

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

**DETERMINACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DEL ACABADO DE DOS
BARNICES PARA EXTERIORES EN MADERA DE AILE, PINO Y
ENCINO MEDIANTE INTEMPERISMO ACELERADO**

T E S I S

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS, EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA:

JUAN CARLOS TAMARIT URIAS

BIBLIOTECA CENTRAL U. A. CH.

Junio del 2002

Chapingo, Texcoco, Edo. de México.



**DIRECCION ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES**



Bib. 97652

**DETERMINACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DEL ACABADO DE DOS BARNICES
PARA EXTERIORES EN MADERA DE AILE, PINO Y ENCINO MEDIANTE
INTEMPERISMO ACELERADO**

Tesis realizada por Juan Carlos Tamarit Urias bajo la dirección del Comité Asesor indicado,
aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

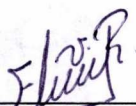
MAESTRO EN CIENCIAS, EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:



DRA. AMPARO BORJA DE LA ROSA

ASESOR:



M. en C. ROGELIO FLORES VELÁZQUEZ

ASESOR:



M. en C. ALEJANDRO CORONA AMBRÍZ

BIBLIOTECA CENTRAL U. A. CH.

A-39722

DETERMINACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DEL ACABADO DE DOS BARNICES PARA EXTERIORES EN MADERA DE AILE, PINO Y ENCINO MEDIANTE INTEMPERISMO ACELERADO

El jurado que revisó y aprobó el examen de grado de Juan Carlos Tamarit Urias autor de la presente tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales estuvo constituido por:

PRESIDENTE:



DRA. AMPARO BORJA DE LA ROSA

ASESOR:



M. en C. ROGELIO FLORES VELÁZQUEZ

ASESOR:



M. en C. ALEJANDRO CORONA AMBRÍZ

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos:

Por el amor y apoyo que siempre me han brindado.

A mi esposa e hijos:

Reyna Zulema,

Carlos Jesús y Karen Itzel,

Por ser el motivo de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo y en especial a la División de Ciencias Forestales, por brindarme la oportunidad de continuar con mi formación académica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el otorgamiento de una beca para la realización del postgrado.

Al Campo Experimental “San Martinito” del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), por las facilidades otorgadas durante la fase experimental del presente trabajo.

A la Empresa Poly-Form® de México, S.A. de C.V. por el apoyo recibido para iniciar la fase experimental este trabajo.

A la Dra. Amparo Borja de la Rosa por su acertada dirección en el desarrollo de este trabajo.

A los M.C. Rogelio Flores Velázquez y Alejandro Corona Ambríz por las asesorías recibidas y revisión del documento final de este trabajo.

A todas aquellas personas y amigos que de una u otra manera contribuyeron para la conclusión de este trabajo, mi más alto y sincero agradecimiento.

DATOS BIOGRÁFICOS

El autor nació un 27 de diciembre de 1971 en Guadalajara, Jalisco; realizó los estudios correspondientes a primaria y secundaria en Xaltianguis, Municipio de Acapulco, Guerrero. De 1986 a 1989 cursó la Preparatoria Agrícola en la Universidad Autónoma Chapingo, en Chapingo, Texcoco, Edo. de México. De 1989 a 1993 en la División de Ciencias Forestales de la misma Universidad cursó la carrera de licenciatura en donde en 1994 obtuvo su Título y Cedula Profesional como Ingeniero Forestal con Orientación en Industrias con el trabajo de Tesis: "Estudio tecnológico de la madera de *Pinus arizonica* Engelm del estado de Durango".

De 1994 a 1997, se desempeñó profesionalmente como investigador, adscrito al Campo Experimental "Ing. Eduardo Sangri Serrano", del Centro de Investigación Regional del Sureste, Zona III, en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) dependiente de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural; desempeñando actividades de investigación en el Área de Tecnología de la Madera e Industrias Forestales en las cuales fue director de tres proyectos de investigación.

De 1997 a 1999 cursó los créditos correspondientes a la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales en la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo.

De 1999 al 2000, se desempeñó como técnico con cargo de Coordinador de Enlace adscrito al Centro Regional No. 1 de la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural dependiente de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, desempeñando actividades en proyectos relacionados con reforestación, cultivo a plantaciones y prevención de incendios forestales, en el suelo de conservación ecológica del Distrito Federal.

Del 2001 al 2002 se desempeñó como asesor y consultor independiente en temas forestales y del ambiente. A partir de febrero del 2002, se desempeña como investigador en el CIR - Centro del INIFAP, con adscripción en el Campo Experimental "San Martinito" en las áreas de Tecnología de la Madera y Productos Forestales.

Ha participado como ponente en foros, congresos y simposios estatales y nacionales. Además de haber tomado cursos de actualización nacionales e internacionales en el área forestal en general y en tecnología y procesos industriales de la madera en particular.

RESUMEN

DETERMINACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DEL ACABADO DE DOS BARNICES PARA EXTERIORES EN MADERA DE AILE, PINO Y ENCINO MEDIANTE INTemperISMO ACELERADO

TAMARIT URIAS JUAN CARLOS.

Junio del 2002

(Bajo la dirección de la Dra. Amparo Borja de la Rosa)

La principal función de los acabados para exteriores es proteger la madera contra los agentes del intemperismo, así como ayudar a mantener su apariencia. El intemperismo causa deterioro superficial y por lo tanto afecta directamente el funcionamiento del acabado. El objetivo de este estudio fue determinar la vida útil del acabado de dos barnices poliuretanos para exteriores de la marca comercial Polyform® (11000 y 7000) en madera de aile (*Alnus firmifolia* Fernald), pino (*Pinus patula* Schl. et Cham.) y encino (*Quercus insignis* Mart. et Gal.) mediante intemperismo acelerado utilizando un equipo fabricado con base en las características que especifica el Reglamento del Centro Técnico de la Madera de Francia (rueda del CTBA de Francia). Mediante los parámetros de falla en apariencia y falla por adhesión del acabado y utilizando el modelo de distribución acumulativa de Weibull se estimó la vida útil del acabado, la cual fue para el acabado del barniz 11000 en madera de aile, pino y encino de 5.0, 5.2 y 5.0 años respectivamente, en tanto que para el barniz 7000 fue de 3.7, 3.4 y 4.9 años.

Palabras clave: intemperismo acelerado, acabados para exteriores, vida útil.

ABSTRACT

DETERMINATION OF FINISH SERVICE LIFE OF TWO VARNISHES FOR USE OUTDOORS ON ALDER, PINE AND OAK WOOD BY ACCELERATED WEATHERING

TAMARIT URIAS JUAN CARLOS.

June 2002

(Under the direction of the Dra. Amparo Borja de la Rosa)

The main function of any wood finish for outdoors is to protect the wood surface from weathering processes, as well as helping to maintain its appearance. Weathering brings about a surface deterioration and therefore it directly affects finish performance. The objective of this study was to determine the finish service life of two commercial polyurethane varnishes for outdoors (Polyform® 11000 and 7000) on alder (*Alnus firmifolia* Fernald), pine (*Pinus patula* Schl. et Cham.) and oak (*Quercus insignis* Mart. et Gal.) and by means of accelerated weathering on a CTBA degradation wheel. Failure data in appearance and in adhesion were fitted to a Weibull accumulative distribution to estimate the finish service life. According to the obtained results, service life on alder, pine and oak wood was 5.0, 5.2 and 5.0 years respectively for varnish 11000, and 3.7, 3.4 and 4.9 years respectively for varnish 7000.

Keywords: accelerated weathering, finishing for outdoors, service life.

CONTENIDO

	PAG.
APROBACIÓN DE LA TESIS DE GRADO-----	ii
APROBACIÓN DEL EXAMEN DE GRADO-----	iii
DEDICATORIA-----	iv
AGRADECIMIENTOS-----	v
DATOS BIOGRÁFICOS-----	vi
RESUMEN-----	vii
ABSTRACT-----	viii
CONTENIDO-----	ix
LISTA DE CUADROS-----	xi
LISTA DE FIGURAS-----	xii
1. INTRODUCCIÓN-----	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA-----	5
2.1. Efecto del intemperismo en la madera-----	5
2.2. Factores que afectan la degradación y durabilidad de los acabados-----	10
2.2.1. Características y propiedades de la madera-----	12
2.2.2. Falla en la línea de adhesión acabado/madera-----	14
2.2.3. Índices del nivel de protección de los acabados-----	18

	PAG.
2.2.4. Fallas y etapas de degradación de los acabados-----	20
2.3. Tipos de acabados para exteriores, efectividad y durabilidad-----	23
2.3.1. Métodos y tratamientos para estabilizar la madera-----	29
2.3.2. Selección y aplicación del acabado-----	34
2.4. Métodos de evaluación y áreas de investigación de los acabados-----	37
3. MATERIALES Y MÉTODOS-----	42
3.1. Características de las especies utilizadas como sustrato-----	42
3.2. Características físicas de los barnices probados-----	47
3.3. Descripción del equipo utilizado-----	48
3.4. Preparación del material de ensayo-----	49
3.5. Determinación del espesor de película y nivel de retención del acabado----	50
3.6. Método de ensayo-----	51
3.7. Determinación del porciento de la superficie del barniz degradado-----	53
3.8. Determinación del porciento de falla en la adhesión-----	54
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN-----	58
4.1. Espesor de película y nivel de retención del acabado-----	58
4.2. Falla en apariencia por degradación del acabado-----	60
4.3. Falla del acabado por pérdida de adhesión-----	69
4.4. Estimación de la vida útil de los acabados del barniz 11000 y 7000-----	74
5. CONCLUSIONES-----	78
6. LITERATURA CITADA-----	80
ANEXOS-----	88

LISTA DE CUADROS

	PAG.
Cuadro 1. Efecto relativo en la madera de varias formas de energía.-----	8
Cuadro 2. Gramaje y número de manos para un acabado transparente.-----	37
Cuadro 3. Clasificación por apariencia del acabado.-----	38
Cuadro 4. Características físicas de los barnices probados.-----	47
Cuadro 5. Espesor de película y retención del acabado de cada barniz por especie.-----	58
Cuadro 6. Espesor de película y retención para las variables estudiadas.-----	59
Cuadro 7. Valores medios en mm ² de falla por apariencia por especie y barniz en función del tiempo de exposición en horas.-----	61
Cuadro 8. Valores medios en mm ² de falla por adhesión por especie y barniz en función del tiempo de exposición en horas.-----	70
Cuadro 9. Valores de los parámetros escala y forma del modelo de Weibull por especie y barniz.-----	74
Cuadro 10. Tiempo en horas a las que se alcanza el 10 porciento de degradación del acabado por especie y barniz.-----	76
Cuadro 11. Tiempo de vida útil del acabado con los barnices 11000 y 7000 en madera de aile, pino y encino.-----	77

LISTA DE FIGURAS

	PAG.
Figura 1. Equipo utilizado para simular los efectos del intemperismo natural.--	48
Figura 2. Apariencia inicial y falla final por apariencia de los acabados en madera de aile, pino y encino.-----	62
Figura 3. Comportamiento de la degradación del acabado del barniz 11000 en madera de aile, pino y encino.-----	63
Figura 4. Comportamiento de la degradación del acabado del barniz 7000 en madera de aile, pino y encino.-----	65
Figura 5. Comportamiento de la falla en adhesión del barniz 11000 en madera de aile, pino y encino.-----	71
Figura 6. Comportamiento de la falla en adhesión del barniz 7000 en madera de aile, pino y encino.-----	73
Figura 7. Comportamiento de la degradación del acabado por especie y barniz aplicando la distribución de Weibull.-----	75

1. INTRODUCCIÓN

La madera es una materia prima de origen natural que ha sido reconocida por siglos en todo el mundo por sus propiedades estructurales, atractiva ingeniería y versatilidad. Sin embargo, como todo material biológico, la madera es susceptible a la degradación por el medio ambiente. Cuando la madera es expuesta al exterior, una compleja combinación de factores químicos, mecánicos y de energía lumínica desarrollan un complejo conjunto de reacciones que contribuyen a la degradación, lo anterior es conocido como intemperismo.

El intemperismo produce toda una serie de efectos en la madera expuesta al exterior, como cambios de color, superficies ásperas y rugosas, rajaduras, grietas, deformaciones o alabeos, pérdida de cohesión, fragmentación en astillas, entre otros. Los factores del intemperismo responsables de los cambios en la superficie de la madera son la radiación solar (básicamente luz visible, ultravioleta e infrarrojo), la humedad (rocío, lluvia, nieve), la temperatura y el oxígeno. De estos factores, el fotón de la radiación solar es el componente que más daño causa y es además el que inicia una gran variedad de cambios químicos sobre la superficie. Un factor adicional del intemperismo lo constituye la presencia de contaminantes en la atmósfera tales como el dióxido de sulfuro, dióxido de nitrógeno, anhídrido de nitrógeno IV (NO_2), anhídrido de azufre IV

(SO₂) y el ozono (O₃) en la presencia o ausencia de luz ultravioleta (Feist, 1982; Feist y Hon, 1984; Feist, 1994).

Para disminuir los problemas ocasionados a la madera por el intemperismo es necesario protegerla con sustancias adecuadas llamadas acabados. Los acabados superficiales de la madera, además de cumplir una función decorativa, proporcionan a esta, cierto grado de protección contra algunos agentes de deterioro. Estos se clasifican en dos tipos: 1) los que forman película, como los barnices, las lacas y las pinturas y, 2) los que penetran a través de la superficie de la madera, como los tintes pigmentados. Los barnices, son productos compuestos por aglutinantes, plastificantes, disolventes y diluyentes que al aplicarse originan una película insoluble al agua, adherente y dura, generalmente lisa y brillante; el ser transparentes permiten conservar la apariencia natural de la madera. Según el proceso de formación de película, los barnices se dividen en los que forman película debido a la volatilización de los disolventes y los que la forman como consecuencia de las reacciones químicas de polimerización y policondensación, como resultado de lo cual estos barnices pasan al estado insoluble (Castillo y Erdoiza, 1995).

Los acabados transparentes tales como el barniz, la laca, el aceite y la cera revelan el grano de la pieza de madera más fácilmente por desplazamiento del aire de la superficie por un medio de mucho mayor índice de reflectancia, esto intensifica el color natural y la textura de la madera, siendo mayor la intensidad en tanto mayor sea la profundidad a la que el acabado penetre, por esta característica es que este tipo de acabados tiene mayor

preferencia sobre aquellos que alteran u ocultan el color, brillo, grano y textura de la madera.

La durabilidad de los acabados para madera expuesta al exterior por la naturaleza del intemperismo, depende primeramente de la madera misma. Las propiedades de la madera que son importantes considerar en el acabado son: contenido de humedad, densidad básica, textura, contenido de resina o aceite, ancho y orientación de los anillos de crecimiento y los defectos tales como los nudos, madera de reacción e infestación por hongos. Otros factores que contribuyen son la naturaleza y calidad del acabado usado, la técnica de aplicación, pretratamientos, tiempo transcurrido para hacer una segunda aplicación, nivel de protección aplicado (espesor de película y nivel de retención) y las condiciones climáticas locales (Feist, 1983; Williams y Feist, 1993a; Alegri, 1994; Knaebe, 1995).

Tanto para la ciencia como para la industria, es de gran importancia desarrollar métodos de evaluación que permitan determinar la vida útil de los acabados en un corto plazo, esto es posible, mediante el uso de pruebas rápidas que duran meses con resultados aceptables, otras pruebas mucho más rápidas que duran semanas pueden solamente dar una orientación previa; sirviendo ambas para tener una seguridad técnica y comercial, eliminando el riesgo de la casualidad e incertidumbre (Kraemer, 1958). En México, en lo que se refiere al campo de la investigación sobre la vida útil de los acabados en la madera es escaso, y son aún más escasos los estudios sobre el uso de técnicas y métodos en pruebas aceleradas de laboratorio para este mismo propósito.

La investigación en el área de acabados busca mejorar la estabilidad de la superficie de la madera, combatir los efectos deletéreos del ambiente y perfeccionar las propiedades de los productos de acabado. Para conocer la durabilidad de estos productos, existen varios tipos de cámaras de envejecimiento bajo condiciones de intemperismo acelerado, entre las cuales la “rueda” francesa es relativamente fiable y no muy costosa, el objeto de estos aparatos es determinar la vida potencial del acabado por medio de ciclos acelerados de rayos ultravioleta, calor y lluvia (Arnold *et al.*, 1991; Kauman, 1996).

OBJETIVOS

GENERAL:

Determinar la vida útil del acabado de dos barnices poliuretanos para exteriores en la madera de *Quercus insignis* Mart. et Gal., *Pinus patula* Schl. et Cham. y *Alnus firmifolia* Fernald bajo condiciones de intemperismo acelerado.

PARTICULARES:

- Evaluar la vida útil del acabado utilizando los parámetros de falla por apariencia y falla por adhesión.
- Analizar la influencia de la densidad básica y la textura de la madera en la degradación del acabado.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Efecto del intemperismo en la madera

Todas las maderas sin protección expuestas a condiciones normales de intemperismo experimentan: 1) fotodegradación y fotooxidación por la luz ultravioleta (UV), 2) lixiviación, hidrólisis e hinchamiento por el agua y, 3) decoloración, degradación por manchado y deterioro por microorganismos. Además, la superficie cambia de color, se torna áspera por la fotodegradación, se agrieta y erosiona; la apariencia cambia marcadamente en pocos meses y después permanece casi sin alteraciones por varios años, los cambios físicos y químicos que ocurren después del intemperismo afectan solo la superficie de la madera expuesta (Nicholas, 1973; Feist, 1983; Feist y Hon, 1984; Sell y Feist, 1986a; Williams y Feist, 1993a).

El deterioro de la madera en el proceso natural de intemperismo involucra un proceso muy complejo, en una secuencia de reacción de los radicales libres. La luz no penetra más allá de las 0.20 micras, por lo tanto las reacciones de degradación en la madera son un fenómeno superficial. Los radicales libres generados en la madera por la luz interactúan rápidamente con el oxígeno para producir hidroperóxidos quienes son fácilmente descompuestos para producir grupos cromofóricos. Un cambio en los

componentes químicos de la madera (celulosa, hemicelulosa o lignina) puede ser causado por una enzima, una radiación química o electromagnética, pero invariablemente, el resultado final es un cambio en la estructura molecular a través de una serie de reacciones (Nicholas, 1973; Feist y Hon, 1984).

La oxidación de la superficie de la madera catalizada por la luz UV causa la descomposición de la ligno-celulosa, quien es seguida por una lixiviación de los productos degradados debido a la lluvia. Además, la expansión y contracción causados por el humedecimiento y secado intermitente de la superficie de la madera origina el grano levantado seguido por rajaduras y grietas, así como alabeos y deformaciones; estos cambios físicos asociados con el intemperismo son causados por la inestabilidad dimensional de la madera por cambios en el contenido de humedad (Nicholas, 1973; Sell y Feist, 1986a).

El proceso de degradación por la luz UV se inicia por la formación de radicales libres y presumiblemente comienza con la oxidación del hidróxil fenólico. Este proceso de degradación resulta en un decremento en metóxil y contenido de lignina y un incremento en acidez y concentración de carbóxil de la sustancia madera. Estos cambios fotoquímicos pueden incrementarse con el aumento de humedad y calor. Los productos de descomposición de la madera intemperizada, en adición a los gases y agua son principalmente ácidos orgánicos, vainillina, siringilaldheido y componentes de alto peso molecular, quienes son todos lixiviables (Feist y Hon, 1984).

