

# REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA

Año 18 N° 72

Octubre - Diciembre de 2008

ISSN 0121-5132

**Resistencia al esfuerzo cortante en entresijos compuestos con losas huecas pretensadas y losa *in situ* de hormigón armado (*topping*)**

**Researching of the external plasticizing and extrusion of natural fermented Polyhydroxybutyrate, and the effect of the biodegradable plasticizers in the mechanical, physical and thermal properties**

**Historia ampliada y comentada del análisis de ciclo de vida (ACV)  
Con una bibliografía selecta**

**Estudio comparativo de monocapas de Al-N y Cr-N como recubrimientos duros sobre acero Aisi D3**

**Aplicación de las técnicas *Computer Aided Design, Fused Deposition Modeling* y *Precision Casting* para fabricación de exoprótesis**



Publicación admitida por Colciencias en el Índice Nacional de Publicaciones Seriadas, Científicas y Tecnológicas colombianas -Publindex- Clasificación tipo C

TARIFA POSTAL REDUCIDA No. 2008-107  
SERVICIOS POSTALES NACIONALES S.A.  
VENCE 31 DE DICIEMBRE DE 2008



ESCUELA  
COLOMBIANA  
DE INGENIERÍA  
JULIO GARAVITO

# Editorial

PEDRO NEL QUIROGA SAAVEDRA, Ph.D.

Director del Centro de Estudios de Estructuras, Materiales y Construcción

A mediados de 2008 el Claustro de Electores de la Escuela, en consonancia con el pensamiento de profesores, fundadores y directivos, decidió que durante los próximos años la institución será una universidad de carácter científico y tecnológico, que contribuirá al desarrollo de las personas, el conocimiento y la sociedad. En consecuencia, la Escuela seguirá ofreciendo programas de carácter científico y tecnológico tanto en pregrado como en posgrado, buscará la excelencia en investigación, promoverá el desarrollo y difusión del conocimiento en diversas áreas de la ingeniería, la administración, la economía y las matemáticas, y priorizará su relación con el entorno, dando respuestas y soluciones a problemas de Bogotá y el país.

La Escuela, durante sus 36 años de existencia, ha sido reconocida por la excelencia académica de sus estudiantes, profesores y programas, con el lema de ser la primera opción. El propósito es ser también la primera opción en desarrollo de nuevo conocimiento e investigación, para lo cual deberá conformar grupos de investigación de excelencia con laboratorios y equipos acordes, y hacer alianzas con otros grupos de investigación nacionales e internacionales. Sin embargo, como por muchos años la prioridad ha sido fundamentalmente la parte académica, el logro de la excelencia en investigación, desarrollo y difusión de conocimiento requiere grandes esfuerzos y rapidez para responder a los retos que plantea un entorno que cambia a velocidades cada vez mayores.

Consciente de esto, la Escuela desde hace varios años ha tomado decisiones tendientes a convertir la investi-

gación en una actividad muy importante en su quehacer diario; es más, una de las principales actividades de la Vicerrectoría Académica, a través de la Oficina de Coordinación de Investigaciones, es precisamente promover la investigación. Es así como en este momento, además de profesores con gran experiencia en dicha área, la Escuela cuenta con un número importante de profesores con título de doctorado, varios de los cuales lo obtuvieron en los últimos años con el apoyo de la institución. Así mismo, se ha estimulado la conformación de grupos de investigación, se han asignado fondos para el desarrollo de proyectos de investigación que sirvan de semilla para posteriores proyectos de mayor alcance que puedan contar con el patrocinio de la industria o de entidades como Colciencias, y se ha buscado la manera de que los grupos e investigadores, tanto de la Escuela como de otras universidades e instituciones nacionales e internacionales, tengan un medio para dar a conocer los resultados de sus proyectos.

Con este propósito en mente, se decidió darle un nuevo talante a la *Revista de la Escuela*; por eso, a partir de 2006 se convirtió en revista científica, de acuerdo con los parámetros de Colciencias para publicaciones especializadas de ciencia, tecnología e innovación. En esta nueva etapa, la revista se ha concentrado en la publicación de artículos inéditos y de calidad, cuyo fondo sea investigación científica y tecnológica. Aunque hay una gran variedad de escritos, se da prioridad a los tres primeros tipos, es decir, **artículos de investigación científica y tecnológica**,

---

aqueños en que se presentan detalladamente los resultados originales de proyectos de investigación; **artículos de reflexión**, aquellos en que se muestran resultados de estudios desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica, recurriendo a fuentes originales, y **artículos de revisión**, producto de una investigación donde se mues-

tran los resultados de investigaciones terminadas para dar cuenta de los avances y tendencias de desarrollo. Para asegurar la calidad científica de los artículos y siguiendo los parámetros de Colciencias, éstos son revisados por pares independientes y expertos en el tema tratado.

# Resistencia al esfuerzo cortante en entrepisos compuestos con losas huecas pretensadas y losa *in situ* de hormigón armado (*topping*)

NOEL IRAOLA VALDÉS

noel.iraola@reduc.edu.cu

Ingeniero civil. Profesor auxiliar de la Universidad de Camagüey.

RAFAEL LARRÚA QUEVEDO

rafael.larrua@reduc.edu.cu

Ingeniero civil. Profesor titular. Jefe del Grupo de Estructuras de la Universidad de Camagüey.

Artículo recibido: 15/09/2008

Evaluación: 18/09/2008

Aprobado: 14/10/2008

## Resumen

Los entrepisos compuestos con losas huecas pretensadas y losa de hormigón fundido *in situ* presentan características que los diferencian de otros sistemas compuestos de elementos de hormigón.

En las losas huecas pretensadas, obtenidas con mezcla de consistencia seca o técnica de vibrado y extrusado, el hormigón es forzado a pasar a través de la máquina y no es posible dejar conectores en éstas para el trabajo futuro de la sección compuesta, ni es recomendable colocarlos posteriormente en obra. Teniendo en cuenta lo anterior, en la práctica común el trabajo conjunto de la sección compuesta lo garantiza solamente la adherencia o cohesión entre los hormigones. Los entrepisos compuestos elaborados con estas losas se diferencian de otros sistemas donde se da algún tratamiento adicional a la superficie del elemento prefabricado para incrementar la rugosidad, se hacen llaves de cortante o se dejan conectores metálicos anclados.

En el artículo se ilustran algunas de las investigaciones más relevantes relacionadas con el cortante vertical y horizontal en las secciones compuestas, y se exponen consideraciones prácticas y criterios para el diseño, tomando en cuenta el análisis comparativo realizado según diferentes normativas y la variación de parámetros que inciden en la resistencia al esfuerzo cortante.

**Palabras claves:** entrepisos compuestos, losa hueca, hormigón prefabricado pretensado, losa de hormigón, esfuerzo cortante.

## Abstract

Composite floors with hollow core slabs and concrete topping have characteristics that differentiate them of other composite systems made up with concrete elements.

When the hollow core slabs are obtained by dry cast or extrusion system, a very low slump concrete is forced through the machine and is not possible to leave connectors in the same ones for the future work of the composite section, neither it is advisable to place them later. Keeping in mind the above-mentioned, in the common practice the structural work of the composite section is guaranteed by the adherence or cohesion among the concretes. This differentiates these composite floors of other composite systems where some additional treatment is given to the surface of the precast concrete element to increase the ruggedness, shear keys are made or metallic. In the article, some of the more outstanding investigations related with the vertical and horizontal shear in composite section were illustrated and general considerations and practical approaches were exposed starting from the carried out comparisons, keeping in mind different technical norms and the variation of parameters that impact in the shear strength resistance.

## INTRODUCCIÓN

Los entrepisos compuestos con losas huecas pretensadas y losa *in situ* presentan características propias que los diferencian de otros sistemas de estructuras compuestas de hormigón.

Cuando las losas huecas pretensadas se obtienen con técnica de vibrado y extrusado, debido a la propia tecnología de producción, no es posible dejar conectores en éstas para el trabajo futuro de la sección compuesta, ni es recomendable colocarlos posteriormente en obra. Teniendo en cuenta lo anterior, en la práctica común el trabajo conjunto de la sección compuesta lo garantiza solamente la adherencia o cohesión entre los hormigones. Esto diferencia los entrepisos compuestos con losas huecas pretensadas y losa *in situ* de otros sistemas donde se da algún tratamiento adicional a la superficie del elemento prefabricado para incrementar la rugosidad, se hacen llaves de cortante o se dejan conectores anclados.

Aunque en las losas huecas pretensadas generalmente los bordes laterales tienen una llave de cortante, se considera que ésta colabora en la transmisión de las cargas de una losa a otra, pero no garantiza el trabajo conjunto de la losa de hormigón *in situ* con la losa prefabricada (figura 1).

Las investigaciones realizadas para el estudio del cortante vertical a losas huecas pretensadas resultan válidas para el tipo de estructura objeto de estudio, porque el mecanismo de fallo sigue siendo el mismo y las expresiones generales para este estado límite se mantienen, siempre que se conserve la conexión en la interfase. Muchos estudios han estado encaminados específicamente a determinar la capacidad resistente de la conexión entre hormigón prefabricado y hormigón fundido *in situ*.

En el año 1960, el comité ACI-Asce 333 (ACI-Asce committee 333, 1960) reporta ensayos a 78 vigas-losas

compuestas, entre las que se encontraban tres vigas-losas sin armadura de cosido y se obtuvo un valor mínimo de tensión resistente en la interfase de 1,08 MPa para superficies lisas y 2,7 MPa para superficies rugosas. No obstante, a los resultados obtenidos el ACI 318-63 asume 0,27 MPa para superficies lisas con armadura de cosido y para superficies rugosas sin armadura de cosido, y 1,1 MPa para superficies rugosas con armadura de cosido. Estos valores se consideraron con un margen de seguridad excesivo, según se expresa en el boletín de asociados de la Corporación de Tecnología del Hormigón de Estados Unidos (CTA 76-B4, 1976).

Más adelante, en el código ACI 318-71 se establece 0,55 MPa como valor admisible para superficies limpias intencionalmente rugosas. Este valor es el que se mantiene hasta la actualidad en el código ACI.

La Corporación de Tecnología del Hormigón (CTC) establece en uno de sus boletines (CTA 76-B4, 1974) tres tipos de superficies y sus correspondientes valores admisibles de tensión, como resultados de ensayos realizados. Establece 0,62 MPa para superficies lisas, 1,1 MPa para superficies intermedias y 2,0 MPa para superficies rugosas. Considera superficies intermedias las obtenidas por una de las siguientes formas: por vibración o terminada con frotta de madera o cepillado, que provoque ranuras de hasta 1,5 mm de profundidad.

Los experimentos realizados por Dashner a piezas compuestas con diferentes tratamientos en la interfase constituyen la base de las recomendaciones y expresiones que aparecen en el Código de Buena Práctica de la Federación Internacional de Pretensado (FIP, 1998).

Recientes ensayos a piezas compuestas realizados en España (Aragón, 2007) demostraron que para piezas compuestas con hormigón seco y vibrado intenso, la capacidad de la conexión es superior a 0,60 MPa.

Las investigaciones realizadas por Scott (1973) se destacan entre los primeros trabajos sobre losas com-

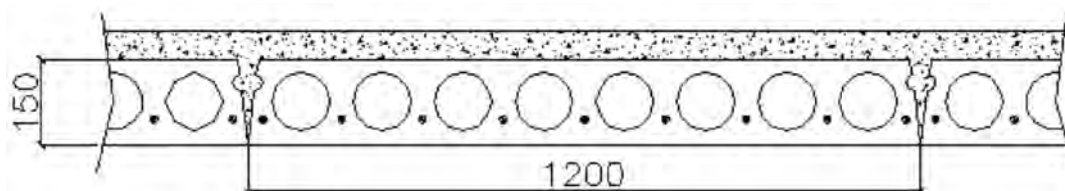


Figura 1. Tipo de sección transversal de entrepiso compuesto.

puestas con losas huecas pretensadas y losa *in situ*. En éstas se analiza el trabajo conjunto de la sección compuesta hasta la falla por cortante del alma en la zona cercana al apoyo de las losas.

En 1991, Ueda y Boonchai retoman las investigaciones de Scott y realizan ensayos a diez losas compuestas con losas huecas pretensadas extrusadas de 15 cm de altura, huecos circulares y sin tratamiento adicional a la superficie, para realizar una evaluación general del cortante (Ueda y Boonchai, 1991). Existió una buena correspondencia para el cortante vertical entre los valores teóricos obtenidos por las expresiones del ACI de 1983, la norma japonesa JSCE de 1986 y los resultados de los ensayos realizados. En ningún caso hubo evidencias de fallo en la interfase.

En Europa se ha desarrollado un amplio programa de investigaciones sobre losas huecas y sus aplicaciones (Pajari, 1989; Girhammar, 1992; Girhammar y Pajari, 1995).

Gran relevancia han tenido los estudios realizados por Yang (1994), quien demuestra que existe buena correspondencia entre los resultados de los ensayos y el cortante resistente calculado según el Eurocódigo 2 en las zonas alejadas del apoyo donde se combinan el cortante y el momento; sin embargo, encuentra gran dispersión y no concordancia entre los resultados obtenidos en los ensayos y las expresiones normadas para el cortante en la zona de apoyo de las losas; por esta razón propone una expresión para el cortante que difiere de la expresión del Eurocódigo 2.

Pajari realiza ensayos para contrastar los resultados con la expresión que aparece en el Eurocódigo 2 y la expresión propuesta por Yang (Pajari, 2005). Como conclusión de sus trabajos propone realizar modificaciones futuras en las expresiones del Eurocódigo 2 y la norma europea de losas huecas (EN 1168-2005), teniendo en cuenta la expresión de Yang, aplicando además algún coeficiente de calibración a partir de un mayor número de ensayos. Plantea esto debido a que la expresión del Eurocódigo 2 y la EN 1168, para losas con peraltos de 260 mm o mayores, y huecos no circulares, queda en forma muy clara del lado de la inseguridad, mientras que la expresión de Yang se ajusta mejor a los resultados obtenidos.

En investigaciones recientes realizadas en Estados Unidos por Hawkins y Ghosh (2006) se llega práctica-

mente a las mismas conclusiones que las enunciadas por Pajari en el 2005.

En el año 2007 continúan las investigaciones del programa europeo con las investigaciones de Girhammar y Pajari (Girhammar y Pajari, 2007), donde se demuestra el buen comportamiento al cortante de losas compuestas con losas huecas pretensadas extrusadas sin tratamiento adicional de la superficie, presentándose la falla en la pared de las losas prefabricadas antes que en la interfase. Demostraron además que la adherencia en la interfase es muy superior a lo aceptado en las normas para este tipo de estructuras.

El cúmulo de investigaciones hechas ha permitido el desarrollo y perfeccionamiento de las expresiones en los documentos normativos y han incidido en el caudal de conocimientos acumulados sobre esta temática.

En el presente trabajo se ha realizado un análisis comparativo y se exponen criterios generales sobre el diseño, tomando en cuenta los resultados obtenidos según las expresiones que aparecen en los documentos normativos y la incidencia de diferentes parámetros en el comportamiento al cortante de las losas compuestas.

