya que las prestaciones que se necesitan pueden obtenerse igualmente con fibra de vidrio y ésta es más barata que la primera reuniendo las propiedades suficientes.

c) **PAOLO MORA Y LAURA MORA.**

Paolo y Laura Mora<sup>249</sup> son considerados hoy en día como primeras autoridades en materia de restauración mural y fueron los pioneros en la realización de restauración de pintura mural con soportes basados en materiales sintéticos. Fueron ellos quienes crearon las pautas de actuación para la utilización de estos materiales en el campo de la restauración, quedando reflejadas en su libro Mora, Paolo y Phillipot, Paul, *Conservation of Wall Paintings*, Butterwoths, ICCROM, 1984. Es éste un tratado fundamental a la hora de restaurar cualquier pintura mural.

En su opinión, en la elección del sandwich se utilizan los mejores materiales posibles con el presupuesto de que se dispone y por ello, dependiendo del dinero que tuvieran y el lugar donde se encontraran, usarían uno u otro sandwich. Conocen algunas de las realizaciones en que se ha utilizado el soporte de fibra de carbono y afirman que les gustan sus características aunque, según su opinión, resulta caro para este fin.

Un sandwich fabricado con otras fibras distintas de la de vidrio o con aluminio suponía un beneficio en las propiedades del soporte. Pero no siempre se cumplían las mejores condiciones y había que contar con el presupuesto disponible y con la posibilidad o no de conseguirlo en el

---

<sup>249</sup> Paolo y Laura Mora. Fueron Jefes de Conservación en el Instituto Centrale del Restauro (ICCROM), Roma, Italia. Via de San Michele nº 13. 00153 - Roma.

lugar donde se encontraban ya que algunos países donde trabajaron tenían muy pocos recursos y los materiales técnicamente avanzados eran muy difíciles de encontrar. Además, en muchas ocasiones no contaban con la posibilidad de realizar el tratamiento adecuado de los materiales, ni de los operarios necesarios para ello.

Pero, su gran vocación docente les animó a plantear estos soportes a sus alumnos, destacando de igual forma la importancia de la capa de intervención como parte fundamental en un arranque. Trataron en sus clases la realización de todo tipo de soporte con las diferentes fibras y materiales disponibles y entre las capas de intervención recomendaban algunas como el corcho, cal con bermiculita, mica expandida, piedra pómez (un mortero preparado para esta finalidad), el poliestireno no inflamable y el polivinilcloruro (planteado sobre todo de una forma didáctica).<sup>250</sup>

Un punto que hay que tener en cuenta en todo momento es que todo arranque es una alteración grave e irreversible por el daño que ejerce a la obra y por la descontextualización de ésta respecto a su lugar de emplazamiento original en casi todos los casos. Por lo tanto, tal actuación es solo justificable en caso de que el edificio no se pueda conservar por causas graves como derribos o terremotos. Cuando una obra ha sido ya arrancada y el proceso se ha realizado de una forma inadecuada hay que pasarla a un soporte inerte para que no se deteriore más. Esto es posible con mayores garantías en la actualidad utilizando soportes que anteriormente no estaban disponibles.

---

<sup>250</sup> Estos materiales pueden verse en parte en Torraca, Giorgio, *Weathering test on materials used in the conservation of mural painting*, ICOM, Amsterdam, 1969.

Ellos solo hicieron un arranque de muro en un edificio que se iba a demoler y en un caso en que había ocurrido un terremoto. Actualmente se trata de conservar igualmente, y siempre que sea posible, el edificio en que se encuentra la obra. En estos casos utilizaron un sandwich con las caras formadas por laminados de mat de fibra de vidrio y resina poliéster y núcleo de honeycomb con una capa de intervención de poliestireno expandido.

En sus primeros soportes utilizaban el poliestireno expandido y hacían perforaciones en él, rellenándolo de resina de forma que al deteriorarse la espuma y consumirse quedaban en el soporte muchos hilos de resina que formaban una estructura como celdillas de abeja. Actualmente esta espuma está descartada por el gran deterioro que sufre.

En este tipo de soporte trataron de proteger el núcleo para evitar que fuera atacado por condiciones ambientales desfavorables y para ello lo sellaban con un bastidor de aluminio.

Respecto a la forma de los murales, utilizan soportes fabricados industrialmente cuando estos eran de forma plana y, dependiendo del presupuesto, utilizaban un material u otro. Pero cuando el mural tenía volúmenes y formas curvas lo mejor era realizar los soportes a mano por el propio restaurador, utilizando un núcleo de fibras tejidas en forma de celdillas.

Ellos planteaban como posibilidad la utilización de un material de algodón fabricado de forma tal que al ser estirado crea una estructura de celdillas<sup>251</sup>. La fabricación de este material es similar a la de cualquier celdilla de abeja, ya sea de cartón o de aluminio que, como en este caso,

---

<sup>251</sup> Este material figuraba ya en el libro: TORRACA, *ibidem*.

puede permanecer encogido hasta su uso. En ese momento el material es impregnado y embebido totalmente en resina epoxy. Este material puede utilizarse en sustitución de los núcleos de celdillas clásicos cuando se disponga de un presupuesto limitado y en superficies con volumen.

Este material, al ser seco, se adapta mejor que el cartón impregnado en resina o la celdilla de abeja de acero inoxidable, que son más rígidos. Una vez adaptado a la superficie, puede ser impregnado en resina creando el núcleo del soporte.

Respecto al problema del creep, conocen este fenómeno en los reentelados, donde es necesaria una alta temperatura, pero no lo han observado en mural. Los soporte que ellos plantearon iban a recibir como temperatura máxima los 35° C y por lo tanto este problema no se producía. Además, en su opinión, la presencia del silano<sup>252</sup> que recubre el tejido de fibra de vidrio hace que no se produzca el creep.

---

<sup>252</sup> Agente protector de las fibras.

**ABRIR CAPÍTULO III TOMO I**