La lignina por ser la principal responsable para la absorción de la radiación UV, es la primera que presenta efectos de degradación causados por el intemperismo perdiéndose con ello componentes aromáticos, ya que se ha descubierto que los grupos carbonilos se incrementan debido a la oxidación de la celulosa y la lignina, además, la cantidad de lignina se reduce y lixivia por el agua, disminuyendo así su contribución a repeler el agua por la madera; aunado a esto, dado que la celulosa es higroscópica y tiene relativamente una mayor resistencia al intemperismo y por lo tanto a ser degradada, se vuelve más abundante en la superficie de la madera intemperizada debido a la degradación de la lignina, lo que presumiblemente incrementa la concentración de grupos hidroxil y entonces cuando una gota hace contacto, se presenta una mayor reacción entre estos grupos y la madera (Feist y Hon, 1984; Kalnins y Feist, 1993).

La capacidad de humedecer la superficie de un sólido por un líquido es expresado como el ángulo de contacto entre el sólido y el líquido, un ángulo de contacto pequeño significa una mayor capacidad para humedecer. Este ángulo decrece con el tiempo en madera sin protección que ha sido expuesta a la intemperie, por lo tanto existe una mayor capacidad de humedecimiento en madera intemperizada, se supone que esto sea un factor más que contribuye al deterioro de la estructura de la madera. Las diferencias encontradas en la capacidad de humedecimiento entre diferentes especies son debidas a que los extractivos tienen una influencia significativa, es decir, a una mayor concentración de estos se tiene un ángulo de contacto mayor y en consecuencia una menor capacidad para humedecerse. El mecanismo por medio del cual el intemperismo hace que la madera sea más humedecida por el agua es debido en parte a la

fotooxidación de los extractivos lo que lleva a la formación de productos volátiles y a que los materiales solubles en agua son eliminados a través de la superficie expuesta (Kalnins y Feist, 1993).

Los agentes de degradación de la madera se han dividido en categorías. Las formas de energía física son usadas para describir todos los factores además de hongos, insectos y animales (Cuadro 1); la importancia de los agentes físicos destructivos en la madera puede verse cuando se comparan dos situaciones: interior y exterior. El factor más importante que afecta a la madera en interiores es el fuego, en tanto que en exteriores es el intemperismo (Feist y Hon, 1984).

Cuadro 1. Efecto relativo en la madera de varias formas de energía.

Forma de Energía	Interior		Exterior	
	Resultado	Degradación	Resultado	Degradación
Térmica				
Intensa	Fuego	Severo	Fuego	Severo
Ligera	Oscurecimiento del color	Ligero	Oscurecimiento del color	Ligero
Luz				
Visible y UV	Cambio de color	Ligero	Cambios de color	Severo
			Degradación química	Severo
Mecánica	Desgaste natural y por uso	Ligero	Desgaste natural	Ligero
			Erosión por viento	Ligero
			Superficie rugosa	Severo
			Desfibración	Severo
Química	Manchado	Ligero	Superficie rugosa	Severo
	Decoloración	Ligero	Desfibración	Severo
	Cambios de color	Ligero	Selectivo	Severo
			Cambios de color	Severo
			Pérdida de resistencia	Severo

A nivel microscópico mediante fotografías pueden encontrarse severas microrajaduras en la pared celular así como eliminación del material de la pared celular expuesto

especialmente en las áreas de las punteaduras en la madera protegida con acabados claros expuesta a radiación UV e intemperismo (Nicholas, 1973).

La erosión de la madera, además de ser resultado de una degradación fotoquímica, es también resultado de un mecanismo de abrasión debido al agua, lluvia y viento. La tasa de erosión por unidad de tiempo en la madera expuesta al intemperismo, depende y es principalmente función de la densidad básica de la madera y por lo tanto del espesor de la pared celular; la relación entre la tasa de erosión y la densidad es lineal en un rango de 0.3 a 1 gr/cm³; esta tasa se incrementa con el decremento de la densidad de la madera. Además la extensión de la erosión depende de la estructura de la madera y puede ser lo bastante uniforme en el caso de maderas duras o con algo de relieve para las maderas blandas, en éstas, la madera tardía se erosiona más lentamente que la madera temprana. Una gran cantidad de extractivos puede afectar la relación densidad/erosión, sin embargo, después de un cierto período de exposición, los extractivos de la superficie de la madera pueden degradarse y lixivarse, continuando así la erosión de manera similar que en aquellas especies con bajo contenido de extractivos. Las diferencias en la composición química básica de la pared celular de diferentes maderas juegan un papel menor en la erosión durante el intemperismo (Feist y Mraz, 1978a; Sell y Feist, 1986b; Williams, 1987; Feist, 1988a; Williams *et al.*, 1990).

La tasa de erosión inicial para madera de *Thuja plicata* Donn. en probetas de corte radial es mayor en madera de primavera que en la madera de verano, después de 15-20 semanas de exposición a intemperismo acelerado, las tasas de erosión para ambos tipos

de madera son muy similares. Los repelentes al agua como componentes en la formulación de las tintas semitransparentes mejoran el funcionamiento de estas además de reducir la erosión tanto del tinte como de la madera y protegen a ésta contra el agua líquida; cuando se agrega parafina como repelente de agua en una proporción de 1.3% con respecto al peso de la tinta, la erosión de la madera se reduce en un 20% en comparación con aquellas tintas sin tal repelente (Feist y Mraz, 1978a; Feist, 1988a).

2.2. Factores que afectan la degradación y durabilidad de los acabados

La función primaria de un acabado en la madera expuesta al exterior es proteger su superficie del proceso natural de intemperización, además de ayudar a mantener su apariencia. La degradación fotoquímica además de afectar la superficie de la sustancia madera, también afecta directamente el funcionamiento del acabado aplicado; de la misma manera, los cambios dimensionales que sufre la pieza de madera combinados con los esfuerzos de tensión, compresión, cizallamiento y torsión en la zona de la superficie causa un decremento en la adhesión entre el acabado y la madera (Feist, 1983; Sell y Feist, 1986a; Williams y Feist, 1993a).

Durante el primer o segundo año de exposición al exterior de la madera que ha sido recubierta adecuadamente con pintura, el efecto de la estructura de la madera usualmente es muy pequeño sobre el comportamiento del recubrimiento. Más tarde, cuando con el tiempo el recubrimiento ha comenzado a tornarse quebradizo, las diferencias en la

estructura de las maderas cobran importancia y determinan la rapidez de la desintegración del recubrimiento (FPL, 1987).

Los principales factores críticos en la determinación de la utilidad, funcionalidad y durabilidad de los acabados en la madera expuesta al exterior a un proceso de intemperismo natural depende primeramente de la madera en sí, es decir, la especie, características y calidad; las propiedades importantes de la madera en el acabado son el contenido de humedad, la densidad básica, textura, contenido de aceite o resina, ancho y orientación de los anillos de crecimiento, defectos de la madera como los nudos, madera de reacción y ataque por hongos. Otros factores que contribuyen son la naturaleza, composición o formulación, propiedades y la calidad del acabado, particularmente del tipo y cantidad del polímero (resina o aglutinante), pigmento, sistema de solvente y aditivos usados; de estos componentes, el tipo y cantidad de polímero además del pigmento afectan más directamente las propiedades mecánicas y la durabilidad del acabado; además de las condiciones y técnicas de aplicación, la tasa de aplicación, pretratamientos, tiempo transcurrido entre reacabado, grado de protección contra la intemperie, programa de mantenimiento empleado y las variaciones en la severidad de las condiciones climáticas locales de exposición (Estrada, 1959; Feist, 1983; Feist, 1984; Williams y Feist, 1993a).

2.2.1. Características y propiedades de la madera

Para el acabado se prefieren aquellas maderas que se expanden y contraen al mínimo, así mismo, las tablas de corte radial son mucho mejores que las de corte tangencial, especialmente para su uso en el exterior en donde se tiene un rango amplio de humedad relativa así como un humedecimiento periódico que puede producir un rango amplio de expansión y contracción de la madera. Además, debido a que la expansión de la madera es directamente proporcional a la densidad, las especies de baja densidad son las más apropiadas y preferidas sobre aquellas de alta densidad, ya que retienen mejor los acabados y la durabilidad de éstos es mayor; se sabe que la variación de la densidad dentro de una misma especie afecta seriamente la capacidad de algunas tablas individuales para retener el acabado. Por otra parte, la presencia de nudos y de madera juvenil libera más fácilmente los extractivos los cuales son exudados a través del acabado (Estrada, 1959; Feist, 1984; Knaebe, 1995).

En maderas suaves el rajado, desmoronamiento y descascaramiento de las pinturas avanza principalmente sobre las bandas de madera de verano y entre más anchas sean estas el proceso de desintegración avanza más rápidamente. Para maderas suaves se ha determinado que en aquellas que tienen una baja densidad, la desintegración del acabado se da en parte por contener una baja proporción de madera de verano; además la desintegración se presenta más lentamente en maderas con anillos de crecimiento angostos que en aquellas con anillos anchos; en tablas de corte radial con bandas más angostas de madera de verano, la desintegración es menor que en tablas tangenciales y,

una más alta calidad de la madera retiene mejor el acabado que aquellas que presenta nudos y otros defectos. En general, maderas con un buen aspecto, buena forma y que no desarrollan grietas ni rajaduras, con el intemperismo son las que se afectan menos (FPL, 1987).

La madera es un material higroscópico y por lo tanto sus grupos hidroxil tienen una fuerte afinidad con la humedad de la atmósfera y con el agua misma, ésta al penetrar tiende a cubrir los elementos constitutivos de la madera, desplazando entonces el recubrimiento formado por el acabado, a este tipo de falla se le conoce como humedecimiento y es la responsable del ampulamiento, pelado de las pinturas y de la pérdida de transparencia de los barnices. Se sabe que el tiempo requerido por la madera para alcanzar el equilibrio con la humedad del medio en que se encuentre, se incrementa con la cantidad de intercambios de humedad, con el tamaño y densidad de las piezas de madera, en tanto que decrece con la temperatura; además, los extremos de las piezas en dirección al grano toman y ceden humedad más rápidamente que los extremos laterales; la albura puede absorber e intercambiar humedad más rápidamente que el duramen y lo mismo sucede con las tablas tangenciales en comparación con las radiales, de la misma manera la madera suave de primavera absorbe más humedad que la madera densa de verano. El encino rojo responde más rápidamente a los cambios atmosféricos que el encino blanco (Koehler, 1924; Richardson, 1978).

La expansión y contracción de la madera ocasionados por ganar y perder vapor de agua debido a las condiciones de exposición cíclicas tanto del intemperismo natural como del

acelerado, originan gradientes de humedad a causa de la sorción y desorción lo que se piensa es esencial para crear las condiciones de una superficie agrietada, además de conducir a la formación de esfuerzos los cuales invariablemente rompen la película formada por el acabado, permitiendo con esto la entrada de agua líquida a la madera por capilaridad, la cual no puede evaporarse dado que la madera aún permanece protegida por el acabado, por lo que el agua simplemente se acumula, manteniendo el riesgo de deterioro y falla por humedecimiento preferencial tanto del acabado como de la madera (Rietz, 1961; Richarson, 1978).

2.2.2. Falla en la línea de adhesión acabado/madera

La línea de unión o adhesión entre el acabado y la madera formada por los agentes de enlace del acabado, es sujeta en cierto grado a una degradación fotolítica a causa del intemperismo, principalmente por la luz y el agua. Así mismo, cuando la luz UV degrada a la madera protegida por un acabado transparente, eventualmente el barniz comienza a escamarse y a romperse, tomando junto con él fibras de la madera que ha sido degradada fotoquímicamente (Feist, 1983; Feist, 1985; Williams y Feist, 1993a).

La pérdida de adhesión en la interfase pintura/madera ocasionada por la fotodegradación fue cuantificada mediante ensayos de tensión y falla por cizallamiento en la madera de *Pinus* sp., *Pseudotsuga menziesii*, *Liriodendron tulipifera*, *Picea engelmannii* y *Thuja plicata*. Se determinó que los cambios en la resistencia al esfuerzo por cizallamiento dependen del tipo de sellador aplicado (alquídico o acrílico), del tiempo de exposición a

la intemperie antes de la aplicación del acabado y de la madera de cada especie. La resistencia de la adhesión decrece con el tiempo para las especies de menor densidad, pero se incrementa en las especies de mayor densidad. Un proceso de intemperización de la madera previo a su acabado, reduce el funcionamiento de este debido a la degradación que sufre la superficie de la madera, por lo que se presenta un fallo en la interfase madera/acabado, presentándose escamamiento y desprendimiento de éste último; después de 4 semanas de preintemperización, se ha determinado pérdida en la resistencia de la unión del 33-50%, antes de éste tiempo, la mayoría de la falla se presenta solo en la madera. Pueden observarse diferencias de la adhesión de la pintura entre madera temprana y madera tardía, lo cual es atribuido a que la primera sufre una degradación más severa, lo que induce que la pintura falle preferentemente en esa parte del sustrato. La adhesión está determinada por la naturaleza física y química de la superficie, por lo que las diferencias en la profundidad de degradación entre ambos tipos de madera no la afectan (Williams *et al.*, 1987; Williams *et al.*, 1990).

El mecanismo de falla de un sellador alquídico es más complicado al que presenta un sellador acrílico, debido a que la adhesión de la pintura en la madera tardía es mejor que en la madera temprana, en consecuencia el sellador acrílico exhibe una mayor deflexión previo a la falla, además de un más bajo modulo de elasticidad y una más alta resistencia en la adhesión en comparación con el sellador alquídico. Este comportamiento se atribuye más a las características físicas de las pinturas que por la intemperización de la madera (Williams *et al.*, 1987).

La luz UV se transmite en menor proporción en la madera tardía que en la madera temprana, de ahí que en esta última la degradación ocurra a mayor profundidad, en consecuencia se tiene una unión más fuerte de la pintura en la madera tardía por estar menos intemperizada; además, el tamaño molecular de los aceites modificados presentes en un sellador alquídico puede ser lo suficientemente pequeño como para que haya una penetración hacia la microestructura de la madera (pared celular). El hecho de que un sellador acrílico no presente diferencias de adhesión de la pintura en la madera tardía y temprana, puede deberse a que los micelios de las resinas del polímero en el látex sean demasiado grandes para penetrar en la microestructura de la madera, por lo que las diferencias en la profundidad de degradación en ambos tipos de madera no afectan la adhesión de este sellador (Williams *et al.*, 1987).

El buen estado de la madera en la interfase acabado/madera, es crucial para una durable adhesión del acabado; el grado en como la madera preintemperizada afecta la adhesión de la pintura, depende del tipo de pintura y de la especie de madera. Al respecto, se ha observado que después de 4-8 semanas de preintemperización, la resistencia de la unión decrece para especies con baja densidad. Aún cuando las fallas de las pinturas normalmente ocurren preferencialmente en la madera tardía, en madera preintemperizada, la falla de la adhesión se presenta en madera temprana, esto es debido a que durante el preintemperizado, la madera temprana se degrada más rápidamente que la madera tardía. La resistencia de la unión pintura/madera medida poco después del curado del acabado, es un buen indicador de la durabilidad del sistema de acabado (Williams y Feist, 1993b).

Los grados de textura de la superficie de la madera están determinados por: 1) la estructura anatómica, por ejemplo el diámetro de traqueidas, el espesor de la pared celular y el tamaño de los vasos, 2) el método de maquinado empleado, por ejemplo marcas de dientes u ondulaciones producidas por la máquina cepillo y, 3) la variación dentro del método de maquinado, por ejemplo vibraciones, desalineaciones o embotamientos de herramientas. Estos grados de textura tienen particular importancia en la adhesión de la capa formada por el acabado sobre la superficie de la madera y en consecuencia sobre la duración del mismo. Con los acabados transparentes y las pinturas alquídicas se obtienen los mejores resultados cuando se aplican sobre sustratos lisos y de corte radial, ya que se obtiene una película más uniforme en espesor lográndose con ello una mayor protección principalmente contra la humedad. Existe una relación inversa entre la aspereza de la superficie con la tasa de aplicación. Una superficie dañada por las cuchillas que causan fractura o aplastamiento de la pared celular, es la razón por la cual se obtiene una pobre calidad de la unión y en consecuencia la falla del acabado por pelado (Richter *et al.*, 1995).

El proceso de lijado previo a la aplicación del acabado, ofrece la ventaja de requerir una baja cantidad de acabado por unidad de superficie, además de funcionar mejor sobre todo en maderas con bajo grado de aspereza, ya que tienen la habilidad de aceptar bien las capas aplicadas. Además, resulta ventajoso debido a que al requerir menos material, se tienen un ahorro económico y un beneficio ecológico al ser menor la cantidad de emisiones orgánicas volátiles que se liberan (Richter *et al.*, 1995).

2.2.3. Índices del nivel de protección de los acabados

Existen índices inmediatos para determinar el nivel de eficiencia y protección que dará un determinado acabado o tratamiento a la madera, algunos de estos índices son absorción, penetración, nivel de retención y espesor de película. Para el caso de los acabados, en función de las condiciones en que la madera dará servicio se requerirá el mayor o menor nivel de retención y espesor de película del producto. Estos índices pueden ser influenciados por factores relacionados a la anatomía de la madera, a la preparación de ésta y al método de aplicación del acabado, entre los primeros destaca el tipo de madera (gimnosperma o angiosperma) debido a que su constitución anatómica es distinta, al igual que la proporción de albura y duramen, contenido de humedad, defectos de secado, presencia o ausencia de canales resiníferos, gomas y tálides, tipo de corte y densidad (Hunt y Garratt, 1953; Tuset y Durán, 1979; Mockus-Lubin *et al.*, 1986; Flores *et al.*, 1996; Tamarit *et al.*, 1998).

Se ha determinado que la madera de *Sequoia sempervirens* (D. Don.) Endl. tratada con sales CCA muestra mayor facilidad para tratarla en condición seca que en estado verde, las tablas tangenciales muestran una mayor uniformidad del tratamiento, la madera colapsada por el secado no acepta bien el tratamiento y a un mayor porcentaje de albura se obtiene una mayor retención, profundidad y uniformidad del preservador aplicado, esto último se explica porque la albura en comparación con el duramen presenta en sus células menor contenido de inclusiones y extractivos, por lo que es más permeable ya

que las punteaduras no son obstruidas, permitiendo entonces un libre flujo del preservador aplicado (Mockus-Lubin *et al.*, 1986).

El nivel de retención y el espesor de película formado por un barniz poliuretano base agua y otro base solvente fue evaluado en madera de *Pinus montezumae* (pino) y *Quercus sideroxyla* (encino). Para ambas especies se encontró que el espesor de película fue menor para el barniz base solvente, en tanto el nivel de retención fue mayor, esto puede deberse a que este barniz tiene una mayor carga de sólidos y al diluirse a un 25% el tamaño de sus partículas es menor. El pino presentó en comparación con el encino el mayor valor de retención y espesor de película para ambos barnices probados, lo cual es debido a que el primero tiene una mayor proporción de espacios vacíos (Flores *et al.*, 1996).

La influencia de las variables: especie, tipo de corte (transversal y tangencial) y tipo de barniz (base agua y base solvente) fue analizada estadísticamente en el nivel de retención y grosor de película del acabado en madera de *Quercus crassifolia* (encino), *Pinus patula* (pino) y *Alnus firmifolia* (aile). Se encontró que la madera de encino presenta diferencia significativa para el nivel de retención con respecto a la madera de pino y aile, esto se debe a que aún cuando el porcentaje de espacios vacíos es menor en encino, el tamaño de estos es mayor comparativamente con el porcentaje y tamaño de espacios vacíos del pino y aile. El tipo de corte presentó diferencia estadística significativa tanto para retención como para grosor del acabado, lo cual obedece al ordenamiento y dirección de los elementos constitutivos de cada madera. Los barnices por su parte

fueron estadísticamente diferentes solo para retención, esto es debido a las características de elaboración tales como porcentaje de sólidos, viscosidad y densidad (Tamarit *et al.*, 1998).