## ANÁLISIS COMPARATIVO Y CONSIDERACIONES DE DISEÑO

### Cortante vertical

La sección compuesta que se analiza, para facilitar los cálculos según los estados límites últimos, puede ser equivalente a una sección "T", en la que el ala superior tiene mayor espesor y está compuesta por dos hormigones de diferentes edades y características. El ancho del total del alma ( $b_0$ ) está dado por la suma de las paredes entre huecos de la losa prefabricada (figura 2).

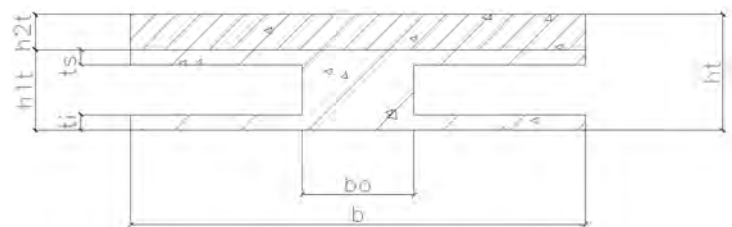


Figura 2. Sección simplificada de la losa compuesta.

El diseño por cortante vertical se realiza para los diversos criterios de fallo; tanto en la sección cercana al apoyo a una distancia igual a la mitad de la altura total  $h_t/2$ , donde el cortante es máximo y el momento prácticamente nulo, así como en secciones más alejadas del apoyo en que se ha producido toda la transferencia de la fuerza de pretensado y se combinan valores de cortante y momento considerables. En el caso específico de la sección ubicada en la zona cercana al apoyo, donde no se ha producido generalmente toda la transferencia de la fuerza de pretensado, rige el criterio de diseño por tracción excesiva del alma de la losa prefabricada.

Para el cálculo del cortante vertical, las instrucciones EHE-2002, el código CEB-FIP-1990 y el Eurocódigo 2:2004 utilizan básicamente las mismas formulaciones.

La expresión tiene un enfoque analítico del problema:

(1)

Con:

$V_d$  = cortante de diseño (MN).

$V$  = cortante actuante mayorado (MN).

$b_w$  = ancho del alma de la losa (m).

$I_o$  = inercia de la sección ( $m^4$ ).

$S_o$  = momento estático con respecto al centroide elástico de la sección compuesta ( $m^3$ ).

$f_{ctd}$  = resistencia a tracción de diseño del hormigón (MPa).

$\sigma_{cp}$  = tensión al nivel del eje centroidal en la losa compuesta en la sección analizada (MPa).

$\alpha$  = coeficiente que tiene en cuenta la transferencia parcial del pretensado a una distancia dada del extremo de la losa prefabricada.

El ACI 2005 presenta la siguiente formulación general empírica:

(2)

Con:

$f'_c$  = resistencia a compresión del hormigón (MPa).

$d$  = altura efectiva de la sección compuesta (m).

La norma cubana NC 207:2003 presenta básicamente el mismo enfoque del ACI, aunque usa en las expresiones la resistencia de cálculo del hormigón y, por consiguiente, se hacen algunas correcciones en las fórmulas.

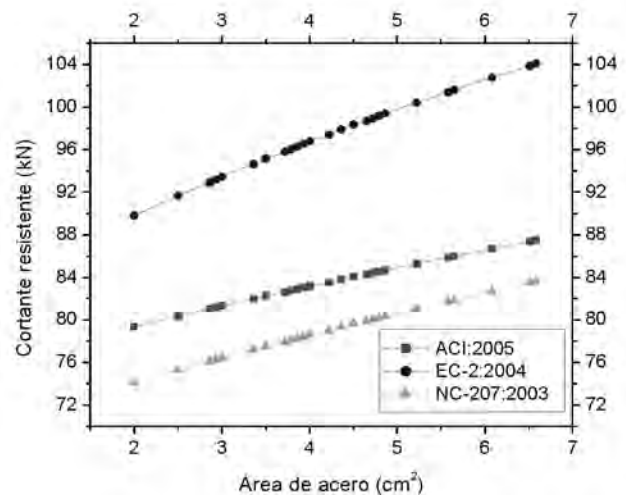


Figura 3. Cortante último resistente según diferentes normativas.

En el gráfico de la figura 5 se reflejan los valores de cortante resistente para una sección crítica a una distancia del apoyo igual a la mitad de la altura total. En los cálculos hechos se utilizaron las expresiones del Eurocódigo 2-2004, la norma cubana NC-207:2003 y del ACI-2005. La comparación se realizó para las losas de 15 cm de altura, seleccionadas del *Manual cubano de losas huecas pretensadas (Manual para el diseño y selección de losas huecas pretensadas extrusadas, 2007)*, muy similares por su geometría a las del *Manual de losas Ultra-Span de Canadá (Ultra-Span News. Another innovative product by Ultraspan)*. Para la conformación del entrepiso compuesto se adicionó una losa de 5 cm de espesor, con resistencia del hormigón de 20 MPa.

El análisis comparativo refleja que por las expresiones del Eurocódigo 2 se obtienen valores de cortante resistente superiores, comparados con los obtenidos por otras normativas. Otra tendencia evidente de la comparación hecha es que en la expresión del Eurocódigo 2 la fuerza de pretensado tiene ligeramente mayor incidencia en la capacidad resistente al cortante. Se puede observar en el gráfico cómo la curva del Eurocódigo 2 crece relativamente en mayor grado, a medida que se incrementa el área de acero de pretensado (aumento de la fuerza de pretensado).

En la tabla 1 se comparan los valores de carga de servicio que corresponden a los valores de cortante

**Tabla 1**  
Tabla comparativa de capacidad de carga por cortante resistente.

TIPOS DE LOSAS		NC-207:2003		EC 2-2004		ACI-2005	
		$V_R$ (kN) (kN/m <sup>2</sup> )	$q$	$V_R$ (kN) (kN/m <sup>2</sup> )	$q$	$V_R$ (kN) (kN/m <sup>2</sup> )	$q$
LH-15-69	$h_{2t} = 0,05m$	76,43	19,87	93,46	22,09	81,33	19,93
	$h_{2t} = 0,075m$	84,83	22,05	106,20	25,10	92,46	22,66
LH-15-712	$h_{2t} = 0,05m$	83,47	21,70	103,88	24,51	87,37	21,40
	$h_{2t} = 0,075m$	91,18	23,70	115,71	27,30	96,05	23,53
LH-30-512	$h_{2t} = 0,05m$	89,89	13,03	102,20	13,38	94,58	12,86
	$h_{2t} = 0,075m$	94,64	13,72	106,19	14,44	100,60	13,68
LH-30-912	$h_{2t} = 0,05m$	98,53	14,28	113,15	14,82	102,00	13,87
	$h_{2t} = 0,075m$	101,93	14,78	116,12	15,21	107,20	14,58

- En los entresijos con LH-15 la carga se calculó para una luz de 5,0 metros y en los entresijos con LH-30, para 9,0 metros.
- El cortante se calculó a una distancia del apoyo de la mitad de la altura de la sección compuesta.
- Se realizaron los cálculos para las siguientes relaciones de cargas:  
60% carga permanente + 40% carga temporal.
- Se utilizó hormigón para la losa *in situ* de  $f'c = 20$  MPa y las losas prefabricadas del *Manual cubano*.
- Se utilizaron los coeficientes correspondientes a un control normal de ejecución y tipo de fallo grave.
- Se usaron los coeficientes de carga correspondientes a cada norma.
- La simbología empleada fue la siguiente:

$h_{2t}$  = espesor de la losa *in situ*.

$V_R$  = cortante resistente de la sección, tomado para 1,20 m de ancho.

$q$  = carga característica.

resistente último, teniendo en cuenta los coeficientes de carga de cada norma. Esto permite ser más objetivos al valorar la capacidad resistente por cortante, ya que se comparan las cargas sin mayor correspondientes al peso de los materiales y a las cargas de uso de la edificación.

En la citada tabla se comparan entresijos compuestos utilizando losas huecas de 15 y 30 cm de altura del *Manual cubano*, con diferentes cuantías de acero de pretensado (variación de la fuerza de pretensado). Se usan losas *in situ* (*topping*) de 5 y 7,5 cm de espesor, con hormigón de 20 MPa de resistencia.

En la tabla comparativa se corrobora lo planteado anteriormente al analizar los valores de cortante último resistente. Cuando se aplican los coeficientes de cargas las diferencias se hacen menores, pero aun con esta consideración las cargas de servicio admisibles del Eurocódigo 2 pueden ser mayores en un 12% con respecto a las obtenidas por las demás normas.

Las diferencias entre la NC 207:2003 y el ACI son insignificantes en cuanto a los valores de cargas de

servicio admisibles obtenidos de la comprobación de cortante.

A continuación se ilustra el incremento del cortante resistente (tomado para 1,20 m de ancho, que es el ancho de una losa), comparando las secciones del entresijo compuesto con respecto al de losas huecas simples, considerando cargas distribuidas. En los gráficos de las figuras 4 y 5 se muestra la comparación del cortante resistente para una sección situada a una distancia  $h_t/2$  del apoyo, para las losas de 15 y 30 cm de altura. Para la conformación del entresijo compuesto se adicionó una losa de 5 cm de espesor con resistencia del hormigón de 20 MPa. Se emplearon las expresiones del ACI-2005.

En los gráficos se puede observar que el incremento del área de acero de pretensado (proporcional a la fuerza de pretensado) no genera grandes incrementos de la resistencia al cortante a una distancia  $h_t/2$  del apoyo. En esa sección no se ha producido toda la transferencia de la fuerza de pretensado, puesto que la longitud necesaria para la transferencia del pretensado generalmente es mayor que esa distancia.



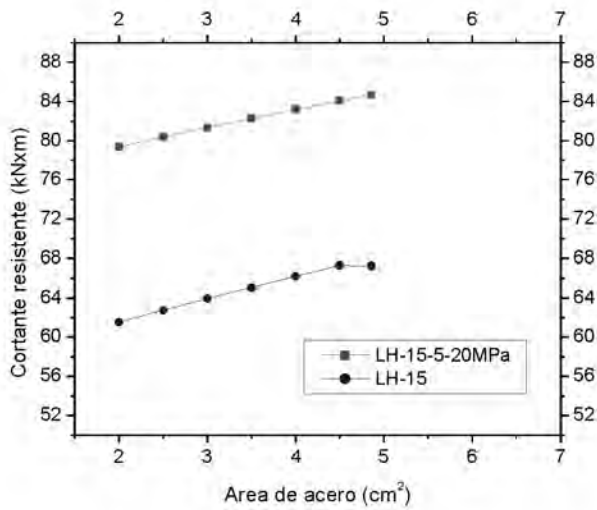


Figura 4. Cortante último de sección simple y compuesta con LH-15.

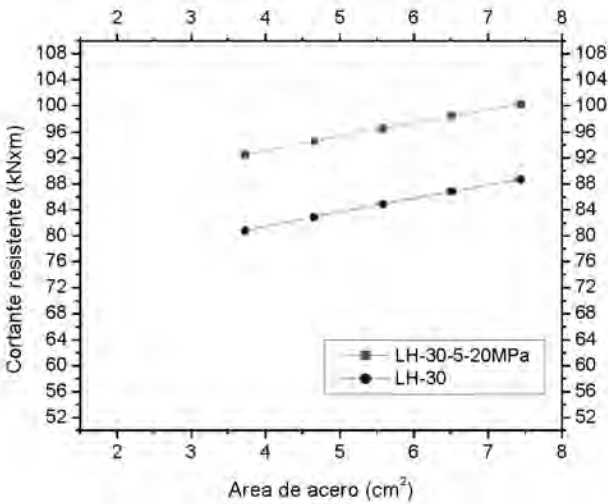


Figura 5. Cortante último de sección simple y compuesta con LH-30.

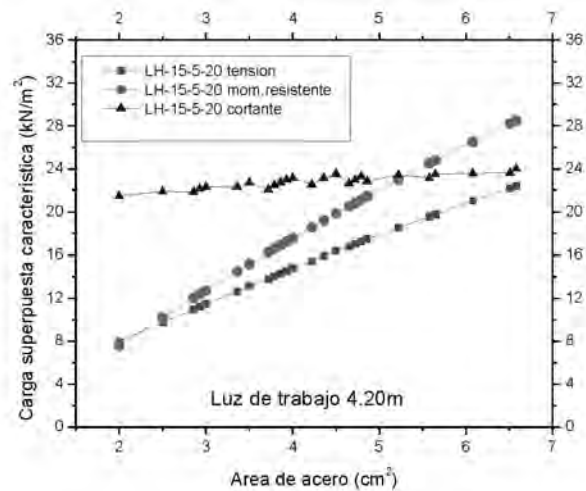
Al comparar las secciones de losas simples con las secciones compuestas, se advierte que el cortante tiene un incremento casi constante, con independencia de la fuerza de pretensado; esto se debe a que la diferencia está dada fundamentalmente por el aumento de la altura efectiva de la sección en el entrepiso compuesto.

A pesar de tener un aumento considerable de la altura efectiva de la sección en el entrepiso compuesto al pasar de los entrepisos con LH-15 a los entrepisos con LH-30, los incrementos en el cortante resistente no son significativos porque el espesor total de pared

para tomar las tracciones diagonales disminuye. Esto está relacionado con la configuración geométrica de los huecos de las losas pretensadas.

A continuación se ilustra la variación de la capacidad de carga, en función de la luz de trabajo de los entrepisos compuestos, teniendo en cuenta todas las comprobaciones de diseño de los estados límites, según ACI-2005. En los gráficos se presenta la carga superpuesta admisible de servicio sobre la losa compuesta. Las curvas del gráfico reflejan las comprobaciones de tensiones en las fibras extremas (tensión), las comprobaciones de capacidad de carga por momento resistente y las comprobaciones de capacidad de carga por cortante resistente.

En la figura 6 se muestran los entrepisos con LH-15 y losa *in situ* de 5 cm, con hormigón de 20 MPa para una luz de trabajo de 4,20 m (considerada pequeña).

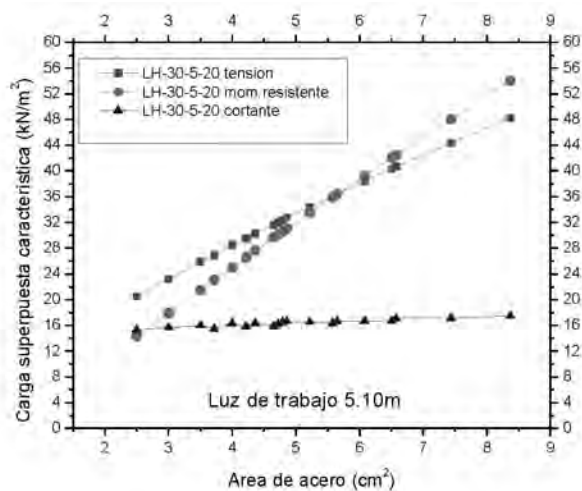


para 4,20 m de luz.

En la figura 6 se observa que para luces pequeñas, en entrepisos de pequeña altura, la comprobación del cortante nunca rige el diseño; por tanto, para luces mayores nunca será el cortante la condición crítica de diseño. Se puede afirmar en estos casos que generalmente el cortante vertical no es el que define la capacidad de carga.

A medida que crece la altura de las losas prefabricadas, debido a la configuración geométrica de la sección transversal de éstas, disminuye el espesor total de pared, por lo que para las luces pequeñas, cuando se soportan grandes cargas, es el cortante el que rige el diseño. En estos casos el cortante puede regir el dise-

ño para todas las cuantías de acero, con una marcada diferencia en la capacidad de carga con respecto a las demás comprobaciones para las cuantías más elevadas. La afirmación anterior se ilustra en el gráfico de la figura 7 para entrepisos con LH-30 y losa *in situ* de 5 cm con hormigón de 20 MPa, para una luz de trabajo de 5,10 m (considerada pequeña).



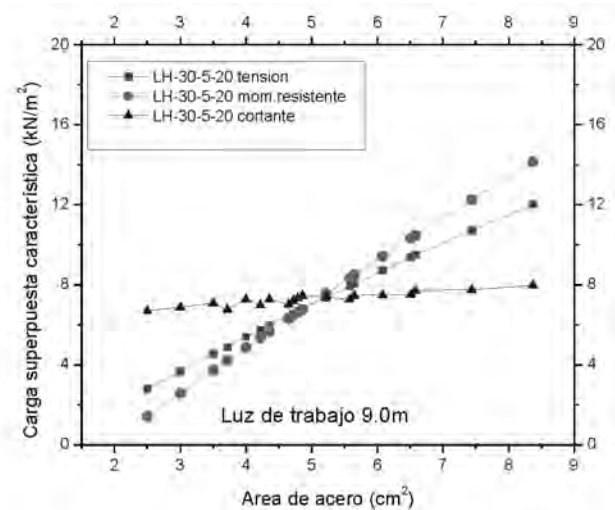
**Figura 7.** Comparación general de entrepisos con LH-30 para 5,10 m de luz.

Cuando se usan losas LH-30, el cortante puede regir el diseño en losas con cuantías más altas, por las razones ya explicadas, aun para luces que se pueden considerar relativamente grandes. Esta afirmación se ilustra en el gráfico de la figura 8, para entrepisos compuestos con la misma sección que la anterior pero incrementando la luz de trabajo hasta 9,0 m.

En el gráfico de la figura 8 se muestra cómo para las cuantías de acero de pretensado consideradas en el rango de medianas a altas el cortante es la condición que rige el diseño, incluso para luces de trabajo que se pueden considerar relativamente grandes.

#### Cortante horizontal

El chequeo del cortante horizontal es un estado límite no considerado de manera independiente por muchas normativas hasta hace poco tiempo. En las normas



**Figura 8.** Comparación general de entrepisos con LH-30 para 9,0 m de luz.

cubanas anteriores a la NC-207:2003 no se abordaba este tema; lo mismo había sucedido en normas europeas como las EH-91 y EP-93, de España.

En las normas y documentos técnicos este estado límite recibe diferentes denominaciones. Por ejemplo, en la EHE-2002 se llama “Estado límite de agotamiento por esfuerzo rasante en juntas entre hormigones”, en la EFHE-2002 aparece como “Cortante longitudinal”, en el Eurocódigo 2:2004 se aborda como “Cortante en la interfase entre hormigones fundidos en etapas diferentes”, mientras que en la NC 207:2003, al igual que en la normativa del ACI-2005, se define como “Resistencia al cortante horizontal”, y si se supera determinado valor de tensión cortante horizontal se pasa al estado de “Cortante por fricción”, tratado en otro acápite.

Este estado límite está orientado al caso en que la transferencia de esfuerzos entre las dos partes de la pieza compuesta se realiza realmente por cortante. Es aplicable al cálculo de estados de corte a través de una superficie potencial de fisuración o una superficie de junta entre los dos hormigones del elemento compuesto. Al experimentarse un corrimiento paralelo a la superficie de contacto, las crestas de las superficies rugosas se montan unas sobre otras. Si existe cualquier armadura de cosido, ésta ofrece resistencia al deslizamiento.

Cuando no se dispone de armadura de cosido o ésta es de muy baja cuantía, la rotura de la adherencia de ambos hormigones se presenta de manera repentina, con

un deslizamiento relativamente pequeño entre ambos, por lo que ocurre una rotura frágil (sin aviso). En este tipo de fallo no existe ninguna posibilidad práctica de “readaptación” del fenómeno a lo largo de la luz del elemento, sino que la rotura se inicia por el punto en que se rebasa el valor límite de la tensión rasante y se propaga al resto del elemento.

El carácter frágil de la rotura, la dispersión que presenta y la sensibilidad de este valor al polvo y suciedad interpuestos en la unión hacen que se deba ser muy prudente al fijar los coeficientes de seguridad y que cualquier investigación experimental abarque un número razonable de ensayos y no unos pocos valores aislados (González y Gálvez, 1993; Calavera, 2003).

#### Mecanismo de falla y consideraciones básicas

El mecanismo general de transferencia de las tensiones de cortante a través de la interfase de piezas de hormigón fundidas en diferentes etapas, se muestra en la figura 9.

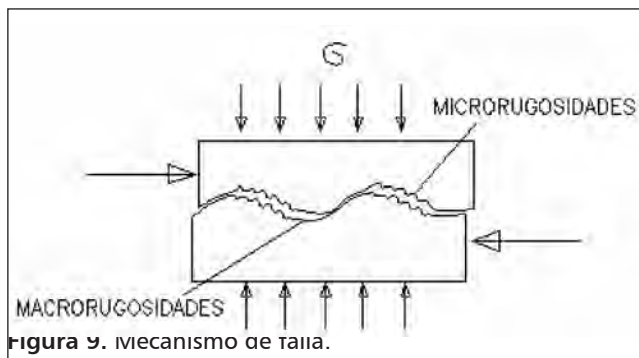


Figura 9. Mecanismo de falla.

Este mecanismo, para la determinación de la tensión tangencial resistente en la interfase, se resume conceptualmente en la siguiente expresión (FIP, 1998):

$$\tau = c + \sigma \tan \phi_c \quad (3)$$

En la expresión anterior, el término  $c$  está referido a la cohesión entre hormigones fundidos en diferentes etapas, la cual está basada en dos factores muy bien explicados según Aragón (Aragón, 2007):

- Adhesión de las partículas del hormigón de la primera etapa con la lechada o fase fluida del hormigón de la segunda etapa.
- Imbricación o trabazón entre los dos hormigones al penetrar la lechada del mortero en los poros de la superficie sobre la que se hormigona, y posterior endurecimiento de las llaves de lechada.

El segundo término está asociado a las macrorrugosidades de la superficie, donde  $\sigma$  es la tensión actuante perpendicular a la interfase.

Si la interfase es atravesada por armadura de refuerzo perpendicular a ésta, entonces la expresión general resultante es la siguiente:

$$\tau = c + (\sigma_n + \rho_v f_{sy}) \tan \phi_c \quad (4)$$

Donde:

- $\rho$  = cuantía de acero de refuerzo en la conexión
- $f_{sy}$  = tensión de fluencia del acero de refuerzo de la conexión.

En esta expresión se puede ver con claridad la independencia que existe entre el término  $c$  y el resto de los factores. El aporte de la armadura de cosido y la tensión normal actuante a la capacidad resistente de la conexión dependen de las condiciones (rugosidad) de la superficie de contacto.

En el tipo de estructura objeto de estudio, el aporte a la resistencia de la conexión está dado por la cohesión o adherencia entre hormigones.

En los documentos técnicos, las clasificaciones de rugosidades y el término  $c$  que les corresponde presentan diferencias.

El incremento de la rugosidad de la superficie de elementos de hormigón se puede obtener por uno de los procedimientos siguientes:

- Rascado con peine de púas en sentido transversal al esfuerzo rasante.
- Tratamiento con chorro de agua o chorro de arena, que deje a la vista el árido grueso.
- Apisonado del hormigón después de vibrado con un enrejado metálico o malla metálica tupida.

La tecnología de producción de losas huecas pretensadas extrudadas genera dos cualidades básicas impor-

tantes para la superficie superior de la losa prefabricada que recibirá el hormigón *in situ*:

1. La superficie queda libre de lechada de cemento y con cierta rugosidad.
2. La superficie no queda totalmente plana, sino que se generan ondulaciones.

Por la razón anterior la rugosidad de la superficie de las losas no se considera baja, aunque no se interviene directamente con alguna técnica posterior al hormigonado para incrementar la rugosidad.

En el *Manual de diseño de losas huecas pretensadas*, de Estados Unidos (*PCI-Manual*, 1998), se plantea que los ensayos realizados demuestran que la terminación de la superficie en las losas huecas pretensadas extrusadas con la tecnología planteada permite hacer el cálculo, considerando la tensión rasante admisible para superficies intencionalmente rugosas, según el ACI.

En España, el *Manual de losas Aidepla* (Aidepla, 2004) no plantea ningún tratamiento adicional a la superficie de las losas para considerar el trabajo estructura compuesta y realiza el chequeo de tensión rasante de losas compuestas para superficies de rugosidad alta, según la normativa vigente hasta ese momento.

#### Capacidad resistente de la conexión

Existen múltiples expresiones para determinar el cortante horizontal actuante en la interfase de la sección compuesta. Quizás la expresión más conocida es la teoría elástica, donde se considera el elemento trabajando en régimen elástico, sin fisuras y con trabajo compuesto total. Para determinar la tensión actuante, se utiliza la expresión 5:

(5)

Donde:

$v_h$  = tensión cortante horizontal.

$V$  = esfuerzo cortante.

$S$  = momento estático de la sección por encima de la interfase con respecto al eje centroidal elástico de la sección compuesta.

$I$  = momento de inercia de la sección no fisurada.

$t$  = ancho de la interfase.

Más adelante se abordan las expresiones usadas en los documentos normativos.

Los ensayos demuestran que la expresión 5 es válida para secciones fisuradas, siempre y cuando se tomen  $l$  y  $S$  usando las propiedades y expresiones de la sección fisurada (Patnaik y Loov, 1994). A pesar de lo planteado, esta expresión no es la adoptada por todos los documentos normativos, como se ilustra más adelante.

El ACI-2005 presenta la formulación general siguiente:

$$V_u \leq \phi V_{nh} \quad (6)$$

Con el cortante nominal en la interfase para superficies que se consideren intencionalmente rugosas y se prescindan de conectores, expresado como:

$$V_{nh} = 0,55 * b_v * d \quad (7)$$

Donde:

$V_u$  = esfuerzo cortante de cálculo (MN).

$\phi$  = coeficiente igual a 0,75.

$V_{nh}$  = tensión cortante nominal resistente (MPa).

$b_v$  = ancho de la interfase (m).

$d$  = altura efectiva de cálculo de la sección, tomando el mayor entre la altura efectiva real desde el extremo de la fibra comprimida hasta el centroide de la armadura y 0,8 veces la altura total (m).

En la expresión de  $V_{nh}$  se asume como valor constante de adherencia entre hormigones 0,55 MPa, con independencia de la resistencia de los hormigones que intervienen en la conexión. Este valor se toma para hormigón colocado sobre hormigón endurecido con superficies intencionalmente rugosas, limpias y libres de lechada, sin presencia de armadura de cosido.

Para la determinación de la tensión cortante horizontal, el ACI presenta un método alternativo derivado de la condición de equilibrio de la sección, determinando la variación de la fuerza de compresión en un segmento dado, donde se transfiere el cortante horizontal. Este método no es recomendable en el tipo de conexión que se analiza por el tipo de fallo no avisado (frágil, con valores pequeños de deslizamientos relativos) y progresivo (sin posibilidades de readaptación o redistribución).

En el propio documento normativo se reconoce que el método de cálculo adoptado en el ACI es conservador. A lo anterior se agrega lo planteado en el *Manual*

del PCI (PCI-Manual, 1998) de que numerosos ensayos demuestran la capacidad de las losas huecas pretensadas extrusadas de soportar tensiones en la interfase superiores a 0,55 MPa, cuando trabajan como losas compuestas debido al tipo de superficie que se obtiene en el propio proceso de producción de las losas.

La norma AASHTO-LRFD 2004 establece como máximo valor de tensión nominal cortante 0,52 MPa para superficies limpias, libres de lechada sin rugosidad intencional. Para superficies intencionalmente rugosas se acepta 0,7 Mpa. Especifica además que se puede prescindir de armadura de cosido hasta valores de tensión en la interfase de 0,7 MPa. El factor de seguridad utilizado  $\phi = 0,9$  es mayor que el  $\phi = 0,75$  del ACI, pero los coeficientes de cargas son superiores en la normativa AASHTO-LRFD, teniendo los valores de 1,25 para cargas permanentes y 1,75 para cargas temporales, cuando se combinan solamente estas cargas.

Como dato adicional que incide en los cálculos se debe mencionar que esta norma recomienda tomar  $d$  como la distancia desde el centroide del acero traccionado hasta el centro del bloque de compresión de hormigón, mientras en el ACI se toma la altura efectiva.

Como se ha podido observar, las normas de Estados Unidos no tienen en cuenta la resistencia del hormigón para fijar el valor máximo admisible de tensión tangencial de cortante en la interfase.

A continuación se expone el enfoque dado al tema tratado en los documentos normativos europeos. En estos documentos la tensión resistente en la interfase está en función de la resistencia del hormigón más débil.

El Eurocódigo 2 presenta la siguiente formulación general:

$$V_{Edi} \leq V_{Rdi} \tag{8}$$

El valor de tensión resistente cuando no existe armadura de cosido se determina:

$$V_{Rdi} = cfc_{td} \tag{9}$$

El valor de tensión actuante se determina:

$$V_{Edi} = \beta V_{Ed} I(zb_i) \tag{10}$$

Donde:

$V_{Ed}$  = cortante en la sección.

$\beta$  = relación entre la fuerza longitudinal actuante en la losa *in situ* y la fuerza longitudinal total actuante en la sección.

$z$  = brazo mecánico.

$b_i$  = ancho de la interfase.

$c = 0,25 f_{ctd}$  para superficies muy lisas.

$c = 0,35 f_{ctd}$  para superficies lisas.

$c = 0,45 f_{ctd}$  para superficies intencionalmente rugosas.

$c = 0,5 f_{ctd}$  para superficies con llaves de cortante.

$f_c^?$  = resistencia a compresión del hormigón más débil.

$f_{ctd} = 0,21 * (f_c^?)^{2/3} / 1,5$ .

El Código de Buena Práctica CEB-FIP (FIP, 1998) presenta la siguiente formulación:

$$\tau_{ds} \leq \tau_{Rd} \tag{11}$$

Con:

$\tau_{Rd} = 0,1 f_{ctd}$  para superficies muy lisas.

$\tau_{Rd} = 0,2 f_{ctd}$  para rugosidad baja.

$\tau_{Rd} = 0,4 f_{ctd}$  para rugosidad alta.

La determinación de la tensión actuante se basa en una expresión con enfoque completamente elástico:

$$\tau = [V * E_2 * S_2] / [b * (EI)_0] \tag{12}$$

Donde:

$V$  = cortante de diseño sin considerar el peso propio (MN).