2.2.4. Fallas y etapas de degradación de los acabados

Dependiendo del tipo de acabado, será el tipo de falla que presente por efecto del intemperismo, de esta manera las fallas de los acabados que forman película como los barnices y las pinturas se dan por rajado, pelado, presencia de ampollas, grietas finas y abundantes, descascaramiento y en algunos casos hasta erosión, esto debido a la gran diferencia en los coeficientes de expansión de la madera y a que la capa formada por el acabado no es lo suficientemente plástica; por su parte los acabados que penetran como las tintas a menudo resultan en una delaminación sustancial de la superficie en forma de escamas, presentando una pobre apariencia que no puede ser corregida con un reacabado (Brand *et al.*, 1960; Feist, 1984; FPL, 1987; Williams y Feist, 1988; Feist, 1988b; Carll y Feist, 1989).

Según la metodología empleada para determinar el funcionamiento, apariencia y grado de deterioro de los acabados, se elige el criterio de evaluación, de esta manera, para el caso de los acabados transparentes puede evaluarse el ataque por hongos y apariencia general, para los semitransparentes erosión y apariencia general, en tanto que para las pinturas se evalúa manchado, erosión, presencia de escamas (desprendimiento del acabado), burbujas, fisuras, grietas y resquebrajamiento. Además, puede también

calificarse los defectos de la madera tales como alabeos, nudos, bolsas de resina, cambios de color y la apariencia general (Feist, 1987; Williams y Feist, 1988; Feist, 1988b; Castillo y Erdoiza, 1995).

El FPL (1987), indica que bajo condiciones normales de exposición, el recubrimiento se deteriora más rápidamente en donde se ha presentado una mayor cantidad de luz del sol, así, el deterioro avanza en forma sucesiva presentándose las siguientes etapas de degradación del acabado con pintura:

1. Etapa de manchado o ensuciado: el recubrimiento comienza parcialmente a empañarse.
2. Etapa de opacamiento: el recubrimiento pierde brillo tornándose mate.
3. Etapa de marcado por suciedad: el recubrimiento aún cuando puede limpiarse del polvo y mugre, se decolora; en algunos casos, la pérdida de pigmentos puede dar la apariencia de una película semejante al yeso.
4. Etapa de fisurado: bajo las condiciones más favorables algunos acabados pueden saltarse esta etapa y pasar a la etapa de desintegración. Las fisuras son de dos tipos dependiendo de la naturaleza del acabado:
 - a. Agrietado: las fisuras que son apenas superficiales más tarde pueden penetrar completamente a través de la película de acabado. Las fisuras formadas en esta etapa son usualmente poco notables.
 - b. Rajado: las fisuras atraviesan completamente a través del recubrimiento en donde fueron observadas por primera vez. Las orillas de las rajaduras del recubrimiento

tarde o temprano comienzan a separarse de la madera, ondulándose hacia fuera. Conforme avanza esta etapa, el recubrimiento se hace más quebradizo apareciendo más grietas.

5. Etapa de desintegración: el comportamiento de las fisuras en la etapa de fisurado, determinan la forma en que la desintegración toma lugar:
 - a. Erosión: cuando el acabado no sufre agrietamiento, el desgaste por el marcado o erosión es bastante que no se presenta el rajado, entonces el recubrimiento comienza a ser demasiado delgado para cubrir la madera y partes de ésta comienzan a ponerse al descubierto.
 - b. Desmoronamiento: se desarrolla a partir del agrietamiento, minúsculos fragmentos del recubrimiento cortados a partir de las fisuras comienzan a entrelazarse y a penetrar completamente a través del cuerpo de este, causando que cedan.
 - c. Descascaramiento: se desarrolla a partir del rajado y encrespamiento. Las orillas del recubrimiento que se ondulan hacia fuera finalmente fallan totalmente, el proceso continúa conforme se van formando más zonas de recubrimiento que fallan por el rajado. Esta etapa es usualmente más rápida que el desmoronamiento.
6. Etapa de desintegración avanzada o de abandono: el deterioro del recubrimiento pone al descubierto una considerable superficie de la madera y ésta muestra un serio intemperismo.

2.3. Tipos de acabados para exteriores, efectividad y durabilidad

Los acabados se clasifican en aquellos que forman una película recubriendo la superficie de la madera y los que penetran a través de la superficie de la madera; entre los primeros destacan los barnices y las pinturas y en los segundos se encuentran los transparentes como los repelentes al agua y, los pigmentados como las tintas y los preservadores hidrosolubles (Castillo y Erdoiza, 1995).

Las películas aplicadas sobre la superficie de la madera ya sea con pinturas o con barnices aún cuando no reduce la higroscopicidad, sí reduce la tasa de absorción e intercambios de humedad en comparación con los tratamientos de impregnación, aunque no es la forma en que se puede excluir completamente la humedad de la madera en servicio. La efectividad de cada película aparentemente depende sobre todo de la habilidad para prevenir el contacto entre la sustancia madera y el agua del exterior en su forma líquida o gaseosa. Todas las películas se deterioran con la edad y la exposición, aunque los diferentes materiales varían ampliamente debido a la relativa permanencia de su eficacia. Bajo exposición continua, el contenido de humedad de la madera recubierta puede semejar al de la madera no tratada, siendo la diferencia en el tiempo requerido para que la absorción de humedad tome lugar (Koehler, 1924; Hunt y Garratt, 1953).

Las pinturas alquídicas que tienen como pigmento dióxido de titanio en comparación con las pinturas convencionales ofrecen mayor resistencia al ampulamiento y al

manchado, además de presentar buena adhesión, menor erosión, buena apariencia y por lo tanto mayor durabilidad (Vannoy, 1958).

El deterioro de la superficie de la madera expuesta a la intemperie puede ser prevenido por medios físicos como los acabados entre los que se encuentran las pinturas, tintas y barnices, las primeras proporcionan mayor protección contra la degradación por la luz UV y por la humedad, necesitan ser renovadas cada cinco o diez años; las tintas pigmentadas por su parte son durables y fácilmente reacabadas con otros acabados y requieren de mantenimiento cada dos o cuatro años según el clima; los barnices en tanto tienen una vida corta y el uso de prácticas inadecuadas durante el proceso de acabado puede ser causa de fallas tempranas tanto del sustrato como del acabado por lo que no funcionan satisfactoriamente y requieren de reacabado frecuente cada uno o dos años para mantener una apariencia satisfactoria y un funcionamiento razonable, siendo necesario la aplicación de varias capas por lo que los costos de su mantenimiento pueden ser altos (Feist *et al.*, 1977; Findlay, 1978; Feist, 1983; Feist, 1984; Feist, 1985; Knaebe, 1995; Kauman, 1996).

Se han realizado numerosos intentos por usar acabados que tengan la menor cantidad posible de color para absorber la luz UV y con ello ayudar a mantener tanto el color natural como la estructura de la superficie original de la madera; sin embargo no han sido efectivos, ya que no dan una larga duración contra la luz. Aún utilizando barnices transparentes relativamente resistentes compuestos por resinas sintéticas que bloquean parcialmente la luz UV, los sistemas madera-barniz son todavía limitados para las

pruebas de intemperie debido a que la luz UV penetra la película formada, atacando la madera en forma gradual, eventualmente el barniz comienza a cuartearse y a descascararse, llegando incluso a desprender fibras de la madera que ha sido degradada fotoquímicamente; la duración también puede ser alargada aplicando sobre la madera primeramente un tinte y después varias capas de barniz (Brand *et al.*, 1960; Feist, 1984; Knaebe, 1995).

Los barnices poliuretanos en general tienen una excelente durabilidad, son resistentes al agua, al alcohol y a químicos, tienen buen brillo y penetran a una buena profundidad; sin embargo tienden a amarillearse a medida que envejecen. Están disponibles en sistemas de 1 ó 2 componentes y pueden ser formulados para que sequen por oxidación o por reacción química. Son compuestos de alto peso molecular, producto de la reacción de adición entre el grupo isocianato (NCO) y el grupo hidroxilo (OH) de las resinas empleadas, con desplazamiento del hidrógeno. Los poliuretanos se obtienen por poliadición de productos polifuncionales, es decir, que contengan varios grupos reactivos. Para la obtención de las propiedades requeridas en la industria del barnizado de la madera, los barnices de poliuretano deben ser formulados con mucho cuidado, ya que las variables que intervienen modifican considerablemente el resultado final, entre las variables están el tipo de poliisocianato elegido (aromático o alifático), tipo de resina hidroxílica (poliester saturado o modificado, resina alquídica o acrílica) y la relación entre los grupos OH/NCO de los componentes (Brand *et al.*, 1960; Collier, 1967; Del Amo, 1986).

Cuando la relación estequiométrica es del 100%, es decir, que se tiene un sistema 1:1 con una reticulación completa, el barniz presenta excelentes propiedades de dureza y resistencia a agentes químicos, por contra, la adherencia y flexibilidad son defectuosas, dando problemas de aparición de fisuras o mala adherencia entre capas. Cuando se tiene una subreticulación, es decir, que se tienen grupos OH sin reacción o libres, éstos aportan propiedades específicas al sistema. A partir de investigaciones sobre resinas hidroxílicas han surgido varias generaciones de barnices poliuretanos con base en resinas de poliéster saturado, resinas de poliésteres modificados y resinas de poliéster con grupos hidróxilos de alto peso molecular, lográndose así obtener barnices para usos muy específicos además de proporcionarles las ventajas de alto poder de cubrimiento debido a que penetran poco en la madera, alta resistencia a disolventes de las capas superiores y la posibilidad de reticular a un porcentaje más bajo de isocianato, permitiendo así abaratar el proceso de barnizado y ocupar el primer lugar en el mercado (Del Amo, 1986).

Las variables que se consideran en la formulación y elaboración de un barniz poliuretano son: 1) la forma de aplicación: aerográfica, airless, electroestática, cortina o rodillo, 2) tipo de soporte: contrachapado, macizo, aglomerado, pieza plana o molduras, 3) tipo de proceso: lacado, poro cerrado o poro abierto y, 4) tipo de secado: a temperatura ambiente, aire caliente o infrarrojos. Al mismo tiempo se busca proporcionar al barniz las características de poca penetración en el poro de la madera para un mayor poder de cubrimiento y extensibilidad, excelente reacabado en tiempos muy cortos, la posibilidad de formular con bajo porcentaje de poliisocianato, sensibles al secado con aire caliente o

infrarrojos, alta viscosidad, así como una liberación rápida de los disolventes y buen lijado tanto manual como en máquina automática (Lubeck, 1958; Del Amo, 1986).

Los sistemas acuosos en comparación con los sistemas convencionales en base solvente tienen las ventajas de que la contaminación es prácticamente inexistente, son de menor toxicidad, el riesgo de incendio es prácticamente nulo y su olor es suave. La formación de la película es muy importante, ésta influye en las propiedades de extensibilidad, dureza y resistencia química. Los poliuretanos acuosos son dispersiones coloidales con un tamaño de partícula inferior a 0.1 micras, dado que se trata de uretanos totalmente reaccionados, no contienen ningún grupo isocianato libre, lo cual significa una toxicidad mínima. Este tipo de poliuretanos dan una resistencia a la abrasión más alta que las resinas acrílicas y son comparables con los poliuretanos en base solvente (Ad, 1986).

En los barnices tinte para madera, la protección contra la luz UV es de suma importancia; ésta puede atravesar la película, decolorar y estropear la capa inferior de la madera con la correspondiente pérdida de adherencia. Para una buena protección contra la luz UV se utilizan óxidos de hierro normales en tintes opacos y óxidos de hierro transparentes en tintes transparentes y para una mayor protección se pueden utilizar absorbentes UV, aunque el inconveniente que presentan estos productos es su baja solubilidad en agua. La humedad puede provocar la formación de ampollas con posterior pelado de la película y el hongo que provoca la mancha azul puede llevar a la pérdida de la adherencia del acabado (Ad, 1986).

Los sistemas de acabados transparentes para exteriores tienen una durabilidad en maderas suaves de uno a tres años, los semitransparentes de cuatro a seis y, los opacos como las pinturas de seis a diez. Los acabados transparentes dan solo una moderada protección contra los factores del intemperismo por lo que resultan de vida corta, esto comparado con los acabados que contienen pigmentos los cuales brindan mayor protección y durabilidad. Para asegurar un buen funcionamiento del acabado y lograr una buena protección contra el deterioro, se requiere realizar buenas prácticas de construcción e instalación, aplicar algún pretratamiento a la madera así como aplicar el acabado bajo condiciones ideales (Feist, 1987; Feist, 1988b; Carll y Feist, 1989; Feist, 1994).

Las tintas semitransparentes a base de resinas alquídicas o de aceite permiten una penetración parcial de la luz UV, la cual causa una degradación tanto de la madera como del acabado; una concentración de 8.4% de pigmento aún cuando oscurece un poco a la madera, la erosión se reduce entre un 63 y 65%, por lo que a una mayor cantidad de pigmento se obtiene una mejor protección de la superficie de la madera, aunque esta protección es solo hasta un cierto nivel. Puede esperarse un poco de degradación a no ser que se utilice un acabado completamente opaco que evite la penetración de la luz UV o que la madera sea estabilizada (Feist, 1988a).

Estudios realizados con madera y tableros de *Liriodendron tulipifera*, *Populus tremuloides* y *Pinus* sp., han demostrado que los mejores acabados son las pinturas acrílicas de látex, especialmente cuando son aplicadas sobre un sellador acrílico de látex.

Por otra parte el grado de exposición y tiempo de exposición, el tipo de acabado y el número de capas tienen un efecto significativo en la apariencia de la superficie; ya que los efectos para la exposición a 45° es más severa en comparación con la exposición a 90°, los pretratamientos tienen su mayor efecto bajo exposiciones más severas y en donde son aplicadas pocas capas del acabado. El enmohecimiento y el deterioro de los paneles es mayor a 45° de exposición en tanto que a 90° solo pequeñas áreas son afectadas. Los valores más bajos de densidad básica y de resistencia a la compresión reflejan una expansión irreversible en su espesor o una pérdida en la masa del sustrato ocasionada por el deterioro o delaminación de la superficie (Feist, 1987; Feist, 1988b; Carll y Feist, 1989; Feist, 1994).

2.3.1. Métodos y tratamientos para estabilizar la madera

La superficie de la madera puede estabilizarse por tratamientos de acetilación o impregnación con resinas fenólicas, consiguiéndose con ello reducir el deterioro a intemperismo prolongado, además la vida en servicio de las películas en madera estabilizada es también prolongada; la madera tratada con polietilen-glicol y cubierta con varias capas de un acabado claro, muestra una mejoría para su funcionamiento al exterior. Sin embargo tal mejoramiento no es suficiente para satisfacer la función de los acabados claros, ya que son de efecto limitado y de rentabilidad dudosa; la resistencia de los productos de acabado a los rayos UV se mejora agregando absorbentes de luz UV y estabilizadores como amines llamados HALS (Nicholas, 1973; Kauman, 1996).

Es necesario que la superficie de la madera sea modificada para alcanzar una mejor resistencia fotoquímica y una mejor estabilidad dimensional; no obstante, los productos para el acabado tienen que ser optimizados proveyéndoles de mayor protección contra la luz UV, menos permeabilidad a la humedad y mayor flexibilidad mecánica; además, es también necesario un razonable diseño y cuidado en los detalles de la construcción para una buena durabilidad y funcionamiento tanto del acabado como de la madera (Sell y Feist, 1986a).

También existe la necesidad de combinar un sellador, un repelente al agua y la acción de un preservador para lograr un acabado natural de la madera exitoso, ya que un buen repelente reduce la expansión y contracción, minimizando las grietas, rajaduras y deformaciones, en tanto el preservador controla el ataque por hongos y previene el manchado, ya que de darse ambas, son la causa de la decoloración de los acabados naturales (Rietz, 1961; Feist y Mraz, 1978b; Feist, 1987; Williams y Feist, 1993b; Feist, 1994).

Con base en estudios realizados con madera y tableros de *Liriodendron tulipifera*, *Pinus* sp., *Populus tremuloides*, *Thuja plicata* y *Sequoia sempervirens*, se ha demostrado que los pretratamientos repelentes al agua resultan ser muy benéficos para mejorar el funcionamiento de las pinturas tanto en maderas suaves como duras (Feist, 1987; Feist, 1988b; Carll y Feist, 1989; Feist, 1990).

La utilización de trióxido de cromo o sales CCA tipo C como pretratamientos previene el deterioro de la superficie de la madera ocasionado por los rayos UV del sol, además de repeler el agua y ser efectivo contra el ataque por hongos. Una vez que la superficie de la madera ha sido estabilizada, los acabados semitransparentes como los tintes pueden funcionar mejor que cuando son aplicados en la superficie de madera sin tratar, esto debido que tales acabados solo dejan pasar poca cantidad de luz UV, disminuyendo así la degradación de la madera. Los pretratamientos a base de cromo en maderas blandas han sido satisfactorios y estos pueden funcionar de manera similar en maderas duras. Realizando buenas prácticas de construcción y utilizando un preservador repelente al agua o un producto similar, resulta muy benéfico para la protección contra el deterioro de la madera que ha sido pintada, proporcionando un funcionamiento total tanto del acabado como de la madera (Feist *et al.*, 1977; Feist, 1977; Feist y Mraz 1980; Feist, 1987; Feist y Williams, 1991).

El efecto de un repelente al agua, trióxido de cromo, complejo de organocromo, sales de amoniaco de zinc y preservador hidrosoluble utilizados como pretratamientos en tableros de partículas de *Populus tremuloides*, es más evidente en los paneles acabados con tintas que aquellos acabados con pinturas. La apariencia de la superficie de los tableros acabados con tintas, a los cuatro años de exposición, presentan rugosidad en la superficie y delaminación del acabado. La vida de servicio de los tableros expuestos a la intemperie es aparentemente limitada por la vida del acabado que se aplique; debe ponerse especial cuidado en el manejo de las maderas duras que se utilicen en exteriores, sin importar que sea madera sólida o de un producto reconstituido (Carll y Feist, 1987).

La aplicación de ácido crómico en madera contrachapada de *Thuja plicata* y *Pseudotsuga menziessi*, causa su oxidación y produce un complejo cromo/madera insoluble lo que proporciona repelencia al agua, estabilidad dimensional y mejora la protección del acabado en la madera, consiguiéndose con ello incrementar la vida de servicio de las tintas y de los acabados transparentes, ya que se evita la formación de grietas y la erosión. El tratamiento a la madera con nitrato de cromo resulta en una madera químicamente modificada con propiedades similares a aquella madera tratada con ácido crómico, lográndose estabilidad dimensional y retardando la erosión (Williams y Feist, 1988).

El funcionamiento al intemperismo de paneles de madera de *Pinus* sp., *Pseudotsuga menziessi*, *Thuja plicata* y *Sequoia sempervirens* pretratados y acabados con pintura, es ligeramente mejor cuando son tratados con un preservador hidrosoluble que cuando se utiliza un preservador base solvente; sin embargo, el tratamiento con un preservador hidrosoluble es menos efectivo contra el deterioro. La aplicación de tres capas de pintura funciona mucho mejor que aquellos sistemas en que se aplican solo dos capas. Los tratamientos repelentes al agua ayudan a mejorar el funcionamiento de la pintura en aquellos sustratos que tienen pobres características de retención de pintura en tanto que el beneficio de los tratamientos no es significativo en aquellos sustratos con buenas características de retención (Feist, 1990).

Los preservadores repelentes al agua bajo condiciones naturales de intemperismo funcionan mejor en superficies ásperas que en cepilladas en madera de *Populus tremuloides*, esto debido a que las superficies ásperas tienen una más baja tasa de aplicación. Maderas densas y de corte tangencial pueden estabilizarse con recubrimiento de papel tratado a base de resina lo que produce una excelente superficie para el pintado, las superficies ásperas de triplay son mejor y más fácilmente acabadas con tintes semitransparentes o de color sólido (Feist, 1994; Knaebe, 1995).

Al evaluar por apariencia, pérdida de peso y resistencia al deterioro los efectos del intemperismo natural y artificial en madera de *Paraserianthes* sp. y *Cryptomeria japonica*, que fue previamente modificada químicamente con anhídrido acético, óxido de propileno, paraformaldheido, resina de dimetrol dihidroxy etileno urea y resina fenolformaldheido, aplicándose dos capas de laca tipo resina de poliuretano. Se encontró que ambas maderas presentan un mejor funcionamiento de la superficie, mayor resistencia al deterioro y una menor pérdida de peso en comparación con muestras testigo que no fueron modificadas químicamente. Con base en estos resultados puede afirmarse que la resistencia a la biodegradabilidad y la estabilidad dimensional de la madera se mejoran al modificarla químicamente (Sudiyanni *et al.*, 1996).

Aún cuando el proceso de preintemperizado causa un debilitamiento en la interfase acabado/madera en *Thuja plicata* y *Pseudotsuga menziesii*, el decremento de la tasa de aplicación y en consecuencia el incremento en la absorción del tinte por la madera preintemperizada compensa la degradación producida en la superficie, debido a esto el

proceso tiene un efecto negativo desde el punto de vista de costos, el cual es mayor en madera preintemperizada por requerir de mayor tinte para conseguir la misma durabilidad. En las maderas que han sufrido un proceso de intemperización previo al proceso de acabado con tintas y pinturas, estos acabados desarrollan más rápidamente resquebrajamiento y desprendimiento en comparación con aquellos acabados aplicados en madera no intemperizada (Arnold *et al.*, 1992; Williams y Feist, 1993b).

2.3.2. Selección y aplicación del acabado

En la selección de un barniz se toma en cuenta los requerimientos y necesidades del consumidor. Los principales factores a considerar son: la naturaleza y diseño del soporte, el aspecto final que se desee como color, tipo de poro, grado de brillo o efectos decorativos, las características físico-químicas del barniz como poder de cubrición, grado de viscosidad, tiempo de secado, relación de dilución, grado de tixotropía, resistencia a los rayos solares, a la abrasión, a la humedad, al amarillamiento y facilidad de mantenimiento, el sistema de aplicación del barniz como el moneado, brocha, pistola neumática, sistema airless, sistema airmix, pulverización en caliente, cortina, rodillo o robot y, sistema de secado como túnel de aire caliente, de lámparas infrarrojas, de aire caliente forzado vertical, fotoquímico o a temperatura ambiental (FEPYR, (s/f); Alegri, 1994).

En la selección de un acabado para exteriores debe considerarse la apariencia, durabilidad, costo, tipo de superficie, facilidad de aplicación y mantenimiento. Al

respecto, los barnices transparentes requieren los más altos costos de tratamiento y mantenimiento así como el período más corto de mantenimiento que es de dos años en donde el barniz comienza a deteriorarse y requiere el mayor número de aplicaciones el cual es de cuatro capas como mínimo al momento de iniciar el tratamiento del acabado (Feist, 1984; Knaebe, 1995).

Los fundamentos para lograr una buena técnica de atomización del acabado y conseguir eficiencia y economía al emplear pistola son: realizar un traslape del patrón de atomización del 50% en cada recorrido, emplear una velocidad en la pistola de 75 m/min, mantener la pistola a una distancia de 15-20 cm de la superficie sobre la que se aplica, mantener la pistola en forma perpendicular a la superficie y mantener siempre accionado el gatillo de la pistola desde el comienzo hasta el final del recorrido. La variación en la temperatura afecta la viscosidad del acabado y consecuentemente la tasa de flujo de la pistola y el grado de atomización, la presión adecuada para barnices, lacas y tintas es de 45, 25 y 35 lb respectivamente ya que al trabajar con presiones inadecuadas se causa pérdida del acabado (McCaslin, 1958).

Los tres pasos básicos para un buen acabado son: 1) la formación del cimient o base del acabado aplicando una o más capas de sellador para sellar e igualar las diferencias en porosidad y densidad, 2) la formación del cuerpo del acabado aplicando varias capas para proveer la estructura y grosor del mismo y proporcionar resistencia a la humedad, durabilidad y longevidad y, 3) la aplicación de la capa final del acabado para obtener la estética deseada, buena apariencia y alto brillo. La madera es un sustrato que varía en

densidad, porosidad y estabilidad, por lo cual la preparación de su superficie para la aplicación del acabado es de gran importancia y aún utilizando el mejor producto de acabado, éste no funcionará si la superficie fue mal preparada (LIBERON, 1996).

El proceso de barnizado de la madera independientemente de los procesos de tinte y decorado, se lleva en tres etapas: preparación de la madera, sellado o fondeado y terminado. El proceso de barnizado transparente consta de las siguientes etapas: 1) preparación de la madera mediante lijado, resanado o detallado, 2) entintado, el cual es opcional y puede realizarse para dar coloración a la madera, generalmente se aplica directamente sobre el sustrato a fin de que penetre y sea más consistente, 3) imprimación, que consiste en preparar el sustrato para la posterior adherencia del barniz, puede clasificarse según el fin que se persiga en tapaporo, aislante y masillado, 4) sellado o fondeado, para proporcionar espesor mediante la aplicación de una o dos manos, 5) decorado, el cual también es opcional y se refiere a todos los efectos especiales que se pueda y quiera dar al soporte y, 6) terminado o acabado para proporcionar el aspecto final al tacto, brillo y color. En el Cuadro 2 se ilustra el gramaje y número de manos por operación que deben emplearse en el barnizado con poliuretano para un acabado transparente (FEPYR, (s/f)).

Cuadro 2. Gramaje y número de manos para un acabado transparente.

Operación	Gramaje por mano	No. de manos según el tipo de poro		
		Abierto	Semiabierto	Cerrado
Entintado	50	1	1	1
Imprimación:				
Aislante	100	-	1	1
Tapaporos	100	-	-	1
Masillado c/r	40	-	1	1
Masillado c/e	80	-	1	1
Fondeado	150	1	1-2	3-4
Decorado:				
Sombreado	50	1	1	1
Traslucido	30	1	1	1
Nacarado	70	1	1	1
Poreado	50	1	1	-
Terminado	100-150	1-2	1-2	1-3
Pulido	-	-	-	x
Abrillantado	-	-	-	x

2.4. Métodos de evaluación y áreas de investigación de los acabados

La evaluación de los efectos del intemperismo sobre la madera han sido investigados por diferentes métodos tales como cambio de color, erosión, estudios infrarrojos, capacidad de humedecimiento de la superficie y cambios de la estructura anatómica. Mediante mediciones de la pérdida de la resistencia a la microtensión medida en Mpa en cortes radiales de 80 μm de espesor expuestos al intemperismo natural o artificial, es posible evaluar los cambios del complejo químico y estructural que ocurren en el interior de las capas superficiales de la madera durante el intemperismo, en consecuencia es posible determinar la tasa de fotodegradación de la misma. La reducción en la resistencia del ensayo de tensión es una función del tiempo y de la dosis de radiación. Por su parte, la distribución espectral de la radiación de las lámparas, las condiciones de la humedad relativa y la temperatura durante la exposición al intemperismo artificial influyen determinantemente en la tasa de degradación (Derbyshire *et al.*, 1995).

Los métodos de evaluación utilizados para determinar la efectividad y durabilidad de los acabados sobre madera expuesta a intemperismo, principalmente están basados en las normas ASTM D 659-86, D 660-87, D 661-86, D 662-86, D 714-87, D 772-86 y D 3274-82, en donde básicamente para la evaluación se utiliza la clasificación por apariencia del acabado que se muestra en el Cuadro 3; en la apariencia general se toma en cuenta dependiendo de tipo de acabado, el tipo de falla que presenten tal como manchado por hongos, rajado, pelado, presencia de ampollas, escamas, burbujas, fisuras, grietas, erosión, descascaramiento y resquebrajamiento. El inconveniente de utilizar dichas normas, es que las observaciones completamente objetivas son difíciles de hacer, ya que no son medibles ni cuantificables, sin embargo se busca unificar el criterio de calificación, para lo cual una misma persona se encarga de realizar todas y cada una de la evaluaciones.

Cuadro 3. Clasificación por apariencia del acabado.

Clasificación	Grado	Descripción
Excelente	I	Apariencia del acabado sin cambio alguno
Muy buena	II	Apariencia del acabado ligeramente decolorada y/o erosionada
Buena	III	Apariencia del acabado decolorada, erosionada, ligeramente agrietada y/o pelada en pequeñas áreas o partes
Favorable	IV	Apariencia del acabado erosionada, moderadamente agrietada y ligeramente pelada o desunida, en donde es necesario un reacabado como mantenimiento
Pobre	V	Erosión del sustrato, gravemente agrietada, desunida y/o pelada

Mediante la temperatura de transición vítrea (T_v) del acabado, el cual es un parámetro cuantificable medido como una función del tiempo, es posible analizar el envejecimiento de los acabados. En madera de encino, moabi y luan acabada con un tinte alquídico bajo condiciones naturales y artificiales de intemperismo, la T_v tiende a incrementarse durante los primeros meses u horas de exposición al intemperismo natural y artificial respectivamente, para después estabilizarse a los 25 y 24 °C respectivamente. El comportamiento observado es típico al de un incremento exponencial hasta alcanzar un valor límite, gráficamente la T_v muestra un comportamiento asintótico. Matemáticamente, entre el intemperismo natural y artificial existe una relación de envejecimiento del acabado de 10 veces, es decir, que el intemperismo artificial permite una aceleración de 10 veces al observado en el intemperismo natural. El intemperismo acelerado reproduce bien las variaciones de la T_v obtenidas con el intemperismo natural por lo que se valida el mecanismo de intemperización artificial para propósitos de investigación. La madera de las tres especies tiene poca influencia sobre la malla macromolecular final de la resina del acabado, la cual corresponde a la T_v estabilizada en ambos tipos de intemperismo. El equipo utilizado para el intemperismo acelerado fue la “rueda” patentada por el Centro Técnico de la Madera de Francia (Podgorski *et al.*, 1996).

Mediante falla por apariencia y pérdida de adhesión, ambos parámetros cuantificables, en pruebas de intemperismo acelerado utilizando la “rueda” francesa, se determinó la vida útil del acabado de dos barnices para exteriores tipo poliuretano alifático, uno base solvente y otro base agua en la madera de *Quercus crassifolia* (encino) y *Pinus patula*

(pino). El encino por tener una mayor densidad, menor estabilidad dimensional y ser de textura gruesa, influyó de manera determinante para que la falla por apariencia y la pérdida de adhesión fuera siempre mayor en comparación con el pino. El barniz base solvente puede utilizarse como acabado en madera de pino que va a ser utilizada en exteriores, ya que su vida útil antes de que sea necesario dar un rebarnizado es de 544.26 días (Flores, 1999).

La investigación de los acabados para madera debe ser dividida en tres áreas principales: desarrollo de nuevas coloraciones, mejoramiento en los métodos de aplicación e incremento en el funcionamiento de los acabados aplicados. La primer área usualmente no es difícil, ya que se relaciona con el mercado y la tendencia en los gustos del público; con la segunda área, se busca lograr un mayor cubrimiento y una mejor apariencia general además de obtener una superficie más atractiva y frecuentemente más durable; en la tercer área, se busca lograr un mejoramiento en las propiedades de aplicación, brillo, uniformidad, resistencia a la temperatura, a químicos, a la fricción y al rayado, impermeabilización, retención del color y durabilidad al exterior. Los campos principales de los acabados para madera sobre los que deben darse propiedades específicas son: acabados para exteriores, para pisos, para muebles y de uso marino (Brand *et al.*, 1960; Collier, 1967).

La tendencia a nivel mundial de la investigación en el área de acabados es particularmente activa en países como EE. UU., Francia, Alemania, Escandinavia, entre otros; en las investigaciones se busca: 1) mejorar la estabilidad de la superficie de la

madera, 2) combatir los efectos deletéreos del ambiente, como intemperización, rayos UV, oxidación, calor y polución y, 3) perfeccionar las propiedades de los productos de acabado. Para conocer la efectividad y durabilidad de los productos de acabado, existen varios tipos de cámaras de envejecimiento bajo condiciones de intemperismo acelerado, entre las cuales la “rueda” francesa tiene la ventaja de ser relativamente fiable y no muy costosa, el objeto de estos aparatos es determinar la vida potencial del acabado por medio de ciclos acelerados de rayos UV, calor y lluvia (Arnold *et al.*, 1991; Kauman, 1996).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo experimental se realizó en el Laboratorio de Anatomía de la Madera de la División de Ciencias Forestales en la Universidad Autónoma Chapingo en Chapingo, Estado de México y en las instalaciones del Campo Experimental “San Martinito” dependiente de Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicadas en San Martinito Tlahuapan, Puebla.

3.1. Características de las especies utilizadas como sustrato

***Alnus firmifolia* Fernald (aile, abedul, aliso)**

Árbol de 6 a 12 m de altura; tronco con la corteza gruesa, lisa y de color café grisáceo; ramillas glabras o ligeramente pilosas; hojas pecioladas, gruesas y coriáceas, elíptico-oblongas o elíptico-ovales, de 5 a 10 cm de largo. Se encuentra entre los 2800 y 3350 metros sobre el nivel del mar (msnm) en sitios con bosque de pino y oyamel, algunas veces también formando bosquecillos. Se distribuye desde el centro de México hasta Guatemala (Rzedowski y Rzedowski, 1979).

La madera de esta especie presenta textura fina, brillo medio, hilo recto, vetado suave y porosidad difusa. Las características anatómicas microscópicas de la madera de esta especie son: rayos uniseriados, de clase homogéneo, el contenido celular son cristales tipo drusas; las fibras son de tipo libriforme y fibrotraqueidas, de longitud mediana, diámetro fino y de espesor delgado, con las puntuaciones simples y areoladas; los vasos son solitarios y múltiples radiales de longitud mediana, diámetro pequeño y muy numerosos por mm^2 , con puntuaciones areoladas y alternas, platina escaleriforme; parénquima apotraqueal difuso.

La madera tiene una densidad básica de 0.39 gr/cm^3 y un peso específico verde de 1.079 gr/cm^3 . Su madera puede utilizarse para muebles, cajas de empaque, artesanías, pulpa para papel, madera en rollo para leña y combustible (Cevallos y Carmona, 1981). Las especies de este género están clasificadas como de alta estabilidad dimensional.

***Pinus patula* Schl. et Cham. (pino u ocote colorado)**

Es un árbol de 10 a 25 m de altura, de corteza escamosa y roja, sobre todo en la parte inferior del tronco; ramas colocadas irregularmente; ramillas rojizas y escamosas, con ligero tinte blanquecino en sus partes más tiernas. Las hojas están en grupos de 3, a veces 4, rara vez 5 en algunos fascículos, miden por lo común alrededor de 20 cm. La zona de vegetación de esta especie comprende Querétaro, Hidalgo, México, Puebla y Veracruz. Se ve en lugares templados y semicalidos de preferencia húmedos. En

Zacualtipan, Molango y Acaxochitlan (localidades del Estado de Hidalgo) es la especie que predomina y donde se le ve multiplicarse con facilidad y abundancia, por lo que parecen constituir esos lugares el centro de distribución de esta especie. Dentro de su ámbito natural el árbol alcanza una altura de hasta 35 m, con diámetro de hasta 90 cm, se distribuye en altitudes de 1500 a 3100 msnm con una precipitación media anual de 600 a 2500 mm (Martínez, 1992; Farjon *et al.*, 1997; Wright 1999).

La madera de esta especie no presenta diferencia de color entre albura y duramen, la madera temprana es castaña clara amarillenta y la tardía es castaña muy pálida; olor y sabor no característicos, brillo bajo, textura de fina a media, hilo recto, vetado pronunciado dado por los anillos de crecimiento. Los anillos de crecimiento están perfectamente delineados por una banda oscura de madera tardía y una banda clara de madera temprana, su anchura es homogénea, la madera temprana ocupa más de la mitad del total del anillo, la transición de temprana a tardía es gradual. Los rayos son visibles a simple vista en la cara transversal; presenta canales resiníferos. Sus características anatómicas microscópicas son: rayos de tipo homogéneo, poco numerosos por mm y muy bajos de altura; los rayos que no presentan canal son uniseriados y los que lo presentan son fusiformes de 2 a 3 series en la parte cercana del canal; las puntuaciones en los campos de cruzamiento son de tipo pinoide simple, las traqueidas de rayo son dentadas con canales radiales; con inclusiones de tipo resinas. Las traqueidas son largas, con diámetro tangencial del lumen de fino a mediano y grosor de la pared de muy delgado a delgado; sus caras radiales presentan una hilera de puntuaciones areoladas; los

canales longitudinales son poco numerosos por mm²; parenquima axial ausente (Cevallos y Carmona, 1981; Pérez y Olvera, 1981).

La madera tiene una densidad básica de 0.49 gr/cm³, aunque puede variar de 0.47 a 0.54 gr/cm³ de acuerdo con la procedencia de la especie, la contracción tangencial de estado verde hasta el 12% de CH es de 4.64 y la total de 9.19, su contracción radial de estado verde hasta el 12% de CH es de 2.70 y la total es de 5.51. Puede utilizarse en acabados de interiores y exteriores, bases para pisos, construcciones en general (estructuras y columnas), cajas para empaques, duela, chapa, triplay, tarimas, cancelas, postes para transmisión y pulpa para papel (Quiñónez, 1974; Candelario, 1980).

***Quercus insignis* Mart. et Gal. (encino)**

Esta especie pertenece al subgénero *Lepidobalanus* (*Leucobalanus*: encinos blancos) dentro de la serie *Insignes*. Es un árbol grande, de unos 30 m de altura, con un tronco hasta de 1 m de diámetro. Las hojas son caedizas, elípticas u oblongo-elípticas, a veces algo obovadas, gruesas y duras, acuminadas, de 10-28 cm de largo por 4-10 de ancho. En México, se encuentra distribuido desde el estado de Veracruz hasta la frontera con Guatemala y Belice (Martínez, 1981).

La madera tiene la albura de color castaño muy claro, duramen de color castaño pálido amarillento, olor no característico, sabor amargo, brillo mediano, veteado pronunciado, textura gruesa, hilo recto, porosidad semicircular, los rayos son poliseriados los cuales

pueden observarse a simple vista. Sus características anatómicas microscópicas son: la altura predominante de los rayos es mayor a 10 mm, los poros se encuentran en grupos de 2 o más en la madera temprana, en tanto que en la madera tardía los poros se encuentran sin arreglo con gran cantidad de tílides; la longitud de los vasos se clasifica como mediana, con puntuaciones alternas y placa perforada simple; las fibras son de tipo libriforme y fibrotraqueidas, de diámetro fino y el grosor de pared se clasifica como muy grueso; el parénquima axial es apotraqueal difuso agregado, pueden observarse taninos y cristales en el parénquima axial, aceites y/o gomas en las fibras (Machuca, 1995; Velázquez y Martínez, 1999).

La madera tiene una densidad básica de 0.70 gr/cm^3 clasificada como alta, la densidad al 12% de CH es de 0.87 gr/cm^3 , la contracción tangencial al 12% de CH de 8.8% se clasifica como muy alta, la contracción radial al 12% de CH de 3.38 se clasifica como alta, la relación de anisotropía de 2.18 se clasifica como alta. Presenta un coeficiente de hinchamiento de 0.71%, el punto de saturación de la fibra de 28.68%; con base en estas características la madera se clasifica como pesada y muy contractil. La madera puede utilizarse en pisos, cajas de empaque, embalaje y tarimas, mangos para herramientas y durmientes (Machuca, 1995).