$E_2$  = módulo de elasticidad del hormigón de la losa *in situ* (MNxm<sup>2</sup>).

Para obtener el valor de cortante de diseño, los coeficientes de mayoración de las cargas son 1,35 para las permanentes y 1,5 para las temporales.

$S_2$  = momento estático de la losa *in situ* con respecto al centroide elástico de la sección compuesta (m<sup>3</sup>).

$b$  = ancho de la interfase (m).

$(EI)_0$  = rigidez de la sección compuesta MNxm<sup>2</sup>.

Los valores límites de tensión admisible en la interfase dados por este documento son inferiores a los dados en el Eurocódigo 2.

La clasificación de las superficies y los valores admisibles de tensión en la superficie de contacto registran

grandes variaciones de una normativa a otra. Esto está condicionado por la dispersión que se presenta en los ensayos y la dificultad de establecer los límites entre superficies lisa, media y rugosa.

Para la comparación de la capacidad resistente en la interfase se han seleccionado las normas Eurocódigo 2:2004 y el ACI-2005. Se ha utilizado una sección compuesta con losas prefabricadas LH-15 y losa *in situ* de 5 cm de espesor, con hormigón de 20 MPa de resistencia.

En la siguiente comparación ha sido necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Se ha escogido la clasificación en el ACI de superficie intencionalmente rugosa y, por tanto, el valor de 0,55 MPa como tensión admisible para determinar la fuerza cortante, aunque en realidad la superficie no se haya tratado posteriormente al hormigonado de la losa prefabricada. Esto es posible porque el propio documento ACI reconoce que este valor es conservador para superficies intencionalmente rugosas (con tratamiento en la superficie). Por otro lado, en el *Manual del PCI (PCI-Manual, 1998)* se plantea que para las losas huecas pretensadas extrusadas el chequeo se hará según lo planteado para superficies rugosas en el ACI, lo cual está avalado por múltiples ensayos realizados. En los boletines de la Corporación de Tecnología del Hormigón de Estados Unidos (CTA 74 B6, 1974; CTA 76 B4, 1976) se acepta un valor de 0,6 MPa para losas huecas pretensadas con tecnología de vibrado y extrusado (corresponde a la denominada superficie lisa en estos documentos).
- En la comparación se han escogido para el Eurocódigo 2 las superficies lisa y rugosa. La superficie lisa es la que se adapta al caso en estudio, según la clasificación que hace este documento. Se ha escogido además la superficie rugosa para establecer la comparación general con el ACI e ilustrar mejor las diferencias.

A continuación se expone lo anteriormente descrito, comparando los esfuerzos cortantes verticales característicos máximos que generan la condición límite de tensión en la interfase según cada documento. La comparación se ha realizado variando la relación entre las cargas permanentes y temporales entre un 40-60%, aplicando los coeficientes de carga según cada normativa (figura 10).

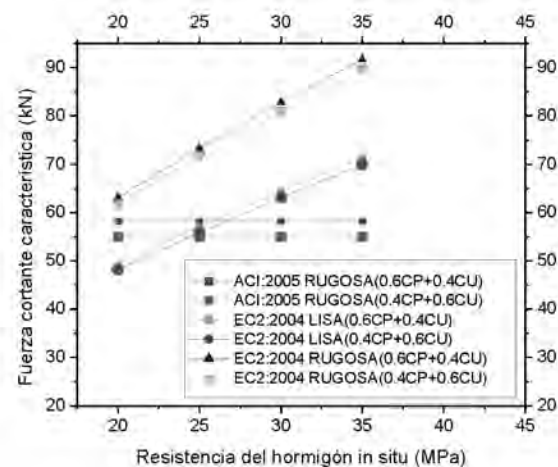


Figura 10. Capacidad resistente de la conexión.

En primer lugar, es evidente que en las expresiones del ACI, como en otras normas norteamericanas, no se establece dependencia entre la resistencia del hormigón de la losa *in situ* y la capacidad resistente de la conexión, mientras que el Eurocódigo 2, al igual que otras normativas europeas, sí tiene en cuenta esta dependencia. El Eurocódigo 2, cuando trata superficies clasificadas como intencionalmente rugosas, es menos conservador que el ACI, obteniéndose diferencias significativas.

Ajustando la comparación para el caso de los entrepisos compuestos objeto de estudio, según los criterios que permiten clasificar la superficie, se puede observar que para valores de resistencia cercanos a 25 MPa existe bastante coincidencia entre ambas normas. Para valores de resistencia menores (cercanos a 20 MPa), según el Eurocódigo 2 se alcanza menor capacidad resistente, mientras que para valores por encima de 25 MPa se obtiene mayor capacidad resistente de la conexión según el Eurocódigo 2 con respecto a las demás normas, pudiendo llegar a ser significativas las diferencias.

## CONCLUSIONES

Los análisis relacionados con el cortante vertical reflejan lo siguiente:

- El incremento de la fuerza de pretensado no genera grandes incrementos de la resistencia al cortante de la sección crítica (para cargas distribuidas) ubicada

a una distancia igual a la mitad de la altura total  $h/2$  del apoyo, porque en esa sección no se ha producido toda la transferencia de la fuerza de pretensado. Además, comparando los entrepisos simples con los entrepisos compuestos, el cortante tiene un incremento relativo casi constante, con independencia de la fuerza de pretensado (área de acero de pretensado); esto se debe a que la diferencia está dada fundamentalmente por el aumento de la altura efectiva de la sección compuesta.

- A pesar de aumentar de modo considerable la altura efectiva de la sección compuesta al pasar de los entrepisos con LH-15 a los entrepisos con LH-30, los incrementos en el cortante resistente no son significativos, porque entonces el espesor total de pared para tomar las tracciones diagonales disminuye. Esto está relacionado con la geometría de los huecos de la sección transversal de la losa prefabricada.
- Con respecto a otras normativas, tomando como criterio el cortante cercano al apoyo donde el diseño está condicionado por la tracción excesiva del alma, los valores de cortante resistente obtenidos por el Eurocódigo 2 son superiores a los conseguidos por otras normas. Esta tendencia del Eurocódigo 2, con respecto a otras normas, se evidencia para todos los casos de entrepisos compuestos. En las comparaciones donde se traducen los resultados a cargas de servicio aplicando los coeficientes de carga de cada norma, aunque las diferencias se hacen algo menores, las cargas de servicio admisibles obtenidas por el Eurocódigo 2 siguen siendo mayores.
- Otra tendencia evidente es que en la expresión del Eurocódigo 2 la fuerza de pretensado tiene ligeramente mayor incidencia en la capacidad resistente a cortante que en las demás normas. Se puede observar el crecimiento relativo en mayor grado del cortante último, a medida que se incrementa el área de acero de pretensado (incremento de la fuerza de pretensado).
- Las diferencias entre la NC 207:2003 y el ACI-2005 son insignificantes en cuanto a los valores de cargas de servicio admisibles obtenidos de la comprobación de cortante último.
- En entrepisos con losas prefabricadas de pequeña altura, generalmente el cortante no es el que define la capacidad de carga.
- A medida que crece la altura de las losas prefabricadas, debido a la configuración geométrica de la

sección transversal de éstas, disminuye el espesor total de pared. En estos casos, para luces de trabajo consideradas pequeñas, el cortante puede regir el diseño para todas las cuantías de acero, con una marcada diferencia en la capacidad de carga con respecto a las demás comprobaciones, para las cuantías de acero más elevadas. Para luces de trabajo relativamente grandes, para las cuantías de acero en rangos de mediana a alta, puede ser todavía la comprobación de cortante la que rige el diseño.

Con respecto a la capacidad resistente de la conexión:

- En las expresiones del ACI, como en otras normas norteamericanas, no se establece dependencia entre la resistencia del hormigón de la losa *in situ* y la capacidad resistente de la conexión, mientras que el Eurocódigo 2, al igual que otras normativas europeas, sí tiene en cuenta esta dependencia. El Eurocódigo 2, cuando trata superficies clasificadas como intencionalmente rugosas, es menos conservador que el ACI, obteniéndose diferencias considerables.
- Ajustando la comparación para el caso de los entrepisos compuestos objeto de estudio, se puede observar que para valores de resistencia cercanos a 25 MPa existe aproximación entre los valores obtenidos por las normas ACI y Eurocódigo 2. Para valores menores de resistencia (cerca de 20 MPa), según el Eurocódigo 2 se obtiene menor capacidad resistente, mientras que para valores por encima de 25 MPa se obtiene mayor capacidad resistente de la conexión según el Eurocódigo 2 con respecto al ACI, pudiendo llegar a ser significativas las diferencias.

## BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO LRFD (2004). *Bridge Design Specification*, 3<sup>rd</sup> ed. With 2005 and 2006 Interims. Washington D.C.
- ACI-Asce committee 333 (1960). Tentative Recommendations for Design of Composite Beams and Girders for Buildings. *ACI Journal*, Vol. 32, No. 6, 12.
- ACI Committee 318 (2005). "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05)". American Concrete Institute.
- Aidepla (2004). Proyecto y ejecución de elementos resistentes con alveoplaca. España.
- Aragón, A. (2007). Investigación de los mecanismos de transferencia de tensiones rasantes en juntas de piezas compuestas

- entre hormigones *in situ* y prefabricados de alta resistencia. Tesis de doctorado. España: Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos.
- Calavera, J. (2003). *Cálculo, construcción, patología y rehabilitación de forjados de edificaciones unidireccionales y sin vigas*, 5ª ed. España: Intemac.
- CEB-FIP (1990). Código Modelo del Comité Europeo del Hormigón y la Federación Internacional del Pretensado.
- CTA technical bulletin 74-B6 (1974). Composite Systems without Roughness, 6, 46 pp.
- CTA technical bulletin 76-B4 (1976). Composite Systems without Ties, 4, 43 pp.
- EFHE (2002). Instrucción para el proyecto y la ejecución de forjados unidireccionales de hormigón estructural realizados con elementos prefabricados. Sust. EF-96. Vig. desde 7/2002 48 pp.
- EHE (2002). Instrucción de hormigón estructural. Madrid: Ministerio de Fomento.
- EH-91 (1991). Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado. Sust. EH-88. Vig. desde 6/1991, 277 pp.
- EN 1168 (2005). Precast Concrete Products. Hollow core slabs.
- EP-93 (1993). Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón pretensado. Sust. EP-80. Vig. desde 5/1993.
- Eurocode 2 (2004). Design of concrete structures-part 1-1. General rules and rules for building. 12/2004.
- FIP Guide to good practice (1998). Composite floor structures.
- FIP Recommendations (1988). "Precast Prestressed Hollow Core Floor".
- González, E. & Gálvez, J. (1993). Influencia de la rugosidad y la cuantía de cosido en el comportamiento de las piezas compuestas solicitadas a flexión. *Hormigón y Acero*, No. 187, 9-30.
- Girhammar, U. (1992). Design principles for simply supported Prestressed hollow core slabs. *Struct. Eng. Rev.* 4(4), pp. 301-316.
- Girhammar, U. (1995) Shear capacity of notched Prestressed hollow core slabs with circular voids. *Struct. Eng. Rev.* 7(2), pp. 63-74.
- Girhammar, U. & Pajari, M. (2007). *Test and analysis on shear strength of composite slabs of hollow core units an concrete topping*. Ulf Arne Girhammar & Matti Pajari. *Construction and Building Materials*, 7/2007.
- Manual para el diseño y selección de losas huecas pretensadas extrusadas*, 2007.
- NC 207-2003. Construcciones de hormigón armado. Requisitos generales para el diseño y construcción de las estructuras de hormigón. Sust. NC 053-039: 1989. Vig. edesde 9-2003.
- Pajari, M. (1989) Design of prestressed hollow core slabs. *Research Reports 657*, Technical Centre of Finland (VTT), Espoo; 1989.
- Pajari, M. (2005). Resistance of Prestressed Hollow Core Slabs against Web Shear Failure. *Research Notes 1292*, VTT Building and Transport, Kemistintie, Finland, April.
- Patnaik, K. & Loov R. (1994). Horizontal Shear strength of composite concrete beam with a rough interface. *PCI Journal*, Vol. 39, No.1, 48-66.
- PCI Design Handbook*, 5<sup>th</sup> ed. (1999). Chicago: Precast/Prestressed Concrete Institute.
- PCI-Manual for the design of hollow core slabs*, 2<sup>nd</sup> ed. (1998). PCI.
- Hawkins, M. & Ghosh, S. (2006). Shear strength of hollow core slabs. *PCI Journal*, Vol. 130, No. 1, 110-114.
- Scott, N. (1973). Performance of precast prestressed hollow core slabs with concrete topping/ Norman L. Scott. *PCI Journal*, Vol. 18, No. 2, Mar-Apr. pp. 64-77.
- Ueda, T. & Boonchai, S. (1991). Shear strength of precast prestressed hollow slabs with concrete topping. *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 4.
- Ultra-Span News*. Another innovative product by Ultraspan.
- Yang, L. (1994). Design of Prestressed Hollow Core Slabs with Reference to Web Shear Failure. *Journal of Structural Engineering*. Asce, Vol. 120, No. 9, 2675-2696, September.





# Researching of the external plasticizing and extrusion of natural fermented Polyhydroxybutyrate, and the effect of the biodegradable plasticizers in the mechanical, physical and thermal properties

JAIME ALEJANDRO PUENTES PARODI

jaime.puentes@escuelaing.edu.co

Ingeniero Industrial, Escuela Colombiana de Ingeniería, Master of Science in Applied Polymer Science, Martin-Luther-Universität-Halle-Wittenberg, Halle Alemania. Profesor Instructor en el área de materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

ANDREAS HÄHNDEL ANDREAS

Haehndel@iw.uni-halle.de

Martin Luther Universität Halle Wittenberg, Germany.

HANS JOACHIM RADUSCH

hans-joachim.radusch@iw.uni-halle.de

Chair of Polymer Engineering, Martin Luther Universität Halle Wittenberg, Germany.

Artículo recibido: 09/09/2008  
Evaluación: 11/09/2008  
Aprobado: 25/09/2008

## Abstract

The use of environmental biodegradable polymers is an alternative that is growing year by year, basically because in that way it is possible to reduce the great amount of plastic waste and pollution generated by the most commonly used plastics. The plasticization of the environmentally friendly poly(3-hydroxybutyrate), PHB, with five classes of biodegradable plasticizers has been studied. So far, many blends containing PHB have been studied, but only a few are totally biodegradable. Plasticizers have been recently related to environmental and health problems; for that reason it is important to investigate in the expansion of plasticizing compounds to meet new material challenges involving efficiency and economy.

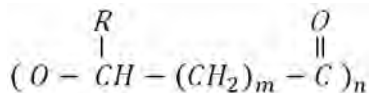
It is well known that the main disadvantages of the PHB are its brittleness due to the small values of breaking elongation, and its high production cost which end up in a higher cost than commercial polymers making difficult the commercial production of this material. In this report it is intended to analyze the behavior of PHB when it is plasticized with natural and biodegradable oils. From here, a reduction –mainly in the glass transition temperature, elasticity modulus and yield and tensile strengths– is expected, which

would decrease the brittleness of the material. The natural oils used in the experiments are obtained from plants and consequently the costs associated to production are cheaper if compared with biodegradable plasticizers already produced industrially. Experimental information in literature about these oils used as plasticizers is not found; therefore one of the main targets of this report is to construct a foundation of what could be the future of plasticizers and 100% biodegradable end-user materials.