3.2. Características físicas de los barnices probados

Los barnices probados utilizados como acabados fueron dos, ambos de tipo poliuretano alifático para exteriores de la marca comercial Polyform®, sus características físicas de elaboración se detallan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Características físicas de los barnices probados.

Característica	Barniz brillante 7000	Barniz intemperie 11000
Tipo de acabado	Brillante	Brillante, semimate y mate
Tipo de resina	Poliuretano alifático	Poliuretano alifático
Aspecto del envase	Líquido viscoso transparente	Transparente
Presentación del producto	Un componente	Dos componentes
Solvente	THV, Thinner 17000 y 250	Thinner 250 y 17000
Acelerador	No. 7 000	
Reactor		Catalizador 250
Relación de la mezcla		3 partes de resina por 1 de catalizador 250 en volumen
Rendimiento teórico por litro	20 m ² a 1 mil. de pulgada	30 m ² a 1 mil. de pulgada
Tiempo de secado al tacto	30 min. a 1 hora	2 a 4 horas
Tiempo para repintado	2 a 5 horas	2 a 4 horas
Tiempo de gelado	8 horas	8 horas
Tiempo de fraguado	7 horas a 3 días	5 días
Forma de aplicación	Brocha, rodillo o pistola	Brocha, rodillo o pistola
Contenido de sólidos	50% ± 1	69% ± 1
Viscosidad	200-300 Centipoises (cps.)	100-300 Centipoises (cps.)
Densidad	1.01-1.03 g/cm ³	0.98-1.0 g/cm ³
Ph	7 ± 0.5	7 ± 0.5
Dureza	40 en el Sward Rocker Hardness, usando una placa de vidrio estándar de 100	68 en el Sward Rocker Hardness, usando una placa de vidrio estándar de 100
Brillo	Su reflexión a la luz es de 100 comparada a 94 de la placa patrón de vidrio.	Su reflexión a la luz es de 100 comparada a 94 de la placa patrón de vidrio.

3.3. Descripción del equipo utilizado

La prueba acelerada de intemperismo se realizó en un equipo fabricado con base en las características que especifica el Reglamento Técnico del Centro Técnico de la Madera de Francia (Figura 1), dicho equipo consiste en una rueda con un diámetro de 1.5 m, con una velocidad de giro de una vuelta por cada 1.5 hr, fue accionada por un motor industrial de dos fases de $\frac{1}{4}$ de HP y para reducir la velocidad de giro (rpm), se le adaptó un motoreductor de $\frac{1}{4}$ de HP, de 115 Volts, 50/60 HZ. y 4.8 AMP. Dado que la rueda trabajó las 24 horas del día durante 4 meses, para evitar que el motor se sobrecalentará le fue adaptado un ventilador el cual se encendía por 15 minutos cada tres horas.



Figura 1. Equipo utilizado para simular los efectos del intemperismo natural.

La rueda consta en su parte superior de 6 lámparas que emiten luz ultravioleta de 300 watts marca OSRAM, tipo ULTRA-VITALUX®, casquillo E 27, accionadas con 220 volts de energía, cada lámpara se compone de un quemador de cuarzo y de un filamento

incandescente de wolframio, que estan de tal manera acompasados, que junto con una ampolla especial con reflector interior, proporciona una radiación muy parecida en sus efectos a la luz del sol; la forma en que se colocaron fue en posición perpendicular con respecto a las probetas, con un distanciamiento entre ellas de 45 cm y entre cada lámpara y las probetas de 32 cm, con estas lámparas se logra simular los efectos que ocasionan en la madera los rayos ultravioleta del sol cuando esta se expone a la intemperie. En la parte inferior se le adaptó una tina trapezoidal de lamina galvanizada con capacidad de 200 litros, a esta tina se le agregó agua destilada con el fin de simular el efecto que produce la humedad de la lluvia en la madera cuando ésta es utilizada en exteriores.

3.4. Preparación del material de ensayo

La madera de las tres especies utilizadas para la obtención de las probetas de ensayo que se utilizaron como sustrato, fue seleccionada de un lote de madera aserrada debidamente clasificado, se cuidó que presentara el mínimo de defectos en cuanto a rajaduras, grietas, nudos y bolsas de resina, así mismo, las probetas se obtuvieron de tablas de corte tangencial, radial y mixto. Las dimensiones de las probetas fueron de 1 x 10 x 30 cm. Una vez que se tuvieron las probetas a las dimensiones indicadas, se lijaron utilizando una lijadora portátil de banda y una lija del número 100 con el fin de preparar la superficie para la aplicación de los productos de acabado probados. A cada probeta le fue asignada una clave para su identificación y así evitar cometer error durante las evaluaciones.

Antes de la aplicación del barniz, para poder determinar tanto el nivel de retención como el espesor de película del acabado, todas las probetas fueron pesadas con una báscula eléctrica digital con precisión a centésimas de gramo, el espesor de las probetas fue medido en la parte media en cada uno de sus cuatro lados con un vernier eléctrico digital con precisión a diezmilésimas de milímetro.

Las probetas fueron barnizadas por el mismo fabricante de los productos, esto para reducir el error que pudiera cometerse por realizar una aplicación inadecuada; el proceso de barnizado fue por medio de brocha, aplicándose cuatro capas en ambas caras así como en los costados laterales de todas y cada una de las probetas, en los extremos o cabezales de las probetas se aplicaron seis capas, con el fin de dar una mayor protección contra la absorción de agua, además de que por el tipo de corte, se presenta una mayor dificultad para el sellado. Con el fin de obtener una viscosidad de aplicación adecuada, los barnices se adelgazaron con thinner 17000, agregando un 25% de este producto. Se aplicaron dos capas por día, con intervalos de cuatro horas; para lograr una mejor adherencia entre capas, se acentó solo en el lapso entre día y día con lija de agua número 240.

3.5. Determinación del espesor de película y nivel de retención del acabado

Una vez barnizadas las probetas, se procedió primeramente a determinar el espesor de película y el nivel de retención alcanzado por cada barniz en las tres especies utilizadas. Para ello, se volvió a tomar para cada probeta con el mismo equipo especificado anteriormente sus valores de espesor y peso. Con los datos de espesor antes y después de

la aplicación del acabado, se obtuvo por diferencia el espesor total alcanzado en mm para cada barniz probado en cada madera utilizada como sustrato. Con los datos de peso, también por diferencia entre estos y dividiendo entre la superficie total de la probeta, se determinó el nivel de retención total alcanzado en gr/cm^2 para cada barniz probado en cada madera utilizada como sustrato.

Con los datos obtenidos de estas mediciones se realizó una comparación de medias utilizando el método de Tukey, considerando un nivel de significancia del 5%. Para hacer el análisis de la comparación de medias, se utilizó el paquete SAS (Statistical Analysis System), el análisis se realizó para los factores: especie, densidad básica, textura y tipo de barniz, considerando como variable respuesta la retención total del acabado y el espesor total de película.

3.6. Método de ensayo

Los dos barnices probados y las tres especies usadas como sustrato conformaron seis tratamientos de acabado, se utilizó un total de 42 probetas barnizadas, correspondiendo 14 probetas por especie y 7 para cada tipo de barniz, teniendo de esta forma 7 repeticiones para cada tratamiento. Las probetas se montaron en la periferia de la rueda de manera intercalada, es decir, se colocó una probeta de aile, una de pino y una de encino acabadas con el barniz 7000 y, enseguida una probeta de aile, una de pino y una de encino acabadas con el barniz 11000, éstas fijaron con la ayuda de baguetas de aluminio y tornillos galvanizados.

El proceso cíclico de intemperismo acelerado a que fueron sometidas las probetas fue el siguiente:

12 minutos de inmersión en la tina con agua destilada a una temperatura promedio de 16 °C,

27 minutos al aire libre a una temperatura promedio de 20 °C y a una humedad relativa promedio del 35%,

24 minutos de exposición a luz ultravioleta emitida por las seis lámparas a una temperatura promedio de 48 °C y,

27 minutos al aire libre a una temperatura promedio de 25 °C y a una humedad relativa promedio del 35%.

Las evaluaciones se realizaron cada 100 horas de exposición a las condiciones mencionadas, se hicieron tantas evaluaciones hasta que la falla por apariencia fuera próxima o mayor al 10% con respecto al total de la superficie de la probeta, esto debido a que el fabricante de los productos recomienda dar un mantenimiento o reacabado cuando se tenga un 10% de degradación del acabado. De esta manera, cada evaluación consistió en determinar el porcentaje de la superficie del barniz degradado y el porcentaje de falla en la adhesión en la línea de pegado acabado-madera. Las evaluaciones se

realizaron directamente sobre la rueda, solo para la última evaluación todas las probetas fueron desmontadas; a cada una de ellas se les determinó su peso con el fin de determinar la cantidad de agua absorbida durante el proceso de intemperismo y así poder analizar el efecto de la humedad en la degradación del acabado.

3.7. Determinación del porcentaje de la superficie del barniz degradado

Para determinar el porcentaje de la superficie del barniz degradado, primero se elaboraron cuadrículas cada 1 x 1, 2 x 2 y así hasta cada 10 x 10 mm impresas en acetatos tamaño oficio. El tamaño de cada cuadrícula fue el mismo que el de las probetas, es decir, de 10 cm de ancho por 30 cm de largo. Con el propósito de facilitar la cuantificación del área del acabado degradado, el uso de las cuadrículas estuvo en función del tamaño en ancho de las áreas del barniz degradado, de tal manera que se usó aquella cuadrícula que mejor se ajustara al ancho de estas áreas degradadas, de esta forma, sobreponiendo la cuadrícula sobre la probeta se cuantificó en mm^2 la superficie degradada. Con estos valores se estimó por probeta el porcentaje de la superficie de barniz degradado con respecto a la superficie total de la probeta que fue de 30000 mm^2 .

3.8. Determinación del porcentaje de falla en la adhesión

Esta determinación realizada en la línea de pegado acabado-madera se llevó a efecto con cinta adhesiva tipo diurex de alta adherencia, se cortó una tira de cinta para cada probeta y esta se colocó en dirección del grano de la madera en el centro de la probeta, la forma en que se colocó fue aplicando presión sobre la tira en la probeta solo con el dedo pulgar en un área aproximada de 645.16 mm^2 y posteriormente fue desprendida de un tirón, se tomó una sola muestra para cada probeta en cada evaluación. Todas y cada una de las tiras de la cinta desprendida identificadas por probeta (madera y barniz), se colocaron en hojas tamaño oficio de papel milimétrico tipo albanene, de esta forma se cuantificó en mm^2 el barniz o el barniz más la madera que se desprendió y que se quedó adherido a la cinta, con estos valores se estimó el porcentaje de falla de adhesión con respecto a el área indicada para cada probeta. El porcentaje de falla de adhesión después de la primera evaluación fue acumulativo para las evaluaciones posteriores, es decir, al porcentaje de falla obtenido en la segunda evaluación se le sumó el obtenido en la primera, y esta segunda se le sumó a la tercera y así enseguida hasta llegar a la última evaluación.

Los datos observados tanto en falla por apariencia cuantificando la degradación del acabado como en la falla en la adhesión fueron analizados y ajustados utilizando el modelo no lineal de distribución acumulativa de Weibull en el paquete SAS, los datos en porcentaje se cambiaron a proporciones dividiendo cada uno de estos entre 100.

La razón de utilizar el modelo de Weibull es porque proporciona una excelente aproximación a la ley de probabilidades de muchas variables aleatorias y su principal área de aplicación ha sido como un modelo para estimar el tiempo de falla de componentes y sistemas (Hines y Montgomery, 1997).

La función del modelo de distribución acumulativa de Weibull está definida por:

$$Fx(t) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right\} \quad (1)$$

Donde:

$Fx(t)$: Proporción de falla en el tiempo de exposición t .

t : Tiempo de exposición en horas.

α : Parámetro de escala.

β : Parámetro de forma.

Mediante la apropiada selección de los valores en los parámetros de escala y forma, esta función de densidad se aproxima de manera muy cercana al fenómeno observacional en estudio en el presente trabajo.

Con los datos ajustados, se procedió a determinar el tiempo en horas en que se alcanza el 10% de degradación del acabado para cada tipo de barniz y especie, la ecuación utilizada y que se deriva del modelo de Weibull fue la siguiente:

$$t = \alpha \left\{ \ln \left(\frac{1}{1 - Fx(t)} \right) \right\}^{\frac{1}{\beta}} \quad (2)$$

Como el fabricante recomienda dar mantenimiento al acabado cuando se observe una degradación de la superficie del 10%, este representa la proporción de falla para el tiempo de exposición t , quedando la ecuación como sigue:

$$t = \alpha [Ln(1.11)]^{\frac{1}{\beta}} \quad (3)$$

Finalmente, la vida útil de los productos de acabado se estimó en horas con su correspondiente equivalencia en años, utilizando el tiempo en que se alcanza el 10% de degradación del acabado y con base en lo reportado por Podgorski *et al.* (1996), quien indica que 1 hora de exposición bajo condiciones de intemperismo artificial en la rueda francesa equivale a 10 horas bajo condiciones de intemperismo natural.

Las lámparas se cambiaron cada 400 horas con el objeto de tener una distribución de la luz homogénea y así ayudar a que la vida útil de estas se prolongará lo más posible, la vida útil estimada por el fabricante es de 1 000 horas. El agua que se utilizó fue destilada como lo señala el Centro Técnico de la Madera de Francia, y se cambió cada 400 horas con el fin de evitar que esta se tornara viscosa y amarillenta, periódicamente se le determinó el pH el cual siempre se mantuvo en un valor de 5.5.

Durante el desarrollo del experimento para llevar un control y registro de las condiciones ambientales del laboratorio, se tomaron periódicamente datos de la humedad relativa; así mismo para conocer las condiciones a que se sometieron las probetas, se tomaron datos de la temperatura en el espacio ocupado por las lámparas así como del agua y del espacio al aire libre en que se desplazaban las probetas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Espesor de película y nivel de retención del acabado

Los resultados del espesor de película y nivel de retención para cada barniz probado en cada madera se muestran en el Cuadro 5. En el Cuadro 6 se presentan los resultados obtenidos estadísticamente al realizar la prueba de comparación de medias de Tukey para las variables: especie, densidad básica, textura y tipo de barniz en los parámetros espesor de película y nivel de retención de los barnices probados.

Cuadro 5. Espesor de película y retención del acabado de cada barniz por especie.

Cuadro 3. Espesor de película y Retención del acabado de cada barniz por especie.					
Especie	E.V.	Espesor de película (mm)		Retención (gr/m ²)	
		Tipo de barniz			
		11000	7000	11000	7000
<i>Alnus firmifolia</i> (aile)	74.50	0.1018	0.1413	96.25	78.12
<i>Pinus patula</i> (pino)	67.33	0.0930	0.0701	92.62	73.16
<i>Quercus insignis</i> (encino)	44.75	0.0757	0.1028	57.52	49.51

E.V.:Espacios vacíos expresado en porciento.

En el parámetro de espesor de película, se observa que la madera de aile tiene los valores más altos para ambos tipos de barnices y presenta diferencia estadística significativa en cuanto a textura y densidad básica en comparación con el pino y encino, en tanto que entre estas dos últimas maderas no existe tal diferencia; este resultado

coincide en parte con los reportados por Flores *et al.* (1996) y Tamarit *et al.* (1998), quienes indican que este comportamiento puede ser atribuido y explicado por el hecho de que las maderas de textura fina y de baja densidad, tienen una mayor estabilidad dimensional y los elementos constitutivos son pequeños y se encuentran ordenados de manera homogénea, además de que poseen mayor porcentaje de espacios vacíos y en consecuencia una menor proporción de pared celular, lo anterior permite una mejor preparación de la superficie sobre la que se aplicará el acabado, dejándola más tersa y uniforme. Con base en lo anterior, se esperaría que el aile presentara también la mayor vida útil del acabado en comparación con el pino y encino que tienen mayor densidad y diferente textura.

Cuadro 6. Espesor de película y retención para las variables estudiadas.

Variable	Espesor de película (mm)		Nivel de retención (gr/m ²)	
Especie:	DSH = 0.0151		DSH = 5.9174	
Aile	0.1215	a	87.18	a
Pino	0.0815	b	82.90	a
Encino	0.0892	b	52.52	b
Textura:	DSH = 0.0151		DSH = 5.9174	
Fina	0.1215	a	87.18	a
Media	0.0815	b	82.90	a
Gruesa	0.0892	b	52.52	b
Densidad básica:	DSH = 0.0151		DSH = 5.9174	
Baja de 0.39	0.1215	a	87.18	a
Media de 0.49	0.0815	b	82.90	a
Alta de 0.70	0.0892	b	52.52	b
Barniz:	DSH = 0.0103		DSH = 4.0269	
Tipo 11000	0.0901	a	82.13	a
Tipo 7000	0.1047	b	66.93	b

DSH: Diferencia Significativa Honesta.

Medias con letras iguales son estadísticamente iguales.

Con relación al parámetro de nivel de retención, se observa que el encino presenta los valores más bajos para ambos tipos de barnices y existe diferencia estadística

significativa para las variables textura y densidad básica en comparación con el pino y aile, mientras que entre estas dos últimas no existe tal diferencia. Este comportamiento coincide con lo reportado por Wang y DeGroot (1996) que explican que esto es debido en parte a que el encino por pertenecer al grupo *Leucobalanus* (encinos blancos), que se caracterizan por que poseen una baja permeabilidad, es decir, que el paso y movimiento de los líquidos entre sus elementos constitutivos es lenta ya que contienen tálides que obstruyen el libre paso de tales líquidos, por lo que al aplicar el acabado, éste no penetró en la superficie de la madera; aunado a lo anterior, el hecho de que esta madera presente una alta densidad y por lo tanto una menor proporción de espacios vacíos, influyó de manera determinante para que se tuviera una baja retención.

Los dos tipos de barnices probados, también presentan diferencia estadística significativa tanto para el parámetro espesor de película como para el nivel de retención, en el caso del barniz 11000, presentó el menor espesor de película y el mayor nivel de retención en comparación con el barniz 7000, esto es debido a que las características físicas proporcionadas durante el proceso de elaboración fueron diferentes en cada barniz, principalmente el contenido de sólidos y densidad.

4.2. Falla en apariencia por degradación del acabado

En el Cuadro 7 se presentan los valores medios cada 200 horas de exposición de la falla por apariencia por especie obtenidos para los barnices 11000 y 7000.

Cuadro 7. Valores medios en mm² de falla por apariencia por especie y barniz en función del tiempo de exposición en horas.

Tiempo (hr)	Aile		Pino		Encino	
	11000	7000	11000	7000	11000	7000
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400	0.00	0.00	0.00	0.86	0.00	0.00
600	0.57	3.29	0.00	10.57	0.86	13.29
800	0.71	5.57	0.00	21.14	3.57	19.86
1000	1.43	6.43	0.71	76.71	5.43	24.14
1200	2.00	7.71	2.14	180.29	6.71	25.71
1400	3.14	11.00	6.43	275.29	7.71	31.86
1600	5.00	18.00	10.43	417.43	9.14	36.57
1800	8.14	54.86	17.14	563.57	11.00	41.43
2000	11.43	120.00	30.00	741.86	16.29	55.71
2200	17.29	317.00	59.29	1197.71	27.43	77.57
2400	21.00	566.29	83.86	1453.86	34.00	99.57
2600	27.14	857.86	111.14	1888.43	58.00	133.57
2800	32.43	1326.57	126.43	2576.43	78.57	181.57
3000	39.57	1854.00	141.14	3049.00	94.43	235.43
3200	47.86	2752.43	168.86	3837.29	136.86	320.29
3400	54.57	3965.57	243.00	5032.71	169.71	493.57
3600	68.71	4938.57	322.14	5972.29	219.71	631.43
3800	91.43	6065.00	353.71	6890.14	252.57	833.29
4000	169.71	7311.71	710.14	8114.00	352.00	1147.14
4200	909.29	10413.00	1301.29	10807.00	1036.43	2275.71
4300	1572.43	12268.57	1662.43	12488.86	1759.57	2962.71

Los valores observados completos para este parámetro se presentan en el Anexo 1. En la Figura 2 se muestra la apariencia de las probetas antes y después de realizar el experimento de intemperismo acelerado.

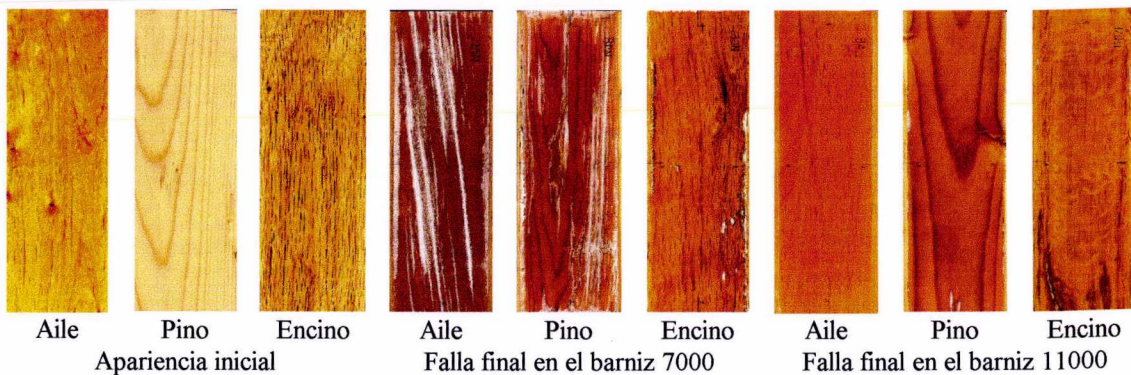


Figura 2: Apariencia inicial y falla final por apariencia de los acabados en madera de aile, pino y encino

En el Cuadro 7 y Figura 3 puede observarse para el barniz 11000 que hasta las 400 horas de exposición aún no se presentaba degradación del acabado en ninguna de las probetas de las tres maderas utilizadas como sustrato. Es a partir de las 500 horas cuando el acabado en madera de aile empieza a presentar una ligera degradación, por su parte el acabado en pino y encino comenzó a degradarse hasta las 1000 y 600 horas de exposición respectivamente.

Antes de estos tiempos solo se observó en todas las probetas cambios en los tonos de coloración como resultado de la fotooxidación en la madera por efecto de los rayos UV, lo cual coincide con lo señalado por Feist y Hon (1984); Sell y Feist (1986a); Williams y Feist (1993a), quienes indican que la superficie de la madera cambia de coloración al poco tiempo de exposición al intemperismo para después permanecer casi sin alteraciones. Estos cambios de coloración fueron más marcados en las probetas acabadas con el barniz 7000 que con el 11000, lo cual se explica por el hecho de que el primero tiene un menor contenido de sólidos lo que implica una menor protección contra los rayos UV.

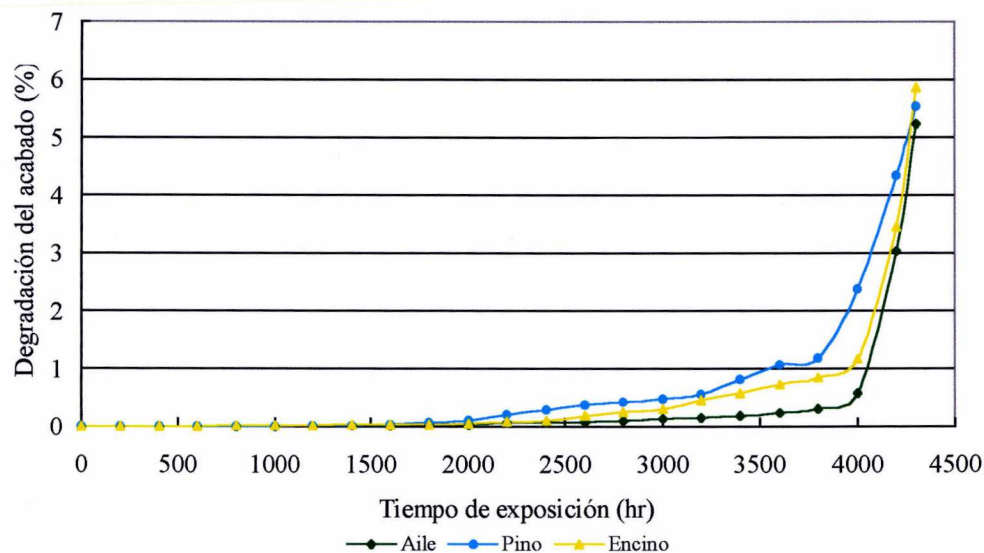


Figura 3. Comportamiento de la degradación del acabado del barniz 11000 en madera de aile, pino y encino.

El resultado en la fase inicial del comportamiento de degradación del acabado es opuesto a lo esperado y señalado por Feist (1984); FPL (1987); Knaebe (1995), ya que el aile al ser una madera de baja densidad, textura fina e hilo recto, además de que presentó el mayor espesor de película y el mayor nivel de retención, fue la primera que empezó a fallar en comparación con la madera de pino y encino que poseen mayor densidad y diferente textura además de que presentaron menores valores de espesor de película y nivel de retención, todas estas, condiciones desfavorables para brindar un acabado que garantice mayor protección contra los efectos del intemperismo tanto en la madera como en el acabado mismo.

Este comportamiento puede deberse al hecho de que la falla del acabado se presentó básicamente en pequeños nudos en donde forzosamente se tiene desviación del hilo y

mayor densidad. Lo anterior es una explicación lógica toda vez que después de las 1200 horas de exposición, pudo observarse que la degradación del acabado en madera de pino y encino se incrementó marcadamente superando al aile, lo cual coincide con lo señalado por el FPL (1987), en el sentido de que el efecto de la estructura de la madera cobra importancia cuando el acabado con el transcurso del tiempo empieza a fallar, determinándose así la rapidez de degradación de este, constatándose de esta manera el supuesto de que maderas de baja densidad, textura fina e hilo recto retienen mejor el acabado y dan una mayor durabilidad.

La degradación del acabado para el caso del barniz 11000 en madera de pino se observó que inició en áreas internas de las probetas, principalmente en zonas de transición entre madera temprana y tardía en forma de pequeñas fisuras delgadas y alargadas. La falla del acabado no se inició en los cabezales como lo reporta Flores (1999), esto debido a la mayor protección contra la humedad que se dio a estas partes al aplicarse seis capas del producto, ya que de lo contrario estos extremos tomarían y cederían humedad rápidamente, lo que ocasionaría esfuerzos de contracción y expansión en la madera y en consecuencia un desplazamiento y ruptura del acabado. Por su parte la degradación del acabado en madera de encino inició primeramente en nudos, rayos abiertos y pequeñas rajaduras.

Pudo determinarse que las probetas presentaron menor peso y por tanto menor contenido de humedad al final del experimento con relación a cuando éste se inició, este hecho puede explicarse a que el calor generado por las lámparas fue suficiente para desecar la

madera y contrarrestar la humedad ganada al pasar por el agua, factor que favoreció para que la degradación final del acabado no fuera superior al 6%. La madera de encino, seguida del aile y pino presentaron en este orden la mayor pérdida de humedad.

En el mismo Cuadro 7 y Figura 4 puede observarse para el barniz 7000 que hasta las 300 horas de exposición aún no se presentaba degradación de la película del acabado, solo cambio en la coloración de la madera como resultado de la fotooxidación inducida por los rayos UV lo cual coincide con lo señalado por Feist (1982); Feist y Hon (1984); Feist (1994). Es a partir de las 400 horas cuando el acabado en madera de pino empieza a presentar una ligera degradación, en tanto que en el aile y encino, ésta degradación dio inicio a partir de las 500 horas de exposición, siendo mayor en esta última especie.

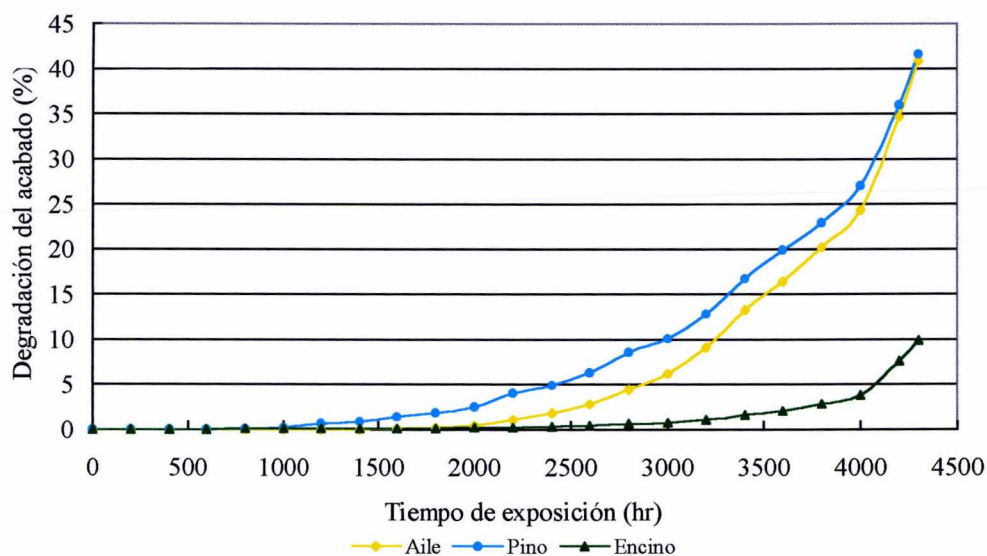


Figura 4. Comportamiento de la degradación del acabado del barniz 7000 en madera de aile, pino y encino.

Hasta las 1400 horas de exposición, todas las probetas aun no alcanzaban el 1% de degradación del acabado, sin embargo, a las 3000 horas, el pino ya había rebasado ligeramente el 10% de degradación, mientras que el encino apenas superaba ligeramente el 1% y el aile se encontraba en el 6%.

Este resultado es contrario al esperado, ya que la degradación del acabado en encino siempre fue menor comparativamente con el del aile y pino, aún a pesar de que esta madera posee alta densidad y textura gruesa; la explicación de este comportamiento puede atribuirse al hecho de que la especie a la que pertenece esta madera es del grupo denominado Leucobalanus o encinos blancos, los cuales se caracterizan por presentar una gran cantidad de tílides en sus vasos, además de que esta especie en particular contienen gran cantidad de extractivos consistentes en taninos y cristales en el parénquima axial, así como gomas y aceites en sus fibras.

Todos estos elementos constitutivos de esta madera, contribuyeron a que fuera menos permeable ya que las punteaduras se encuentran obstruidas, por lo que el flujo, movimiento e intercambio de humedad se limitó y redujo al mínimo, coincidiendo con lo reportado por Sell y Feist (1986b); Williams (1987); Feist (1988a); Williams *et al.* (1990); Kalnins y Feist (1993), en el sentido de que los extractivos tienen una influencia significativa en la capacidad de humedecimiento y es solo hasta que estos han sido fotooxidados y lixiviados cuando se presenta una alta capacidad de humedecimiento y se manifiesta una alta inestabilidad dimensional, provocando hasta ese momento la falla del acabado.

Comparando la degradación del acabado entre la madera de pino y aile, se tiene que el comportamiento fue muy similar, siendo siempre mayor para el pino, lo cual es un resultado que coincide con lo señalado por Feist (1983); Feist (1984); FPL (1987); Mockus-Lubin *et al.* (1986); Williams y Feist (1993a); Alegri (1994); Knaebe (1995), ya que el pino tiene mayor densidad y textura media, además no presenta porosidad y en cambio si tiene canales resiníferos y bolsas de resina, siendo estas dos últimas características las que le contrarrestaron una mejor retención del acabado. Al final del experimento, a las 4300 horas de exposición, ambas especies superaron ligeramente el 40% de degradación del acabado, en tanto que el encino se aproximó de forma muy cercana al 10% de degradación.

La degradación inicial del acabado para el pino comenzó en los canales resiníferos y en los extremos laterales sobre la línea de transición entre la madera temprana y tardía, para después extenderse hacia las partes del primer tipo de madera, lo cual comprueba lo señalado por Richarson (1978); FPL (1987); Williams *et al.* (1987); Williams y Feist (1993b), en el sentido que con el intemperismo la madera temprana se degrada más rápidamente que la tardía. La degradación del acabado en encino ocurrió primeramente en la parte de nudos pequeños, rayos abiertos y rajaduras, mientras que en aile la falla del acabado se presentó en pequeños nudos y fue perceptible el grano levantado el cual es indicativo de absorción de agua como lo señala Nicholas (1973); Sell y Feist (1986a).

La falla del acabado en pino en estas partes coincide con lo reportado por Richardson (1978); Feist (1983); Feist (1984); Sell y Feist (1986a); Knaebe (1995); Flores (1999); en donde en estas partes de la madera se presenta el mayor intercambio de humedad lo que ocasiona esfuerzos que conllevan a la ruptura de la película del acabado. La falla posteriormente continuó en los costados laterales y en partes internas de las probetas, la cual se acompañó de rajaduras profundas en la madera, lo que favoreció que al final la degradación fuese mayor en esta madera que en aile y encino.

La falla del acabado para la madera de aile se presentó en forma de pequeñas fisuras delgadas y alargadas tanto en los cabezales como en partes internas de las probetas, las cuales a medida que transcurría el tiempo, éstas aumentaban rápidamente en longitud uniéndose con otras fisuras. En encino en cambio, la falla después de presentarse en nudos, rayos y rajaduras, continuó en los extremos laterales justo en la zona de contacto entre las baguetas y la madera, para después extenderse sin interrupción hacia las zonas internas provocando un severo manchado de las áreas del acabado y madera afectadas.

Con relación a la influencia de la humedad en la degradación del acabado, se observó una relación directa ya que para el acabado en madera de pino y aile quienes presentaron la mayor degradación, también tuvieron una mayor absorción de humedad, lo que coincide con Richardson (1978); Feist (1984); Sell y Feist (1986a); FPL (1987); Knaebe (1995), quienes indican que la expansión y contracción de la madera ocasionados por el intercambio de humedad conllevan a la formación de esfuerzos que rompen la película del acabado, permitiendo la entrada de agua por capilaridad, la cual se va acumulando

con el consecuente y constante deterioro tanto del acabado como de la madera. Para el encino, en cambio, debido a que la degradación fue menor, en éste en lugar de ganar, perdió humedad debido principalmente a que la temperatura alcanzada en la zona de las lámparas logró eliminar tanto el agua absorbida como la contenida en la madera misma.

4.3. Falla del acabado por perdida de adhesión

En el Cuadro 8 se presentan los valores medios cada 200 horas de exposición de la falla por adhesión para especie obtenidos para los barnices 11000 y 7000. Los valores observados completos para este parámetro se presentan en el Anexo 2.

En el Cuadro 8 y en la Figura 5 puede observarse para el acabado con el barniz 11000 que hasta las 800 horas de exposición aún no se presentaba falla por perdida de adhesión en la línea de pegado acabado-madera. Es a partir de las 900 horas cuando el aile presentó una muy ligera falla la cual se mantuvo igual hasta el final del experimento. Por su parte el acabado en pino falló hasta las 1400 horas, mientras que el encino fallo hasta las 900, el cual a diferencia del aile, la falla se fue incrementando gradualmente conforme transcurrió el tiempo de exposición.

Cuadro 8. Valores medios en mm² de falla por adhesión por especie y barniz en función del tiempo de exposición en horas.

Tiempo (hr)	Aile		Pino		Encino	
	11000	7000	11000	7000	11000	7000
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00
600	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	1.00
800	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	1.57
1000	0.29	0.43	0.00	18.71	0.29	2.86
1200	0.29	0.43	0.00	31.86	0.43	4.14
1400	0.29	0.43	0.00	39.71	2.00	5.00
1600	0.29	0.43	0.00	73.71	4.00	8.43
1800	0.29	0.86	0.00	108.14	9.29	11.14
2000	0.29	1.43	0.00	132.57	10.86	14.57
2200	0.29	6.71	0.00	168.43	17.86	17.57
2400	0.29	13.86	1.43	199.71	27.57	19.71
2600	0.29	35.29	6.43	246.14	38.57	22.71
2800	0.29	53.00	10.00	275.71	47.57	24.14
3000	0.29	76.29	11.86	309.00	53.00	26.00
3200	0.29	108.57	14.29	338.00	58.00	29.29
3400	0.29	138.00	19.57	379.29	62.29	32.57
3600	0.29	170.29	22.43	408.71	64.29	38.00
3800	0.29	196.43	25.43	440.71	69.57	40.57
4000	0.29	218.86	27.57	461.71	71.29	42.57
4200	0.29	249.43	29.57	497.86	74.71	46.86
4300	0.29	272.14	30.71	522.57	78.43	49.14

El comportamiento general de la falla por pérdida de adhesión coincide con lo señalado por Feist (1984); Williams *et al.* (1987); Williams *et al.* (1993b); Knaebe (1995), en el sentido de que especies de baja densidad y textura uniforme retienen mejor los acabados que aquellas de alta densidad y de textura áspera, además de que la adhesión está determinada por la naturaleza física y química de la superficie, ya que la madera de

encino presenta un alto contenido de extractivos, en tanto que la de pino tiene canales resiníferos, bolsas de resina y bandas anchas de madera temprana, factores que afectaron directamente para que la unión entre el acabado y la madera de estas dos especies fuera baja alcanzando al final del experimento un 12.16 y 4.76% de pérdida de adhesión respectivamente.

En tanto, en la madera de aile por poseer baja densidad, textura fina e hilo recto, además de que presentó los más altos valores de espesor de película y retención del acabado, favorecieron para que la falla total por perdida de adhesión fuera apenas del 0.04%.

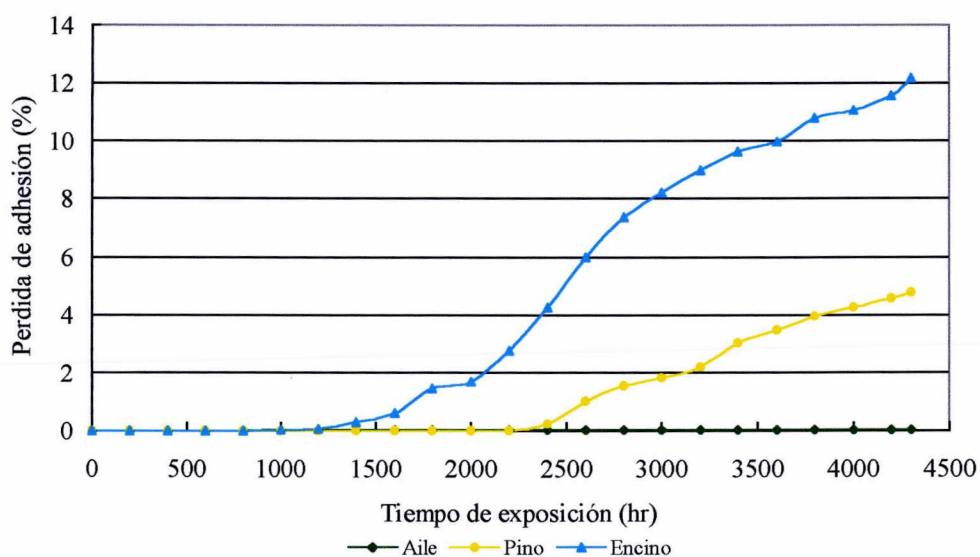


Figura 5. Comportamiento de la falla en adhesión del barniz 11000 en madera de aile, pino y encino.