**Keywords:** PHB, biodegradability, plasticizers, biodegradable plasticizers.

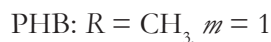
## INTRODUCTION

Poly-(R)-3-hydroxybutyrate (R-PHB) is an environmental friendly bacterial polyester (1). It is part of the family of the poly(hydroxyalkanoates), PHA. The chemical structure of the PHV family can be summarized in the following structure:



**Figure 1.** PHA's general structure (1).

Where R is an alkyl group of different length,  $n$  and  $m$  are integer numbers representing the following molecules for PHB (1).



i-PHB is a semicrystalline and high molecular weight biodegradable thermoplastic (2). PHB is a thermoplastic material based on naturally occurring and cheap raw materials. This specific characteristic brings to it some advantages and disadvantages when compared with other oil-derivates-thermoplastics (4). The most advantageous characteristic of this material is its biocompatibility and biodegradability, presenting microbial degradation in climatic/landscapes environmental. PHB tends to be more brittle than conventional thermoplastics, limiting its fields of application, even though mechanical properties of this biodegradable material can be compared with those of the commercially used thermoplastic isopolypropylene (i-PP) (5), (6). Other drawbacks of PHB, besides fragility, are thermal degradability at temperatures near to the range of the melting point and its high price (3) (7) (8). PHB homopolymer also crystallizes slowly when is cooled down from the melting temperature and consequentially it suffers from an increase of the embrittlement when is subjected to an aging process (9). The storage at or above room temperature induces in the polymer a logarithmic increase in crystallinity with time.

PHB is a material in which the range of commercial applications is limited, firstly, because of its thermal instability and brittleness (12) and high cost, besides that the molecular weight of PHB decreases dramatically

when the temperature is very close to its melting point. These disadvantageous properties limit widely the application of this biodegradable polymer specially in the film industry where biodegradation is preferred (5).

## PLASTICIZERS

A plasticizer is a substance which is added to a polymer in order to modify the physical properties (melt viscosity, the glass transition temperature, the modulus of elasticity, its flexibility and stretchability) and improve the processability of the material when requires without altering the main chemical structure of the initial material (13). Plasticizers can be mainly classified as external and internal ones, being the external plasticizers the most commonly used. External plasticizers are low molecular weight or oligomeric molecules which are not attached to the main bond. They form secondary bonds to polymer chains and spread them apart, reducing polymer-polymer chain secondary bonding, providing more mobility for the macromolecules; thus changes in elastic properties of PHB/low molecular weight plasticizer are due to the efficient weakening of intermolecular interactions in the amorphous regions of the polymer

The right use and effectiveness of a plasticizer depends basically on the next parameters (15):

*Compatibility:* Indicates the mutual solubility of polymer/plasticizer system.

*Permanence:* Polymer must retain the plasticizer under different environmental conditions.

*Efficiency:* This term refers to the amount or concentration of plasticizer to give a certain degree of flexibility.

Plasticizers should have common features in the chemistry: the functionality which is slightly to strongly polar for compatibility with the polar polymer (aromatic, ester groups) and a non polar functionality for internal lubrication (hydrocarbons). The polar portion of the plasticizer provides the attractive force necessary to attach to the polymer chain, so in that way the plasticizer is attached to the polymer in the points of polar attraction, whereas the non polar or hydrocarbon region which is not attractive act as a lubricant between polymer chains (16).

Plasticizers for biodegradable polymers are to be preferred also biodegradable. When disposed in biologi-

cally active environments, biodegradable polymers are completely converted to biological products (biogas, humid matter, biomass, etc.) within a certain period. These polymers, as well as their degradation products, must cause no important effects on the environment. In this point most of the plasticizers used in synthetic polymers are not suitable for PHB. In this field health and safety issues dominate the researching where are more demanding requirements though, since by definition they will be released to the environment during normal product use.

For the reasons stated above and with the idea of generate a general screening of the physical and mechanical properties of new natural and biodegradable plasticizers in PHB it was decided to use a biodegradable plasticizer like citric acid ester as a main reference due to its demonstrated efficiency in thermoplastics (13) (16) and four types of plant oils such as soybean, olive, safflower and rapeseed oils, as main plasticizers. These refer to fatty acid esters as plasticizers. Researching on a plasticization of the latter materials is scarce on literature and only experiments with soybean oil as plasticizer were found (19), (1).

## MATERIALS

### Plasticizers

#### Citric acid esters (as control)

Citric Acid (2-Hydroxy-1,2,3-propanetricarboxylic acid, in IUPAC naming) is a colorless crystalline organic compound belonging to carboxylic acid family. It exists in all plants (especially in lemons and limes) and in many animal tissues and fluids. Triethyl Citrate is used as a high boiling solvent and plasticizer for vinyl resins, cellulose acetates. It is a plasticizer allowed in the field of food additive, food contact material, and medical and pharmaceutical products.

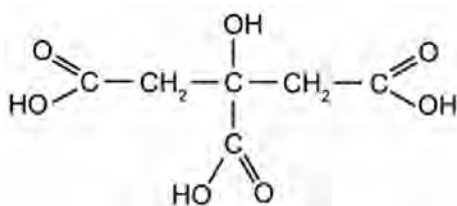


Figure 2. Citric acid molecule (21).

### Natural oils

The general chemical structure of natural oils is obtained from one molecule of glycerol (Figure 3) and three fatty acids (Figure 4). An example of this can be seen in Figure 5 where the structure of olive oil is presented. Olive oil consists of two radicals of oleic acid and one of palmitic acid attached to glycerol. For this report 4 types of natural oils were tested as natural plasticizers: rapeseed oil, olive oil, safflower oil and olive oil.

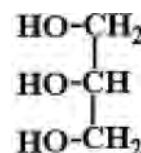


Figure 3. Glycerin structure (24).

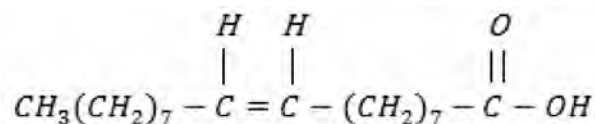


Figure 4. Oleic acid structure (24).

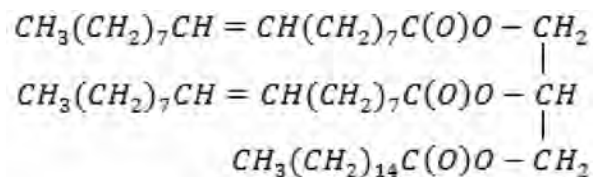


Figure 5. Olive oil structure (24).

## EXPERIMENTAL METHODS AND DISCUSSION

Determination of miscibility and compatibility between a plasticizer and a polymer resin can be realized in several ways: From the analysis of the glass transition temperature in the blended system, from density measurements, from infrared spectroscopy, from morphology, from wide and small angle X-ray scattering, and others (3). In this report four main experimental methods were developed:

- Kneading or internal mixing of PHB/plasticizers, where the analysis of the relationship time/torque determined the plasticization effect of the system.

As a general evaluation all experiments were developed in the internal mixing at 9 minutes giving that this time provides us enough information about the plasticization, mixing and degradation behavior of the material.

- Tensile test, where the effectiveness of the plasticizer in the polymer was determined by measuring mainly the elastic modulus and the elongation at break.
- Differential Scanning Calorimetry (DSC), where glass transition temperature, crystallinity, melting point and crystallization temperature were measured.
- The morphology of PHB and its blends can be analyzed using microscopic methods like polarization optical microscopy POM.

### KNEADING OR INTERNAL MIXING PROCESS

Internal mixing process is used to study the mixing process among species by considering the time dependence of the torque. The internal mixer machine consists of twin rotor mixers which are intermeshing and counter-rotating.

- Model device: Kneader Brabender 2100
- Load capacity:  $V = 50 \text{ cm}^3$
- Maximum thermal load capacity =  $400^\circ\text{C}$
- Maximum and torque: speed 100 RPM, torque 100 Nm
- Temperature:  $165^\circ\text{C}$
- Screw speed: 48 RPM
- Mixing time: 30 minutes

Samples were prepared following the next conditions: for citric acid esters the concentrations in weight according to PHB were 20, 15, and 10%. Initially it was intended to prepare samples at higher concentrations, e.g. 40%, but exudation in samples was presented.

For all vegetable-oils-plasticizers the concentrations were prepared at 20, 15, 10, and 5%.

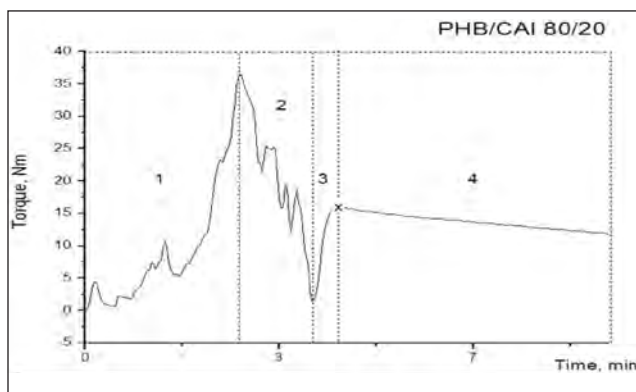
The materials used through all the experiments are the PHB as-received and the citric acid esters (commercially available); oils commercially available.

**Table 1**

Conditions for the preparation of samples PHB/plasticizers

Concentration plasticizer (%)	PHB Weight (g)	Citric Acid Esters (g)	Sample total weight (g)
20	40	10	50
15	42.5	7.5	50
10	45	5	50
0	50	0	50

Concentration plasticizers (%)	PHB content (g)	Vegetable oils Content (g)	Sample total weight (g)
20	40	10	50
15	42.5	7.5	50
10	45	5	50
5	47.5	2.5	50
0	50	0	50



**Figure 6.** Kneading process of PHB/CAE'S.

In Figure 6 a typical diagram of a kneading process with citric acid esters is shown where:

1. Filling of PHB pure
2. Addition of plasticizer
3. Plasticization process and plasticization peak  $x$  – chamber closed
4. Mixing and thermal and mechanical degradation of the material

Addition of vegetable oils as plasticizer

A characteristic curve explaining the kneading process can be seen in Figure 7:

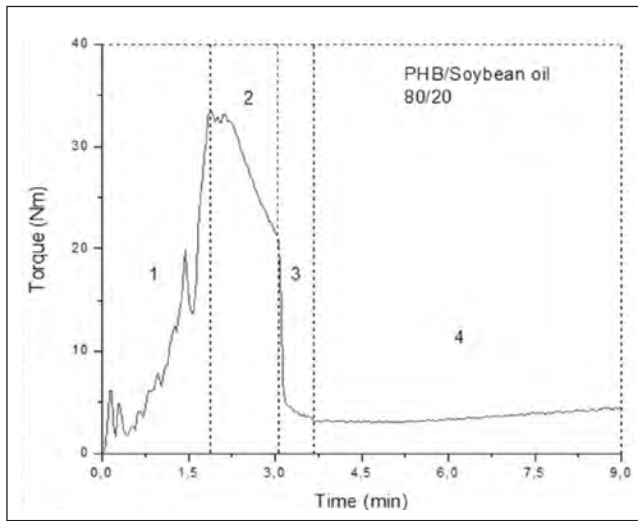


Figure 7. Kneading process of PHB/oils.

Figure 7 represents a standard curve for plasticization of PHB/oils, where:

1. Filling of the chamber with pure PHB.
2. Mixing time of PHB with chamber closed.
3. Opening of the chamber for addition of plasticizer –plasticizer addition.  
x –chamber closed
4. Plasticization process, slight increment of the torque after 9 minutes.

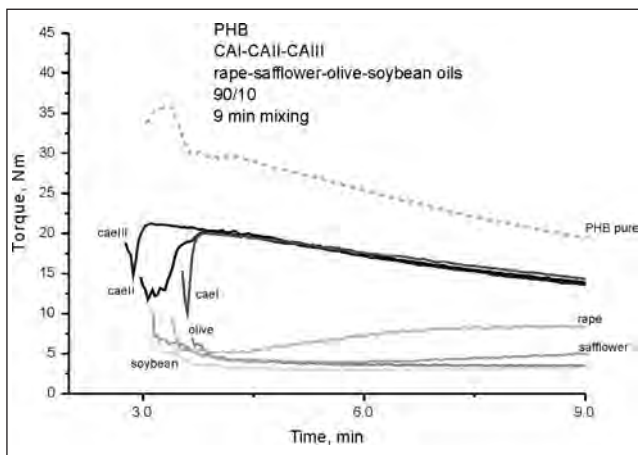


Figure 8. Plasticization process in the internal Mixing machine for PHB/CAE's and PHB/oils at 90/10.

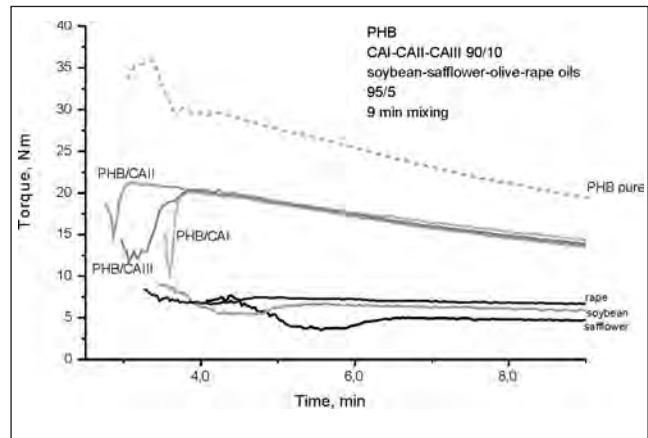


Figure 9. Plasticization process in the internal Mixing machine for PHB/CAE's and PHB/oils at 95/5.

Summary to Analysis of the plasticization process depending on type and ratio of plasticizers: Natural oils

- The only important result after 9 minutes of mixing time is the obtained with samples at 95/5 ratio. They presented a slight increase in torque after the filling process meaning that may be incorporation of particles into the PHB.
- Plasticization in oils may take place at longer mixing times as observed in figures 9 and 8. Rapeseed oil at ratio 80/20 and 90/10 and at ratio 90/10 for safflower oil showed an increase in torque after 9 minutes of mixing time, which mean that if the time of mixing is increased there could be a better plasticization of the material
- Olive oil did not take part in the plasticization process of PHB at any of the concentrations analyzed.
- In general the oils analyzed in this experiment do not show a good compatibility with the polymer matrix; this may be caused probably by the low molecular polarization effect offered by the natural oils, instead they tend to act as lubricants in the rotors of the mixers.
- When plasticization in oils is compared with the plasticization process realized by citric acid esters at different concentrations, from figures 8 and 9, it is concluded that the CAE's provide a better plasticizer effect on the PHB, and the plasticization with oils as mentioned above could take place in more time that in the experiments (9 minutes), as seen in the increment in torque for all samples.

## MECHANICAL TEST

- Tensile testing machine device: Zwick/Roll Z005
- Clamp distance: 100 mm
- Speed 50 mm/min
- Range for E-Modulus detection at elongation between 0.05% -0.25%,
- Speed 1 mm/min
- Preforce of 0.3 MPa
- Tensile testing bar Type A1
- DIN 53455

## PHB and citric acids

In Figure 10 the results of the addition of 20% of citric acids in PHB are shown. It was expected an important reduction in the elasticity modulus and also an increase in the elongation at break of the material. The first was corroborated whereas the latter applied only to the sample with CAEI. When compared with pure PHB the elasticity modulus was reduced 54% whereas the strain at break was increased to 241% passing from 6.30% to 21.5% being this result the best among all the experiments realized.

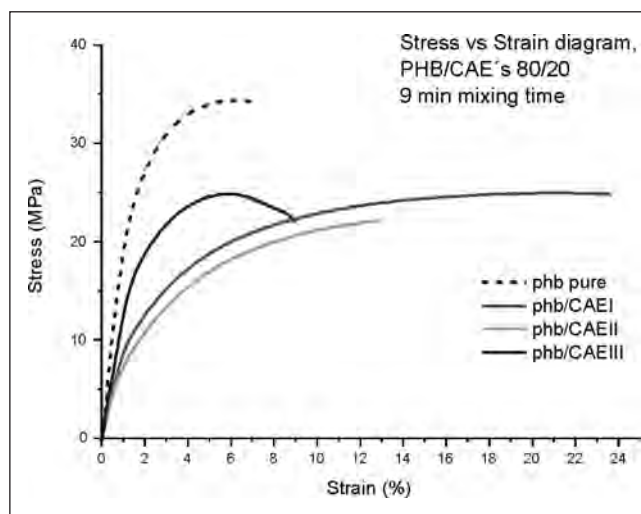


Figure 10. Stress vs. strain diagram PHB/CAE's 80/20.

The other two samples, CAEII and CAEIII, did not work out properly, especially the CAEIII which presented at a concentration of 10% a better performance.

This may be explained by the segregation or saturation of the plasticizer when blended. CAEIII, when added at 15% of concentration, reduced the elasticity modulus in 24% but it only increased the strain at break in 6.4%. The same conclusion applies for CAEII. This plasticizer reduced significantly the elasticity modulus proportionally to the amount added into the polymer, but the strain at break did not improve when a concentration of 20% was used, meaning that a saturation point is found just around at 15% of concentration.



Figure 11. PHB/CAEI 80/20, 9 min mixing. Well dispersed blend with knife marks from the cutting process. POM 5X.

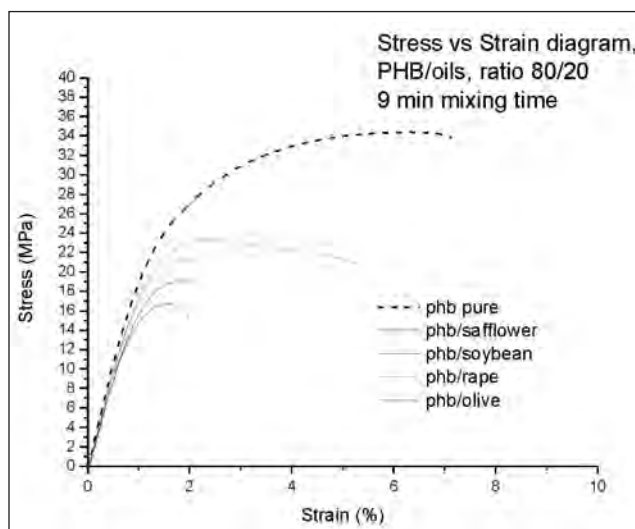
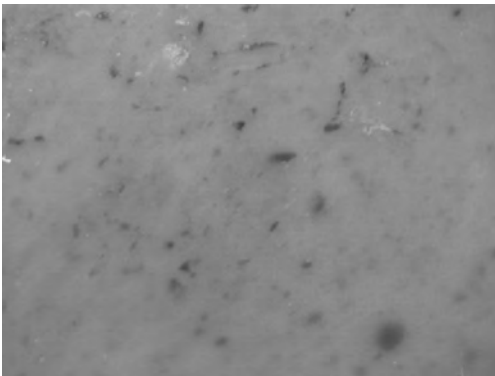


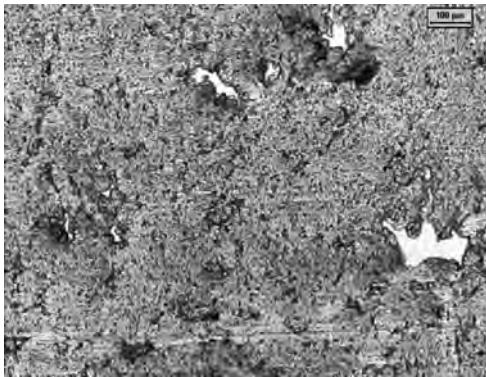
Figure 12. Stress vs. strain diagram PHB/oils 90/10.

Samples of PHB/oils ratio 80/20 are shown in Figure 12; here the incompatibility of PHB with oils is presented with a decrease in the tensile properties when compared with the curve of pure PHB (black dash line).

The material obtained here is completely brittle and fragile indicating that these plasticizers at this specific ratio were not effective for PHB as confirmed by the results of the internal mixing in which the chamber was completely saturated, meaning that there was no incorporation of oil particles into the polymer matrix. At this ratio also it is expected that oils behave more like a strong lubricant in the mixing device (figures 13 and 14).

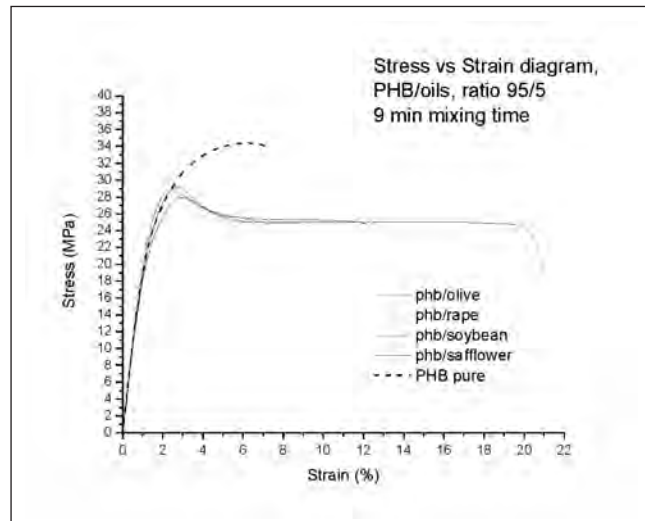


**Figure 13.** PHB/olive 80/20. Surface showing encapsulated oil which comes from saturation. Obviously mechanical properties have been affected. Digital camera.



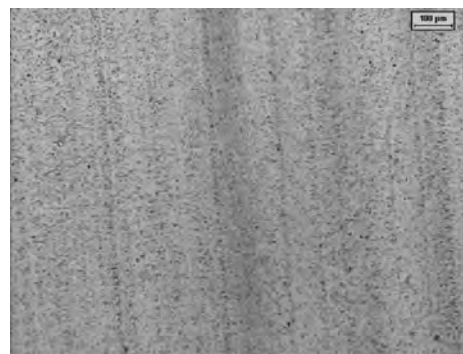
**Figure 14.** PHB/safflower at 80/20 ratio. System poorly dispersed due to incompatibilities. Holes caused by saturation or contamination of the polymeric matrix. POM 5X.

When oils are mixed in concentration of 5% better results are observed and it may indicate a plasticization process in the end up product. As seen in Figure 15 the resulting material combines good mechanical properties with high tensile modulus, a clear elastic and plastic region and a high yield strength point ending up with



**Figure 15.** Stress vs. strain diagram PHB/CAE's 95/5.

an increment in the strain at break when compared with samples at 20% weight concentration and compared also with the pure material itself. For all samples, the elasticity modulus was reduced just slightly, being safflower (9% less modulus than the pure material) the best product, whereas rapeseed, soybean and olive decreased the modulus just in some fraction. When strain at break is observed, it is found that safflower improved in rising it to 171%. This result is comparable with data from CAEI. This behavior is corroborated with the results of the internal mixing which exhibited at this ratio a plasticization effect (slight increase of torque after filling the chamber). It is possible to conclude that the concentration of 5% is the only possible combination acceptable in this report, giving that at 10% amount of plasticizer the strain at break did not improve with



**Figure 16.** PHB/safflower 95/5. A well dispersed system is observed. POM 5X.



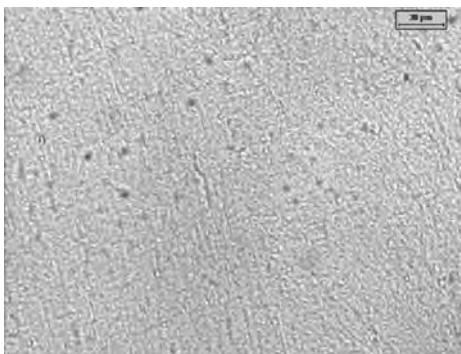


Figure 17. PHB/soybean 95/5. POM 20X.

any of the oils evaluated when compared with the pure PHB. The elasticity modulus at this concentration was reduced only some points, implying that the rigidity and specifically the brittleness of the material were not reduced significantly. Data presented in this example also demonstrate once more that the olive oil is not acting as a plasticizer in any of the experiments. Here this material did not improve the strain at break nor the elasticity modulus was reduced when compared with the pure material and it also contained a high elasticity modulus resulting in a very brittle and fragile material. This was also demonstrated in the internal mixing process where no torque-rise was observed; for that reason, it was excluded from the analysis in that chapter. In general, the use of oils as plasticizers deserves further investigation, specially in finding a right saturation point which probably is located between 10% and 5% of con-

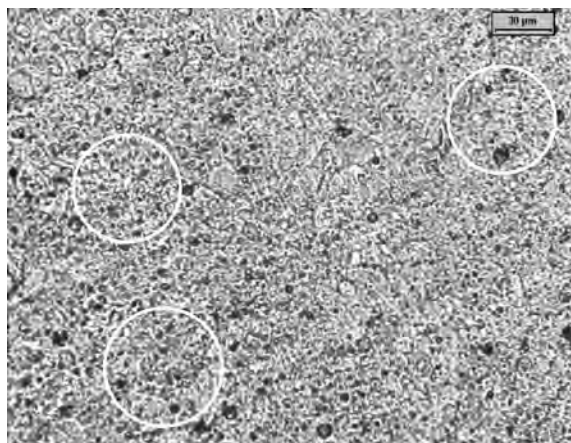


Figure 18. PHB/olive 95/5 poorly dispersed olive oil, confirming the total incompatibility of this material with PHB. Circles correspond to oil droplets encapsulated in the PHB matrix. POM 20X.

centration. This also give us notice about the breaking point of the oils acting as plasticizer and turning it into lubricant which ruined up the plasticization process in the internal mixer.

In Figure 19 the behavior of the additives according to elastic modulus is shown. From these, it is determined that both types of plasticizers, CAE's and oils, reduced the elastic modulus when concentration of plasticizer is augmented if compared with pure PHB. An important reduction of the E modulus is observed in the blends PHB/CAE's, especially for CAEI and CAEII which diminished this variable in 54% and 61% respectively, indicating that the material behaves according to its stress-strain behavior like a soft-ductile material due to its smaller E modulus and smaller tensile strength at break. PHB/oils present a small reduction in E modulus, just 17% for PHB/safflower at 90/10 ratio, and approximately a decrease of 12% at 80/20 ratio for the other oils. At 5% concentration soybean and rapeseed oil do not alter the E modulus of the pure material, but safflower provides a 10% less brittle material.

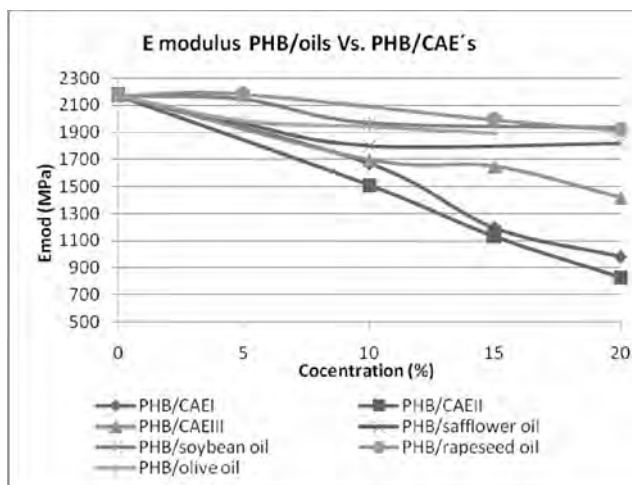


Figure 19. E modulus vs. concentration – oils and CAE's.

From the strain at break curves in CAE's it is determined that sample blended with CAEI displayed an expected tendency increasing the percentage of elongation when the concentration of plasticizer was also increased; in this case, the highest strain at break was observed at a content of 20% with an increment of 241% when compared with PHB alone. CAEI and CAEII do not follow a clear tendency when content of

plasticizer is rising; this is probably because the saturation point or plateau for both additives is observable at 10% concentration. Further addition results, for either CAEII or CAEIII, in a reduction of the strain at break.

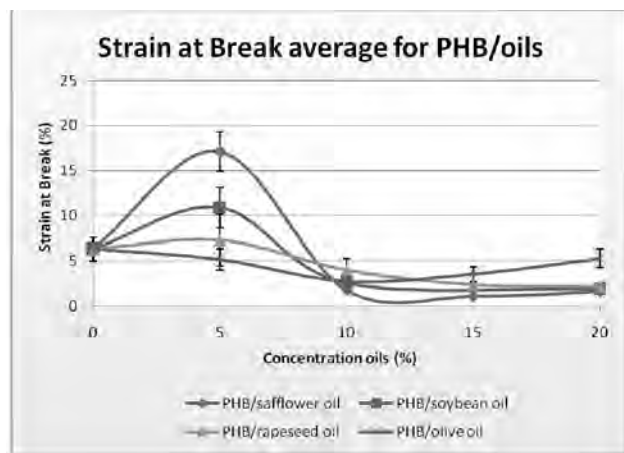


Figure 20. Strain at break vs. concentration in oils.

The results of strain at break for oils are clear and confirm the data evaluated in the internal mixing process. Figure 20 shows that the highest level of strain at break reached was obtained when oils were added at a ratio 95/5. The blending PHB/safflower oil was the best combination, presenting an increment of approximately 171% when compared with the pure PHB. In that tendency PHB/soybean increased 73% the elongation at break whereas PHB/rapeseed showed an improvement of just 15%. PHB/Olive oil blends, as observed in all tests, is completely incompatible with PHB and do not present any result which could be comparable with the other blends. Voids are observed in this system (Figure 18).

#### Summary to Mechanical test

The brittleness of PHB could be overcome by blending with CAE's as shown in Figure 12. From these, the CAEI at ratio 80/20 contain in these report the best results. When compared with pure PHB, the elasticity modulus was reduced 54% whereas the strain at break was increased to 241% reaching at the end a strain at break of 21.5%, being this result the best among all the experiments realized. CAEIII work out better at lower

concentrations, e.g. 90/10, with 98% improvement in the elongation at break.