Los resultados de falla por perdida de adhesión guardan una relación estrecha con aquellos de falla por degradación del acabado, pudo observarse que en tanto no se presentara esta última en la zona en que se efectuó la prueba de la primer falla, ésta

tampoco se manifestaba. De la misma forma, los niveles de falla alcanzados son relativamente bajos comparativamente con los alcanzados con el acabado del barniz 7000 situación que coincide con Williams *et al.* (1987); Williams y Feist (1993b), quienes indican que esta situación se atribuye más a las características físicas de elaboración de los productos de acabado que a las diferencias de las maderas utilizadas como sustrato.

En el mismo Cuadro 8 y Figura 6 se observa para el acabado formado por el barniz 7000 que la falla por pérdida de adhesión inició primeramente en la madera de aile a las 400 horas de exposición, en tanto que en pino y encino se presentó hasta las 900 y 500 horas respectivamente. Aún cuando la falla se presentó primero en aile, se puede observar que esta siempre fue menor que la de pino y encino hasta las 2500 horas, pero a partir de este tiempo superó al encino pero se mantuvo por debajo del pino.

Este comportamiento es contrario al esperado y al observado con el acabado formado con el barniz 11000, sin embargo guarda una estrecha relación con el comportamiento observado en la falla por degradación para el barniz 7000, con las respectivas explicaciones y observaciones ya mencionadas, además del hecho de que en tanto no se presentara la falla por degradación, la falla por pérdida de adhesión tampoco se manifestaba. Al final del experimento, los niveles de pérdida de adhesión alcanzados fueron de 81.0, 42.1 y 7.6% para los acabados en la madera de pino, aile y encino respectivamente.

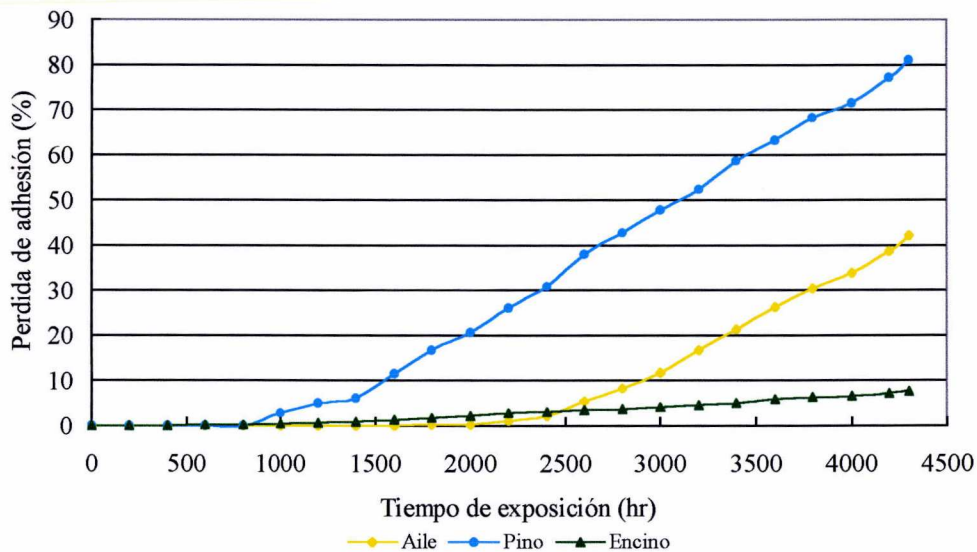


Figura 6. Comportamiento de la falla en adhesión del barniz 7000 en madera de aile, pino y encino.

Un factor adicional que explica el hecho de que el pino presentara el mayor nivel de falla por pérdida de adhesión, es que este presentó bandas anchas de madera temprana, lo cual de acuerdo con Williams *et al.* (1987); Williams *et al.* (1990); Williams y Feist (1993b), este tipo de madera se degrada más rápidamente que la tardía, lo que conlleva a que en esta última la unión con el acabado sea más fuerte por estar menos intemperizada. Del mismo modo, estos autores citan que en especies de mayor densidad la resistencia de la adhesión se incrementa con el tiempo, lo cual se apega al comportamiento de pérdida de adhesión observado para el acabado en encino.

4.4. Estimación de la vida útil de los acabados del barniz 11000 y 7000

Los valores observados fueron ajustados aplicando el modelo no lineal de Weibull, en el Cuadro 9 se muestran los valores de los parámetros escala y forma para cada especie y barniz, en tanto que en la Figura 7 se presenta el comportamiento de la degradación del acabado para cada tratamiento hasta las 6000 horas de exposición. En el Anexo 3, se muestran gráficos individuales para cada tratamiento y se observa el nivel de ajuste entre los datos observados con los ajustados.

Puede observarse claramente que el 10% de falla por degradación del acabado no ocurre antes de las 3000 horas de exposición, alcanzándolo primero el acabado del barniz 7000 en madera de pino y el último en degradarse hasta ese porcentaje fue el tratamiento que conforma el acabado con el barniz 11000 y madera de pino, lo que viene a constituir al mejor y al peor tratamiento respectivamente.

Cuadro 9. Valores de los parámetros escala y forma del modelo de Weibull por especie y barniz.

Especie	Barniz			
	11000		7000	
	Escala	Forma	Escala	Forma
Aile	4776.91	27.67	4888.86	5.69
Pino	5747.33	9.99	5181.44	4.08
Encino	4972.71	19.62	5567.01	9.08

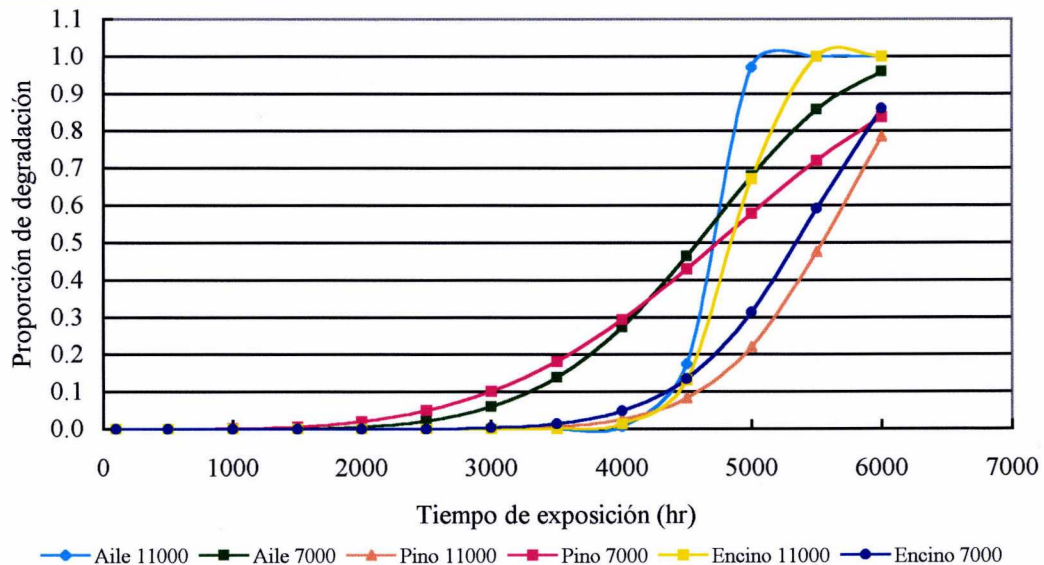


Figura 7. Comportamiento de la degradación del acabado por especie y barniz aplicando la distribución de Weibull.

Las proyecciones estadísticas realizadas permiten determinar que hasta las 6000 horas de exposición se tiene una proporción de falla del acabado para todos los tratamientos en un rango del 0.75 al 1. Este comportamiento coincide en parte con lo reportado por Flores (1999) quien indica que al final la velocidad de degradación del acabado tiende a ser similar entre todos los tratamientos estudiados.

En el Cuadro 10 se presentan los tiempos a los que cada tratamiento de acabado alcanzó una degradación del 10% bajo las condiciones de intemperismo acelerado simulado con la rueda francesa. Los tiempos aquí determinados son muy superiores a los reportados por Flores (1999) para los acabados en pino y encino con el barniz 11000.

Cuadro 10. Tiempo en horas a las que se alcanza el 10 por ciento de degradación del acabado por especie y barniz.

Barniz	Especie		
	Aile	Pino	Encino
11000	4390	4588	4433
7000	3291	2984	4344

Este resultado puede atribuirse al hecho de haber aplicado cuatro capas de acabado en ambas caras de las probetas, así como en los costados laterales y seis capas en los cabezales, lo cual coincide con Feist (1984); Feist (1987); Feist (1988b); Carll y Feist (1989); Feist (1994); Knaebe (1995); Kauman (1996), quienes indican que para una mayor protección, resistencia y durabilidad, los acabados transparentes para uso en exteriores requieren ser aplicados en varias capas, aunque esto afecta directamente los costos del tratamiento así como su mantenimiento, sin embargo agregan que éste último puede realizarse hasta el segundo e incluso el tercer año después de estar en servicio bajo los efectos del intemperismo.

De acuerdo con lo reportado por Podgorski *et al.* (1996), quien indica que el intemperismo artificial simulado en la rueda francesa permite una aceleración de 10 veces al observado en el intemperismo natural, en el Cuadro 11 se presenta el tiempo de vida útil estimado para el acabado con los barnices 11000 y 7000 en madera de aile, pino y encino. En este tiempo es cuando se presenta el 10% de degradación de la superficie acabada en la que es necesario de acuerdo con el fabricante del producto dar mantenimiento al acabado.

Cuadro 11. Tiempo de vida útil del acabado con los barnices 11000 y 7000 en madera de aile, pino y encino.

Vida útil	Especie					
	Aile		Pino		Encino	
	11000	7000	11000	7000	11000	7000
Horas	43900	32910	45880	29840	44330	43440
Años	5.0	3.7	5.2	3.4	5.0	4.9

Al respecto, se hace la observación de que aún cuando los tiempos de vida útil son altos, deben tomarse con ciertas reservas, por que hacia las horas finales del experimento, se observó que la madera además de presentar degradación en su acabado, también presentaba afectación severa en forma de rajaduras profundas, alabeos y manchado tanto por la lixiviación de extractivos como por un ligero ataque por hongos. Bajo estas condiciones, el mantenimiento no solo se haría al acabado, sino que requeriría también mantenimiento e incluso saneamiento de las partes de la madera afectada, lo que aumentaría considerablemente los costos de operación por esta actividad.

Considerando las condiciones y forma de aplicación del acabado así como con base en los comentarios anteriores, se sugiere al fabricante de los productos considerar la posibilidad de modificar su recomendación en cuanto al momento de dar mantenimiento, tomando en cuenta además del 10% de degradación de la superficie acabada, también el nivel de afectación que presente la madera utilizada como sustrato, el cual debe ser el mínimo de tal manera que garantice que el mantenimiento se dará exclusivamente al acabado y no a éste más la madera.

5. CONCLUSIONES

Con base en la evaluación del parámetro de falla por apariencia, los mejores tratamientos de acabado fueron los conformados con el barniz 11000 y madera de pino, aile y encino quienes tienen una vida útil de 5.2 años el primero y 5.0 años los dos últimos antes de requerir mantenimiento, siendo mejores que los acabados formados por el barniz 7000.

El acabado con el barniz 7000 presentó la menor vida útil, la cual fue para la madera de aile, pino y encino de 3.7, 3.4 y 4.9 años respectivamente.

Los índices de espesor de película y nivel de retención del acabado fueron mayores en la madera de aile, presentando diferencia estadística significativa en las variables densidad básica y textura en comparación con los obtenidos para el pino y encino.

El nivel de retención alcanzado por el encino fue menor y presentó diferencia estadística significativa en las variables densidad básica y textura en comparación con el alcanzado en madera de pino y aile.

El mejor producto de acabado fue el barniz 11000 sobre el 7000, el cual mostró diferencia estadística significativa en el índice de nivel de retención dada por el mayor contenido de sólidos que contiene.

La densidad básica y la textura influyeron para que en el acabado con el barniz 11000 la vida útil fuera mayor en aile y pino en comparación con el encino.

El alto contenido de extractivos en la madera de encino y por pertenecer al grupo de los Leucobalanus, influyó para que en el acabado con el barniz 7000 la falla en apariencia fuera menor que en aile y pino.

En ambos productos de acabado, la falla por pérdida de adhesión tuvo el mismo comportamiento que la falla por apariencia. El parámetro de falla por apariencia siempre se presentó primero que el de falla por pérdida de adhesión.

6. LITERATURA CITADA

- AD, E. 1986. Sistemas acuosos para la protección de la madera. In: Segundas Jornadas Técnicas para el Acabado de Superficies de Madera. pp: 45-50.
- ALEGRI F., E. 1994. Seminario sobre acabado y tapizado del mueble. AIDIMA. Instituto Tecnológico del Mueble y Afines. Valencia, España. s/p.
- ARNOLD, M., W. C. FEIST y R. S. WILLIAMS. 1992. Effect of weathering of new wood on the subsequent performance of semitransparent stains. *Forest Products Journal*. 42(3):10-14.
- ARNOLD, M., J. SELL y W. C. FEIST. 1991. Wood weathering in fluorescent ultraviolet and xenon arc chambers. *Forest Products Journal*. 41(2):40-44.
- BRAND, B. G., L. J. NOWACKI y H. N. JOHNSTON. 1960. Research on wood finishes. *Forest Products Journal*. 10(7):329-333.
- CANDELARIO R., M. M. 1980. Estudio de la variación de algunas características físicas y mecánicas de la madera de *Pinus ayacahuite* Var. *veitchii* y *Pinus patula*. Tesis profesional. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 156 p.
- CARLL, C. G. y W. C. FEIST. 1987. Weathering and decay of finished aspen waferboard. *Forest Products Journal*. 37(4):27-30.
- CARLL, C. G. y W. C. FEIST. 1989. Long-term weathering of finished aspen waferboard. *Forest Products Journal*. 39(10):25-30.

- CASTILLO M., M. I. y J. J. ERDOIZA S. 1995. Acabados para madera en exteriores. *Madera y Bosques*. 1(2):9-22.
- CEVALLOS F., S. y T. CARMONA V. 1981. Banco de información de estudios tecnológicos de maderas que vegetan en México. Banco Xilotecnológico. Tomo I. Catálogo No. 2. Inst. Nac. Invest. For. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Méx. 68 p.
- COLLIER, J. W. 1967. Wood finishing. Pergamon Press Ltd. 1a. ed. New York. USA. 306 p.
- DEL AMO, S. 1986. Los poliuretanos en el barnizado del mueble. In: Segundas Jornadas Técnicas para el Acabado de Superficies de Madera. pp: 51-55.
- DERBYSHIRE, H., E. R. MILLER y H. TURKULIN. 1995. Investigations into the photodegradation of wood using microtensile testing. *Holz Roh-Werkstoff* 53:339-345
- ESTRADA, N. S. 1959. Exterior finishes for wood. *Forest Products Journal*. 9(6):28A-30A.
- FARJON A., J. PEREZ DE LA R. y B. STYLES T. 1997. Guía de campo de los pinos de México y América Central. Instituto Forestal de Oxford. Universidad de Oxford. Union Europea. Bélgica. 151 p.
- FEIST, W. C. 1977. Wood surface treatments to prevent extractive staining of paints. *Forest Products Journal*. 27(5):50-54.
- FEIST, W. C. 1982. Weathering of wood in structural uses. In: Structural uses of wood in adverse environments. Society of wood science and technology. pp: 156-178.
- FEIST, W. C. 1983. Weathering and protection of wood. In: Proceedings, seventy-ninth annual meeting of American Wood Preservers Association. Kansas City, MO. Stevensville. April 17-20. MD. American Wood Preservers Association. 1983. pp: 195-205.

- FEIST, W. C. 1984. Painting and finishing wood for use outdoors. In: New Ideas Materials Procedures. Proceedings of seventh annual educational conference. February 5-8. Baltimore, MD. Washington, DC. American Society of Home Inspectors, Inc. 1984. pp: A1-A27.
- FEIST, W. C. 1985. The outdoor finish. How and when to paint or stain. Fine Homebuilding. pp: 54-55.
- FEIST, W. C. 1987. Weathering performance of finished yellow-poplar siding. Forest Products Journal. 37(3):15-22.
- FEIST, W. C. 1988a. Role of pigment concentration in the weathering of semitransparent stains. Forest Products Journal. 38(2):41-44.
- FEIST, W. C. 1988b. Weathering performance of finished southern pine plywood siding. Forest Products Journal. 38(3):22-28.
- FEIST, W. C. 1990. Weathering performance of painted wood pretreated with water-repellent preservatives. Forest Products Journal. 40(7/8): 21-26.
- FEIST, W. C. 1994. Weathering performance of finished aspen siding. Forest Products Journal. 44(6):15-23.
- FEIST, W. C. y D. N. S. HON. 1984. Chemistry of weathering and protection. In: American Chemical Society. pp: 401-451.
- FEIST, W. C. y E. A. MRAZ. 1978a. Comparison of outdoor and accelerated weathering of unprotected softwoods. Forest Products Journal. 28(3):38-43.
- FEIST, W. C. y E. A. MRAZ. 1978b. Protecting millwork with water repellents. Forest Products Journal. 28(5):31-35.
- FEIST, W. C. y E. A. MRAZ. 1980. Performance of mildewcides in a semitransparent stain wood finish. Forest Products Journal. 30(5):38-43.

- FEIST, W. C., E. A. MRAZ y J. M. BLACK. 1977. Durability of exterior wood stains. *Forest Products Journal*. 27(1):13-16.
- FEIST, W. C. y R. S. WILLIAMS. 1991. Weathering durability of chromium-treated southern pine. *Forest Products Journal*. 41(1):8-14.
- FEPYR. s/f. Nuevas tendencias europeas en el uso y aplicación de barnices especiales para madera. Centro de Investigaciones de Diseño Industrial. Educación Continua. Facultad de Arquitectura. Universidad Autónoma de México. s/p.
- FINDLAY, W. P. K. 1978. Timber: properties and uses. Granada Publishing. 1a. ed. New York. USA. 224 p.
- FLORES V., R., A. BORJA DE LA R. y J. A. HONORATO S. 1996. Retención y grosor de película de barniz poliuretano base agua y base solvente en la madera de *Pinus montezumae* y *Quercus sideroxyla*. In: Libro de Resúmenes. I Congreso Mexicano de Tecnología de Productos Forestales. Xalapa, Ver. 13-16 de noviembre de 1996. p 48.
- FLORES V., R. 1999. Determinación a través de pruebas aceleradas, de la vida útil del acabado para exteriores en madera de encino y pino. Tesis de maestría. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Méx. 63 p.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY (FPL). 1987. Wood Handbook: Wood as an engineering material. Agricultural Handbook No. 72. USDA, Washington, DC. 466 p.
- HINES W. W. y D. C. MONTGOMERY. 1997. Probabilidad y estadística para ingeniería y administración. 3a. ed. Editorial CECSA. México, D. F. 839 p.
- HUNT, G. M. y G. A. GARRATT. 1953. Wood preservation. 1a. ed. Editorial McGraw-Hill. New York. USA. 457 p.
- KALNINS, M. A. y W. C. FEIST. 1993. Increase in wettability of wood with weathering. *Forest Products Journal*. 43(2):55-57.