When oils are mixed in concentration of 5%, better results are observed and they may indicate a plasticization process in the blended system. As seen in Figure 15, the resulting material combines good mechanical properties with high tensile modulus, a clear elastic and plastic region and a high yield strength point. Safflower came out with an improvement in the strain at break raising it to 171%, almost comparable with the best result obtained with CAEI. This behavior is corroborated with the results of the internal mixing process. The ratio 95/5 is the only possible combination in this report, in the case of oils.

As a general point, the use of oils as plasticizers deserves further investigation, specially in finding the right saturation point which probably is located between 10 and 5% of concentration.

#### DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETRY (DSC)

DSC is a commonly used method for the thermal analysis of polymers used to measure the heat capacity of a sample as a function of temperature (3). DSC determines the quantity of heat that is either absorbed or released by a sample that undergoes a physical or chemical change which alters the internal energy known as enthalpy.  $H$  is defined as:

$$\Delta H = \int C_p \cdot dT$$

Eq. 1 Enthalpy.

where  $C_p$  is the quantity of energy needed to raise the temperature of 1 g of material by 1 °C at constant pressure, this is known as specific heat capacity; and  $dT$  is the variation in temperature.

DSC device: Mettler Toledo 820, heat flux type  
 Method: T min -50°C Tmax = 200°C HR=10°C/min,  
 CR=10°C/min, purge element: N<sub>2</sub>=80ml/min

Conditions and program for PHB/plasticizer system:

- **First heating rate:** The samples (between 5 -15 mg) when encapsulated and introduced into the machine are heated from 25 to 200°C at a heating rate of 10°C/min, once at 200°C. There is a holding time of 2 minutes.
- **First cooling rate:** after 2 minutes at 200°C and a cooling rate of 10°C/min, samples reach a temperature of -100°C. There is a holding time of 2 minutes at -100°C.
- **Second heating rate:** after a holding time at -100°C = 2 min, increase with a rate of 10°C/min to a maximum temperature of 200°C. Holding time at 200°C = 2.
- **Second cooling rate:** at the same rate (10°C/min) decrease temperature to 25°C to finish the experiment.

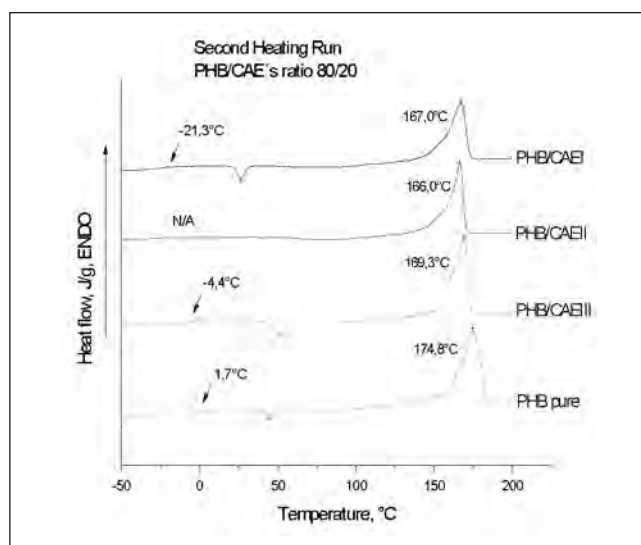


Figure 21. Second heating cycle PHB/CAE's 80/20.

From Figure 21, it is seen that the maximum melting temperature slightly decreases in all blends when compared with the PHB alone. The most efficient effect is detected in the blend PHB/CAEII at ratio 80/20 with a final  $T_m$  of 166,0°C; this is attributed to the effect of disordering of the crystalline part of PHB due to the presence of the plasticizers in the polymer phase. In other words, a somewhat less ordered but more homogeneous crystalline phase is formed.

Curves show also a distinct exothermic peak of cold crystallization of PHB in the temperature range 20°C – 50°C for all concentrations. This phenomenon

highlight the crystallization of the part of PHB which did not have time to crystallize upon rapid cooling. The only system which did not present such a behavior was the PHB/CAEII, indicating probably that a fully equilibrium crystalline phase arises here.

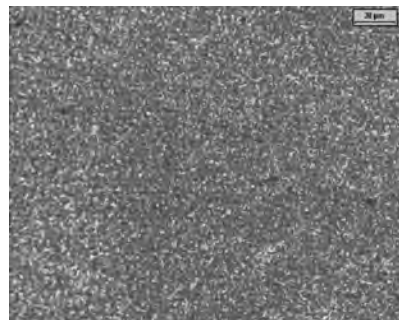


Figure 22 PHB/CAEII 90/10. From here it is assumed that the size of spherulites and crystallization process is homogenous. POM 20X.

For all systems (CAE's at different concentration), one glass transition temperature ( $T_g$ ) is registered which indicate a complete compatibility of the plasticizer with PHB; as expected, the plasticizers investigated decreased the  $T_g$  with respect to that of the original material. This is explained by the weakened of the intermacromolecular interaction in the amorphous part of PHB and the increase in the free volume. The lowest  $T_g$  is observed in the PHB/CAEI-80/20 curve with a  $T_g$  of -21,3 °C.

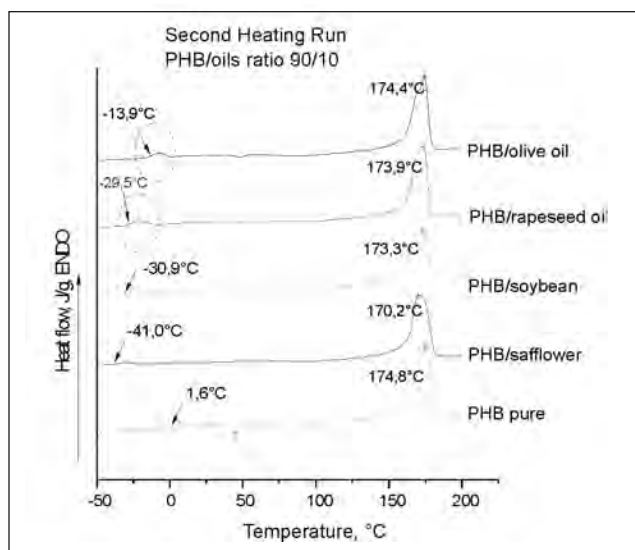


Figure 23. Second heating run PHB/oils 90/10.

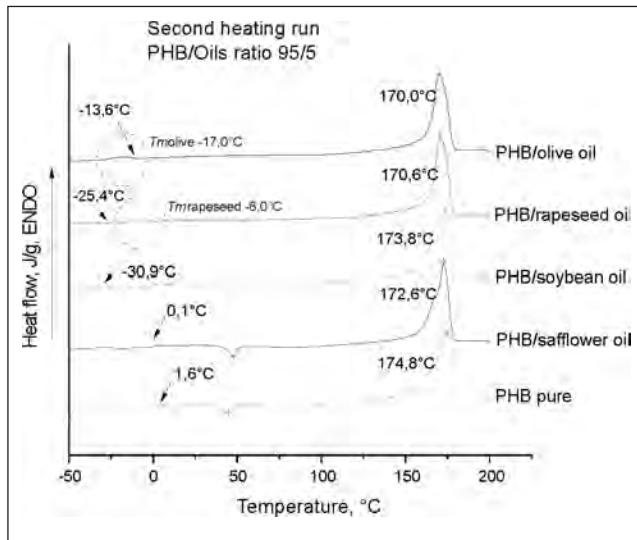


Figure 24. Second heating run PHB/oils 95/5.

When  $T_m$  is analyzed from figures 23 and 24, the maximum melting temperature decreases a few grades in all blends when compared with the original value of the pure material. The highest reduction is detected in the blends PHB/safflower at ratio 90/10 and PHB/olive at ratio 95/5 reaching a final  $T_m$  of  $-170,0^{\circ}\text{C}$  (Figure 24). It is seen also that a series of dual peaks or small shoulders are formed specially in the melting process of PHB/oils at ratio 90/10 (soybean, rapeseed and oil). These results from two different crystal modifications in the pure material making the quantitative interpretation of their heating curves difficult. It seems reasonable to conclude in these cases that the PHB might have been contaminated by residual particles of oils, clearly explained by a saturation of the content of plasticizer

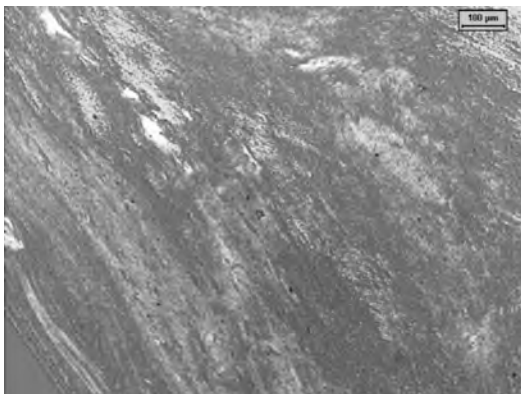


Figure 25. Poorly dispersed sample containing soybean at 15%. POM 5X.

at 90/10 ratio. At lower concentrations, e.g. 95/5, this behavior was observed by the sample with soybean oil.

In figures 23 and 24, aside from the dominant melting peak of the PHB (approx.  $170^{\circ}\text{C}$ ), the DSC analysis displays small melting peaks highlighted by dashed circles that may represent melting temperatures of the oils described. This is clearly related to the little structural similarity of the two semicrystalline materials. Theoretical values for melting temperatures of olive and rapeseed oil are pointed at  $-6^{\circ}\text{C}$  and  $-10^{\circ}\text{C}$  respectively (39). In general for PHB/oils at 95/5, the temperature range of the melting process becomes narrower; this means that, in presence of plasticizers, a somewhat less ordered but more homogeneous crystalline phase is formed.

Blend PHB/safflower at 95/5 ratio in Figure 24 shows also a distinct exothermic peak of cold crystallization of PHB in the temperature range  $25^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$ . As mentioned previously, this phenomenon highlight the crystallization of the part of PHB which did not have time to crystallize upon rapid cooling; the other blends without the cold crystallization peak may indicate that a fully equilibrium crystalline phase arises there.

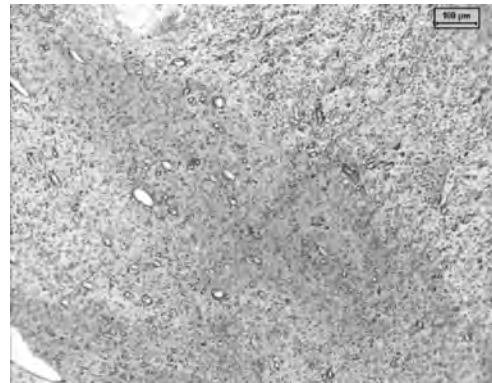


Figure 26. PHB/soybean 85/15 containing voids. POM 5X.

For each system analyzed (oils at different concentration), one glass transition temperature ( $T_g$ ) is registered. As expected, the plasticizers investigated decreased the  $T_g$  with respect to that of the original material; nevertheless the  $T_g$  measured in oils at 10% concentrations was registered by the machine assuming this temperature from the small melting peaks of oils.

From the first cooling run all, PHB/oils blends show a crystallization peak occurring at higher temperatures when compared with the crystallization of the pure material this may explain the influence of the oils on the processing of PHB. Oils or some contaminated fractions of PHB could act as a nucleating agent and displace the crystallization curve to the right as obtained in curves, from here the nucleation and growth rates of spherulites are faster than the crystallization process in the pure PHB.

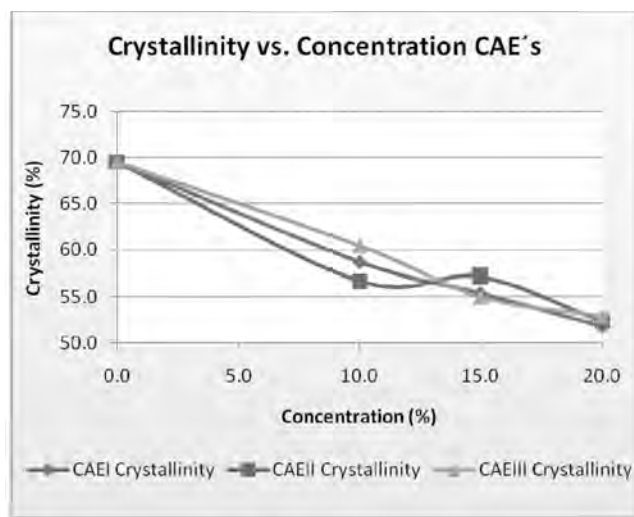


Figure 27. Crystallinity by DSC vs. Concentration CAE's.

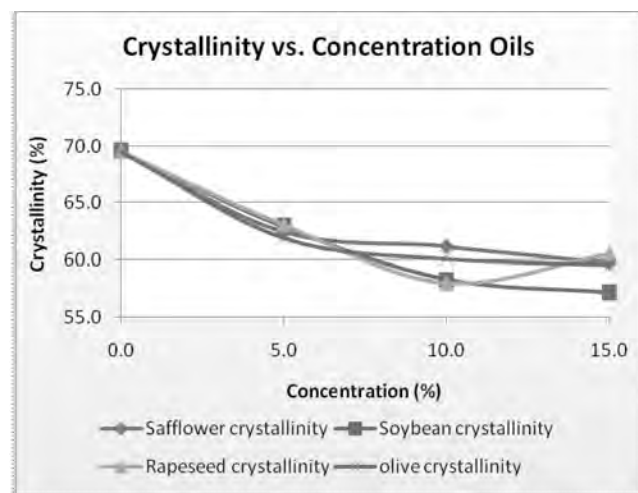


Figure 28. Crystallinity by DSC vs. Concentration oils.

When crystallization is plotted against content of plasticizer in figures 27 and 28, all plasticizers, as expected, caused a considerable decrease in crystallinity when the concentration is augmented due to the role played by a foreign substance present in a crystallizing polymer which generates a disorganizing effect in the matrix of PHB. Better results in reduction of crystallinity were obtained by the systems PHB/CAE's which reached at 20% concentration a crystallization value close to 52% when the original crystallinity of the PHB was closed to 70%. This can be explained by the higher degree of compatibility showed by CAE's when compared with the vegetable oils which were assumed as real plasticizers.

## CONCLUSIONS

Plasticization in the internal mixing device depends on time of internal mixing and on the amount and kind of plasticizer added. It was determined that plasticization induced by CAE's and oils at low contents occurs at different mixing times. When the concentration of these additives is lowered the plasticization process takes place at shorter times; compatible additives, such as CAE's, obviously contribute to the process.

The temperature profile decreased during the mixing process with all plasticizers at any concentration; this mean that the small processability window recorded in literature for PHB is widened here, avoiding thermal degradation of the material.