- KAUMAN, W. G. 1996. El panorama a nivel mundial de la investigación en productos forestales. In: Libro de Resúmenes. I Congreso Mexicano de Tecnología de Productos Forestales. Xalapa, Ver. 13-16 de noviembre de 1996. pp: 51-68.
- KNAEBE, M. 1995. The finish line. Forest Service. United States Department of Agriculture. Forest Products Laboratory. s/p.
- KOEHLER, A. B. S. 1924. The properties and uses of wood. 9a. ed. Editorial McGraw-Hill. Wisconsin. USA. 354 p.
- KRAEMER, G. K. 1958. Compendio de la conservación de maderas. Santander, España. 527 p.
- LIBERON. 1996. The anatomy of a wood finish. Mendocino, CA. s/p.
- LUBECK, D. G. 1958. Finishing developments-1957. Forest Products Journal. VIII(2):55-57.
- McCASLIN, J. F. 1958. Fundamental techniques involved in efficient spray finishing. Forest Products Journal. VIII(1):68A-70A.
- MACHUCA V., R. 1995. Estudio tecnológico de la madera de *Quercus insignis* de Huastusco, Veracruz, México. Tesis profesional. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Méx. 144 p.
- MARTÍNEZ M. 1981. Los encinos de México. Anales del Instituto de Biología, México. Comisión Forestal. Serie Técnica No. 8. Mich., Méx. 358 p.
- MARTÍNEZ, M. 1992. Los pinos Mexicanos. Ediciones Botas. 3a. ed. México. 368 p.
- MOCKUS-LUBIN, D., W. W. WILCOX y W. A. DOST. 1986. Treatability of young-growth redwood. Forest Products Journal. 36(6):21-27.

- NICHOLAS, D. 1973. Wood deterioration and its prevention by preservative treatments. Volume I: Degradation and protection of wood. 1a. ed. New York. USA. 380 p.
- PEREZ O., C. de la P. y P. OLVERA C. 1981. Anatomía de la madera de 16 especies de coníferas. Bol. Tec. No. 69. Inst. Nac. Invest. For. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México. 111 p.
- PODGORSKI, L., A. MERLIN y X. DEGLISE. 1996. Analysis of the natural and artificial weathering of a wood coating by measurement of the glass transition temperature. *Holzforschung*. 50(3):282-287.
- QUIÑONES J., O. 1974. Características físicas y mecánicas de la madera de 5 especies mexicanas. Bol. Tec. No. 42. Inst. Nac. Invest. For. México. 21 p.
- RICHARDSON, B. 1978. Wood preservation. 1a. ed. New York. USA. 238 p.
- RICHTER, K., W. C. FEIST y M. T. KNAEBE. 1995. The effect of surface roughness on the performance of finishes. Part 1. Roughness characterization and stain performance. *Forest Products Journal*. 45(7/8):91-97.
- RIETZ, R. C. 1961. Accelerated weathering of red oak. *Forest Products Journal*. 11(12):567-575.
- RZEDOWSKI, J. y RZEDOWSKI G. Flora fanerogámica del valle de México. Volumen I. Editorial CECSA. México. 403 p.
- SELL, J. y W. C. FEIST. 1986a. U. S. and European finishes for weather - exposed wood - a comparison. *Forest Products Journal*. 36(4):37-41.
- SELL, J. y W. C. FEIST. 1986b. Role of density in the erosion of wood during weathering. *Forest Products Journal*. 36(3):57-60.
- SUDIYANNI, Y., Y. IMAMURA y M. TAKAHASHI. 1996. Weathering effects on several properties of chemically modified wood. *Wood Research*. 83:55-58.

- TAMARIT U., J. C., A. BORJA DE LA R. y R. FLORES V. 1998. Influencia de las características anatómicas en la retención y grosor de película de dos barnices para exteriores. In: Resúmenes de ponencias. II Congreso Mexicano de Tecnología de Productos Forestales. Morelia, Mich. 25-27 de noviembre de 1998. p 29.
- TUSET R. y F. DURAN. 1979. Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización. Editorial Hemisferio Sur. Montevideo, Uruguay. 688 p.
- VANNOY, W. G. 1958. Blister - and stain - resistant paints. Forest Products Journal. VIII(1):17A-20A.
- VELÁZQUEZ L., J. y C. I. MARTÍNEZ B. 1999. Clave asistida por computadora para la identificación de 25 maderas del género *Quercus*. Tesis profesional. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Méx. 79 p.
- WANG, J. Z. y R. DeGROOT. 1996. Treatability and durability of heartwood. pp. 252-260.
- WILLIAMS, R. S. 1987. Acid effects on accelerated wood weathering. Forest Products Journal. 37(2):37-38.
- WILLIAMS, R. S. y W. C. FEIST. 1988. Performance of finishes on wood modified with chromium nitrate versus chromic acid. Forest Products Journal. 38(11/12):32-35.
- WILLIAMS, R. S. y W. C. FEIST. 1993a. Durability of paint or solid-color stain applied to preweathered wood. Forest Products Journal. 43(1):8-14.
- WILLIAMS, R. S. y W. C. FEIST. 1993b. Finishing wood decks. Wood Design Focus. 4(3):17-20.
- WILLIAMS, R. S., P. L. PLANTIGA y W. C. FEIST. 1990. Photodegradation of wood affects paint adhesion. Forest Products Journal. 40(1):45-49.

WILLIAMS, R. S., J. E. WINANDY y W. C. FEIST. 1987. Paint adhesion to weathered wood. *Journal of Coatings Technology*. 59(79):43-49.

WRIGHT, J. A. 1999. Utilización y calidad de los productos mejorados de *Pinus patula* en plantaciones manejadas sosteniblemente. México. En prensa.

ANEXOS

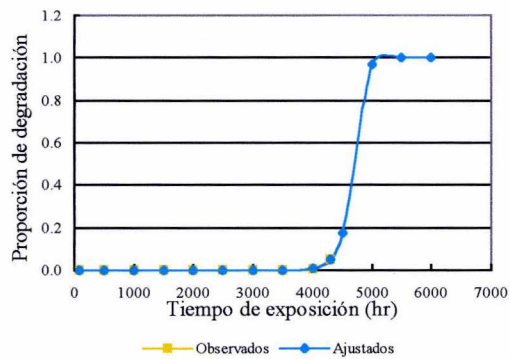
Anexo 1. Valores medios observados del parámetro de falla por apariencia.

hr	Aile				Pino				Encino			
	11000		7000		11000		7000		11000		7000	
	mm ²	%	mm ²	%	mm ²	%	mm ²	%	mm ²	%	mm ²	%
100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
500	0.57	0.00	1.71	0.01	0.00	0.00	2.86	0.01	0.00	0.00	9.71	0.03
600	0.57	0.00	3.29	0.01	0.00	0.00	10.57	0.04	0.86	0.00	13.29	0.04
700	0.71	0.00	5.00	0.02	0.00	0.00	16.71	0.06	1.71	0.01	17.14	0.06
800	0.71	0.00	5.57	0.02	0.00	0.00	21.14	0.07	3.57	0.01	19.86	0.07
900	1.29	0.00	6.00	0.02	0.00	0.00	36.57	0.12	4.86	0.02	23.00	0.08
1000	1.43	0.00	6.43	0.02	0.71	0.00	76.71	0.26	5.43	0.02	24.14	0.08
1100	1.57	0.01	7.14	0.02	1.29	0.00	132.86	0.44	6.29	0.02	24.43	0.08
1200	2.00	0.01	7.71	0.03	2.14	0.01	180.29	0.60	6.71	0.02	25.71	0.09
1300	2.29	0.01	9.71	0.03	3.86	0.01	237.14	0.79	7.14	0.02	28.86	0.10
1400	3.14	0.01	11.00	0.04	6.43	0.02	275.29	0.92	7.71	0.03	31.86	0.11
1500	3.71	0.01	15.14	0.05	8.14	0.03	359.71	1.20	8.71	0.03	34.86	0.12
1600	5.00	0.02	18.00	0.06	10.43	0.03	417.43	1.39	9.14	0.03	36.57	0.12
1700	5.86	0.02	33.29	0.11	13.43	0.04	472.14	1.57	9.43	0.03	38.71	0.13
1800	8.14	0.03	54.86	0.18	17.14	0.06	563.57	1.88	11.00	0.04	41.43	0.14
1900	9.43	0.03	96.71	0.32	25.00	0.08	674.00	2.25	14.86	0.05	52.57	0.18
2000	11.43	0.04	120.00	0.40	30.00	0.10	741.86	2.47	16.29	0.05	55.71	0.19
2100	15.43	0.05	257.57	0.86	50.14	0.17	1059.29	3.53	22.71	0.08	67.71	0.23
2200	17.29	0.06	317.00	1.06	59.29	0.20	1197.71	3.99	27.43	0.09	77.57	0.26
2300	19.43	0.06	427.86	1.43	69.14	0.23	1329.57	4.43	31.29	0.10	91.43	0.30
2400	21.00	0.07	566.29	1.89	83.86	0.28	1453.86	4.85	34.00	0.11	99.57	0.33
2500	22.71	0.08	670.29	2.23	95.00	0.32	1648.43	5.49	45.29	0.15	117.14	0.39
2600	27.14	0.09	857.86	2.86	111.14	0.37	1888.43	6.29	58.00	0.19	133.57	0.45
2700	30.14	0.10	989.71	3.30	119.71	0.40	2228.00	7.43	66.43	0.22	149.00	0.50
2800	32.43	0.11	1326.57	4.42	126.43	0.42	2576.43	8.59	78.57	0.26	181.57	0.61
2900	34.71	0.12	1567.86	5.23	133.43	0.44	2860.29	9.53	87.14	0.29	218.29	0.73
3000	39.57	0.13	1854.00	6.18	141.14	0.47	3049.00	10.16	94.43	0.31	235.43	0.78
3100	44.86	0.15	2185.14	7.28	154.57	0.52	3357.14	11.19	128.00	0.43	306.43	1.02
3200	47.86	0.16	2752.43	9.17	168.86	0.56	3837.29	12.79	136.86	0.46	320.29	1.07
3300	51.29	0.17	3279.29	10.93	211.14	0.70	4288.43	14.29	161.71	0.54	389.86	1.30
3400	54.57	0.18	3965.57	13.22	243.00	0.81	5032.71	16.78	169.71	0.57	493.57	1.65
3500	64.86	0.22	4576.57	15.26	288.86	0.96	5559.57	18.53	190.57	0.64	542.86	1.81
3600	68.71	0.23	4938.57	16.46	322.14	1.07	5972.29	19.91	219.71	0.73	631.43	2.10
3700	75.00	0.25	5285.71	17.62	336.14	1.12	6313.29	21.04	238.86	0.80	738.57	2.46
3800	91.43	0.30	6065.00	20.22	353.71	1.18	6890.14	22.97	252.57	0.84	833.29	2.78
3900	106.00	0.35	6596.14	21.99	424.29	1.41	7099.57	23.67	272.00	0.91	933.29	3.11
4000	169.71	0.57	7311.71	24.37	710.14	2.37	8114.00	27.05	352.00	1.17	1147.14	3.82
4100	374.29	1.25	9233.43	30.78	1050.71	3.50	9498.14	31.66	495.29	1.65	1700.57	5.67
4200	909.29	3.03	10413.00	34.71	1301.29	4.34	10807.00	36.02	1036.43	3.45	2275.71	7.59
4300	1572.43	5.24	12268.57	40.90	1662.43	5.54	12488.86	41.63	1759.57	5.87	2962.71	9.88

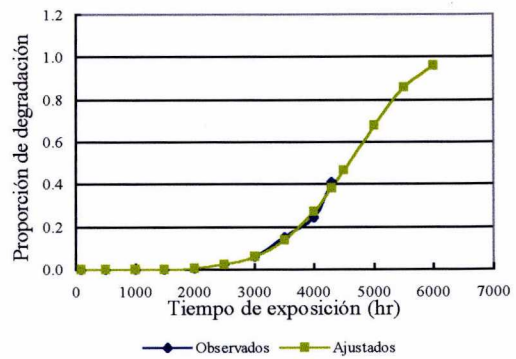
Anexo 2. Valores medios observados del parámetro de falla por adhesión.

hr	Aile				Pino				Encino			
	11000		7000		11000		7000		11000		7000	
	mm ²	%	mm ²	%	mm ²	%	mm ²	%	mm ²	%	mm ²	%
100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
400	0.00	0.00	0.14	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
500	0.00	0.00	0.14	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.16
600	0.00	0.00	0.14	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.16
700	0.00	0.00	0.14	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.14	0.18
800	0.00	0.00	0.14	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.57	0.24
900	0.29	0.04	0.43	0.07	0.00	0.00	7.43	1.15	0.29	0.04	1.86	0.29
1000	0.29	0.04	0.43	0.07	0.00	0.00	18.71	2.90	0.29	0.04	2.86	0.44
1100	0.29	0.04	0.43	0.07	0.00	0.00	24.71	3.83	0.29	0.04	2.86	0.44
1200	0.29	0.04	0.43	0.07	0.00	0.00	31.86	4.94	0.43	0.07	4.14	0.64
1300	0.29	0.04	0.43	0.07	0.00	0.00	36.00	5.58	0.86	0.13	4.43	0.69
1400	0.29	0.04	0.43	0.07	0.00	0.00	39.71	6.16	2.00	0.31	5.00	0.78
1500	0.29	0.04	0.43	0.07	0.00	0.00	57.14	8.86	2.43	0.38	5.86	0.91
1600	0.29	0.04	0.43	0.07	0.00	0.00	73.71	11.43	4.00	0.62	8.43	1.31
1700	0.29	0.04	0.43	0.07	0.00	0.00	97.29	15.08	6.29	0.97	10.00	1.55
1800	0.29	0.04	0.86	0.13	0.00	0.00	108.14	16.76	9.29	1.44	11.14	1.73
1900	0.29	0.04	1.00	0.16	0.00	0.00	119.86	18.58	10.29	1.59	12.43	1.93
2000	0.29	0.04	1.43	0.22	0.00	0.00	132.57	20.55	10.86	1.68	14.57	2.26
2100	0.29	0.04	4.57	0.71	0.00	0.00	153.29	23.76	13.43	2.08	15.71	2.44
2200	0.29	0.04	6.71	1.04	0.00	0.00	168.43	26.11	17.86	2.77	17.57	2.72
2300	0.29	0.04	10.00	1.55	0.00	0.00	181.14	28.08	22.43	3.48	18.43	2.86
2400	0.29	0.04	13.86	2.15	1.43	0.22	199.71	30.96	27.57	4.27	19.71	3.06
2500	0.29	0.04	16.86	2.61	4.29	0.66	227.00	35.19	29.71	4.61	20.86	3.23
2600	0.29	0.04	35.29	5.47	6.43	1.00	246.14	38.15	38.57	5.98	22.71	3.52
2700	0.29	0.04	43.57	6.75	7.57	1.17	257.14	39.86	42.86	6.64	23.43	3.63
2800	0.29	0.04	53.00	8.22	10.00	1.55	275.71	42.74	47.57	7.37	24.14	3.74
2900	0.29	0.04	66.43	10.30	11.14	1.73	292.14	45.28	50.71	7.86	25.00	3.88
3000	0.29	0.04	76.29	11.82	11.86	1.84	309.00	47.90	53.00	8.22	26.00	4.03
3100	0.29	0.04	94.14	14.59	13.29	2.06	323.57	50.15	56.29	8.72	28.29	4.38
3200	0.29	0.04	108.57	16.83	14.29	2.21	338.00	52.39	58.00	8.99	29.29	4.54
3300	0.29	0.04	120.43	18.67	18.00	2.79	357.29	55.38	60.43	9.37	30.71	4.76
3400	0.29	0.04	138.00	21.39	19.57	3.03	379.29	58.79	62.29	9.65	32.57	5.05
3500	0.29	0.04	151.86	23.54	21.43	3.32	394.43	61.14	63.43	9.83	35.00	5.43
3600	0.29	0.04	170.29	26.39	22.43	3.48	408.71	63.35	64.29	9.96	38.00	5.89
3700	0.29	0.04	184.71	28.63	23.86	3.70	423.29	65.61	65.57	10.16	38.57	5.98
3800	0.29	0.04	196.43	30.45	25.43	3.94	440.71	68.31	69.57	10.78	40.57	6.29
3900	0.29	0.04	205.43	31.84	26.29	4.07	449.43	69.66	70.14	10.87	41.43	6.42
4000	0.29	0.04	218.86	33.92	27.57	4.27	461.71	71.57	71.29	11.05	42.57	6.60
4100	0.29	0.04	232.86	36.09	28.43	4.41	475.29	73.67	72.71	11.27	44.86	6.95
4200	0.29	0.04	249.43	38.66	29.57	4.58	497.86	77.17	74.71	11.58	46.86	7.26
4300	0.29	0.04	272.14	42.18	30.71	4.76	522.57	81.00	78.43	12.16	49.14	7.62

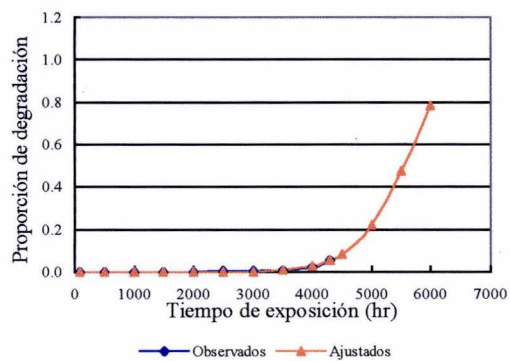
Anexo 3. Gráficos de valores medios observados y ajustados por tratamiento.



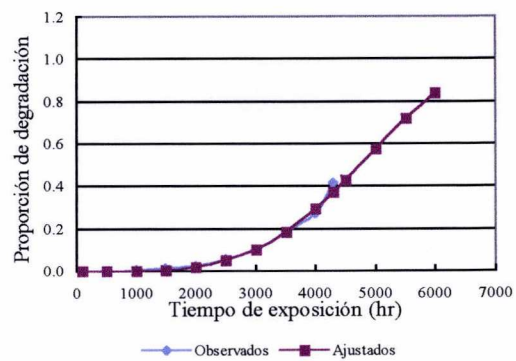
Tratamiento 1: Madera de aile y barniz 11000



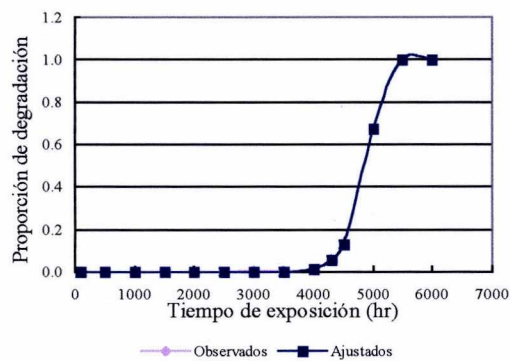
Tratamiento 2: Madera de aile y barniz 7000



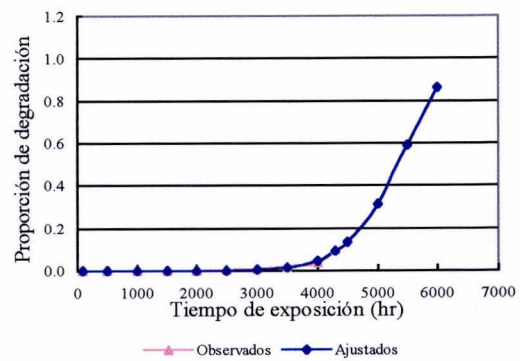
Tratamiento 3: Madera de pino y barniz 11000



Tratamiento 4: Madera de pino y barniz 7000



Tratamiento 5: Madera de encino y barniz 11000



Tratamiento 6: Madera de encino y barniz 7000

BIBLIOTECA CENTRAL U. A. CH