When oils are processed in the mixer at high concentrations they perform more like a lubricant than a real plasticizer: shear rate is lowered making dispersion and addition of particles in the polymer matrix a difficult task; this is registered in low torque. At high contents also, e.g. 10% and 20%, plasticization may take place at longer mixing times specifically rapeseed oil at ratio 80/20 and 90/10 and safflower at ratio 90/10. This could be attributed to the secondary lubricating effect of oils inside the machine. An important effect is the one obtained with samples at 95/5 ratio. They presented a slight increase in torque after the filling process meaning that there exists incorporation of particles into the PHB. In general the oils analyzed in this report do not show a good compatibility with the polymer matrix, this may be caused probably by low polarization effect in the intermacromolecular region.

It may be assumed that CAE's have a real effect in PHB giving that in the internal mixing process there was a clear increase in torque after the addition of them, indicating a complete incorporation of the particles into the polymer. The plasticization effect was clearer for those systems mixed at 90/10 ratio; however, for samples with higher plasticizer ratios, 85/15 and 80/20, the reduction of the maximum temperature profile was important facilitating the further processability of the material without thermal degradation.

The brittleness of PHB has been improved by blending with CAE's; from those systems the CAEI at ratio 80/20 displayed in this report the best results. When compared with pure PHB the elasticity modulus was reduced 54%, whereas the strain at break was increased to 241% reaching at the end a strain at break of 21.5%, being this result the best among all the plasticizers utilized. On the other hand, only PHB/oils systems mixed at 5% concentration yield good results; it may indicate a plasticization process in the end-product as recorded also in the internal mixing process. The resulting material combines good mechanical properties with high tensile modulus, clear elastic and plastic region and a high yield strength point. Safflower gave an improvement in the strain at break raising it to 171%.

For oils the ratio 95/5 is the only possible combination acceptable in this report. According to data from the internal mixing, tensile, and DSC tests, olive oil is not acting as plasticizer in any of the experiments.

As a general point the use of oils as plasticizers deserves further investigation specially in finding a right saturation point which probably is located between 10 and 5% of concentration; it is also recommended make the internal mixing process at longer times to corroborate or not if the plasticization process will take part at times longer than 9 minutes of mixing.

It could be expected that the plasticizers causing a sharp decrease in  $T_g$  in PHB would considerably increase the elongation at break of the polymer. For the most of the plasticizers studied, this regularity was not observed in practice (as shown in figures representing the mechanical properties and  $T_g$ ); the experimental data available are not sufficient for presenting an explanation for this factor. The most efficient decrease in  $T_g$  and  $T_m$  was observed with the addition of CAEI at 20% content. Systems blended with CAE's and oils influenced the crystallization temperature, oils moved

it to higher values in temperature when compared with the data from PHB pure. This may be explained by the fact that oils or some contaminated fractions of PHB could act as a nucleating agent and displace the crystallization curve; besides, systems blended with CAE's moved the crystallization process to lower temperatures which may be explained by the performed nucleation of the additive which probably reduces the mobility of the PHB, retarding the lamella formation. All plasticizers analyzed caused a considerable decrease in crystallinity when the concentration is augmented due to the role played by a foreign substance present in a crystallizing. Better results in reduction of crystallinity were obtained by the systems PHB/CAE's which reached at 80/20 ratio a crystallization value close to 52% when the original crystallinity of the PHB was recorded at 70%.

From data obtained in this report, it is necessary to evaluate and state some conclusions about the functionality of the plasticizers evaluated, in this case CAE's and vegetable oils. The functionality of the polymer/plasticizer system depends on the low molecular weight and the number of polar groups in the plasticizer. From here, it is concluded that there exist a polar compatibility that ranged from slightly to strongly polar interaction. CAE's present a strong compatibility with the polar polymer (ester groups) and a non polar functionality for internal lubrication (hydrocarbons). The polar portion of the plasticizer provides the attractive force necessary to attach to the polymer chain, so in that way the plasticizer is attached to the polymer in the points of polar attraction, whereas the non polar or hydrocarbon region which is not attractive act as a lubricant between polymer chains. In the case of oils the lacking of strong polar groups, e.g. esters or aromatic groups, induces in the polymer mostly a lubricant effect between the macromolecules, especially at high content of plasticizer, due to the large hydrocarbon branches presented in the fatty acid molecules which result in a poorly dispersed system when blended with the polymer, affecting the mechanical and thermal properties. The non polar hydrocarbon alkane chain is an important counter balance to the polar acid functional group; this may explain the acceptable and poor behavior of the safflower and olive oils as plasticizers in PHB. It is expected that the acid functional group of safflower oil (linoleic acid for safflower, oleic and palmitic acid for olive) dominates and gives the whole molecule a more polar character

than the other oils, whereas the longer non polar hydrocarbon chains give the molecule a non polar character. This characteristic is clear for olive, and rapeseed oils.

## OUTLOOK AND RECOMMENDATIONS

With base on the procedures realized and results obtained, it is recommended for further investigation that:

- Verify if the plasticizers migrate from the polymer matrix, especially for CAE's at all the concentrations and oils at 5% content. The same experiments have to be done to the samples with a difference of at least 6 months to check if the mechanical and thermal properties are affected by time between experiments. It is expected that, if the plasticizers migrate or volatilized from PHB, the properties would be diminished drastically; that is recorded mainly by a higher brittleness, higher crystallinity and less elongation at break.
- Synergies are also interesting to investigate, for example, analyzing the behavior of systems with synergies between CAE's and oils, or between these plasticizers and nucleating agents which could improve the mechanical properties via reduction of crystallinity.
- It is important determine the DSC curves for oils alone, and compare them with the results obtained in blends at ratios 90/10 and 95/5 because the  $T_g$  recorded could be understood as the melting temperature corresponding to the oils themselves and not to the  $T_g$  corresponding to the final blended product.
- From the results of the internal mixing process it is suggested realize the mixing process for the samples blended with oils at higher mixing times. This could be done by try-error experiments with a starting mixing time of 30 minutes to determine if there exists a possible plasticization process in this range of time.
- Use of epoxidized oils to improve the reactivity of the plasticizers via increasing of the polarity, as shown in molecules. A few papers have established that epoxidized soybean oil has brought better results when compared with the non epoxidized molecule; this is mainly achieved by the cyclic ether with only three ring atoms. This ring approximately is an equilateral triangle, which makes it highly strained.

The strained ring makes epoxides more reactive than other ethers; consequently this will provide a better compatibility of the plasticizer to the macromolecular structure of the polymer matrix.

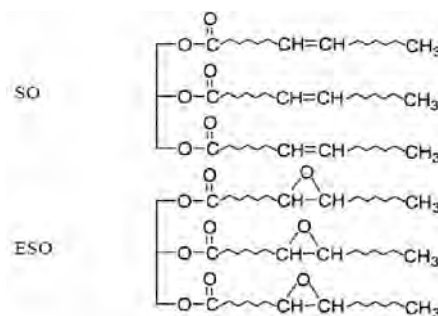


Figure 70. Soybean and epoxidized soybean (21).

## REFERENCES

1. De Almeida, Bueno (2004). Use of fatty alcohols as plasticizers to improve properties and processability of PHB. Brasil: World Intellectual Property Organization, WO 2006/012917.
2. Arcana, Made (2006). Synthesis of polyblends from polypropylene and poly(R,S)-hydroxybutyrate. Indonesia: Polymer International. DOI:10.1002/pi.1994.
3. Ghaffar, Ahmed Mohamed El-Hadi Abdel (2002). *Development of a biodegradable material based on PHB*. Germany: ULB Sachsen-Anhalt.
4. El-Taweel, S.H. (2004). *Stress-Strain Behavior of Blends of Bacterial PHB*. Egypt: Wiley InterScience. DOI 10.1002/app.21215.
5. Padermshoke, Adchara (2005). *Melting behavior of poly(3-hydroxybutyrate)*. Japan: Science Direct, 2004. A 61, 541-550.
6. Avella, M. (2000). Properties of blends and composites based on PHB and PHBV copolymers. *Journal of Material Science*, 35, pp. 523-545.
7. Chen, G. X. (2002). Structure and mechanical properties of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate). *Journal of Materials Science*, 21, pp. 1587-1589.
8. Beaucage, G. (1997). *Persistence Length of Isotactic Poly(hydroxybutyrate)*. USA: Macromolecules, 30, 4158-4162.
9. Gordeyev, S. A. (1999). Processing and mechanical properties of oriented PHB fibers. *Journal of Materials Science Letters*, 18, pp. 1691-1692.
11. S.H. El-Taweel, G.W.H. Hoehne (2004). *Glass transition and the rigid amorphous phase in semicrystalline blends of bacterial PHB*. Germany: Science Direct, Polymer 45, pp. 983-992.
12. Liu, W. J. (2001). Effect of Nucleating Agents on the Crystallization of PHB-co-3-hydroxyvalerate. *Journal of Applied Polymer Science*, Bd. 86, pp. 2145-2152 (2002).
13. Gächter/Müller (1988). *Plastics Additives*. USA: Hanser.
15. Grossman (2001). *Polymer Modifiers and Additives*. USA: CRC Press.
16. Wypych, George (2004). *Handbook of Plasticizers*. Canada: William Andrew Inc.

19. Shin, Jae (2004). *Effect of biodegradable plasticizers on thermal and Polymer Testing*, Bd. 23, pp. 455-460.
21. Brennan, J.G. (1990). *Food Engineering Operations*. USA: Elsevier Science Publishing.
24. The olive oil source. Chemical and Nutritional Properties of Olive Oil. [Online] 2007. <http://www.oliveoilsource.com/olivechemistry.htm>.





# Historia ampliada y comentada del análisis de ciclo de vida (ACV) Con una bibliografía selecta

Artículo recibido: 05/10/2008  
Evaluación: 06/10/2008  
Aprobado: 27/10/2008

JAIRO RAÚL CHACÓN VARGAS

Ingeniero industrial. M.Sc. Docente de planta del Programa de Ingeniería Industrial de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Dicta las asignaturas de producción más limpia y gestión ambiental en procesos.

## Resumen

En este artículo se comentan el panorama histórico y las tendencias del análisis de ciclo de vida (ACV) desde sus inicios, en la década de los sesenta, hasta nuestros días. Se comienza con los principales aspectos que desencadenaron en el mundo el interés por el ACV, y posteriormente se presentan los hitos históricos más importantes del ACV en Estados Unidos.

Luego se expone la evolución que tuvo esta herramienta de gestión ambiental en países pioneros que la investigaron y aplicaron en Europa, como Reino Unido, Alemania, Bélgica, Suecia, Suiza e Italia. Igualmente, se muestra la evolución que tuvo el ACV en algunos países del Asia que fueron también líderes en este campo, como Japón, China, Corea y Tailandia. La región latinoamericana también es objeto de estudio en este artículo, destacando aquellos países líderes en el estudio y aplicación del ACV como México, Chile, Brasil, Argentina y Colombia.

Por último, se presentan las organizaciones, programas y foros mundiales más importantes que investigan y difunden el pensamiento de ciclo de vida, como el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, la Sociedad de Toxicología Ambiental y Química, la Organización Mundial de Normalización y el foro mundial de expertos de ACV, denominado Iniciativa del Ciclo de Vida de UNEP-SETAC.

**Palabras claves:** análisis de ciclo de vida, evaluación de ciclo de vida, evaluación ambiental de productos, producción más limpia, desarrollo de productos sostenibles, pensamiento de ciclo de vida, gestión del ciclo de vida, medio ambiente y ecodiseño.

## Abstract

This paper offers a commented historical overview and the tendencies of the Life Cycle Assessment (LCA) starting from its beginning in 60's to up to now. It starts with the main aspects that in the world unchained the interest for LCA, afterward, LCA historical milestones of the United States are explained.

Then, it is explained the evolution that this environmental tool had in the pioneers countries of Europe like United Kingdom, Germany, Belgium, Sweden, Switzerland and Italy that researched about LCA and applied it.

The evolution of LCA in some pioneers countries of Asia like Japan, China, Korea and Thailand is also explained. Latin America is also studied highlighting those countries like Mexico, Chile, Argentina, Brazil and Colombia that lead the early LCA activities in this region.

Finally, the most important organizations and programmes like Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), International Organization for Standardization (ISO), United Nations Environment Programme (UNEP) and the Life Cycle Initiative UNEP-SETAC that promote in the world the research and dissemination of LCA are presented.

**Keywords:** Life Cycle Assessment, life cycle analysis, environmental assessment of products, cleaner production, development of sustainable products, life cycle thinking, life cycle management, environment, ecodesign.

## EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)

El análisis de ciclo de vida (ACV), en teoría, es un método analítico (Chacón, 2008) que contempla y hace una interpretación de los impactos ambientales potenciales de un producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida. El ACV es “la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema producto a través de su ciclo de vida” (NTC-ISO 14040). El análisis incluye entonces la extracción de materias primas, producción, transporte, distribución, uso, reciclaje y disposición final.

## ORIGEN DEL NOMBRE “ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA” O “EVALUACIÓN DE CICLO DE VIDA”

Lo que hoy se conoce con el nombre de *evaluación de ciclo de vida* (*life cycle assessment*; suele también indistintamente llamársele análisis de ciclo de vida, ACV) fue la denominación que por fin acogió la comunidad internacional de expertos en el tema en el año de 1991, debido a que la aplicación de la metodología de ACV no sólo incorpora elementos objetivos sino también elementos subjetivos (Werner, 2005).

El ACV solía recibir anteriormente otros nombres, tales como ecobalances, análisis del perfil ambiental y de recursos, análisis ambiental integral, perfiles ambientales, entre otros, y se le comparaba con otras herramientas tales como evaluación del riesgo ambiental y la evaluación de impacto ambiental en cuanto al alcance, las ventajas y las desventajas entre uno y otro métodos (Baunmann & Tillman).

## ASPECTOS QUE DESENCADENARON EL INTERÉS INICIAL POR EL ACV

La crisis del petróleo en los comienzos de los años setenta

La guerra de Yom Kippur, que enfrentó militarmente a Israel contra Siria y Egipto en octubre de 1973, hizo que la Opep<sup>1</sup> embargara el suministro de petróleo a los países de Europa y Estados Unidos, como respuesta a la decisión que tomó este último de apoyar militarmente a Israel durante la guerra antes mencionada.

Lo anterior trajo como consecuencia un aumento importante en los precios mundiales del petróleo.

La crisis llamó la atención de los países desarrollados, principalmente de Estados Unidos, sobre la dependencia

marcada en los combustibles fósiles para el crecimiento industrial y la economía del mundo, lo que llevó al debate público la necesidad de tomar medidas para el ahorro de la energía y un interés mayor sobre la búsqueda de energías alternativas (para ese entonces se hablaba de la solar y eólica, en especial) y sobre la urgencia de desarrollar productos ambientalmente responsables.

Los estudios del Club de Roma

El informe *Los límites del crecimiento* (*Limits to growth*), publicado en 1972, escrito por Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jorgen Randers y William W. Behrens III, y auspiciado por el Club de Roma<sup>2</sup>, llamó la atención sobre el crecimiento rápido de la población mundial y las incidencias negativas que ésta tenía sobre las materias primas y recursos energéticos finitos, y que despertó una mayor conciencia e interés por la protección del medio ambiente después de la crisis del petróleo.

También es interesante destacar la publicación del año de 1972 titulada *Un plan para la sobrevivencia* (*A blueprint for survival*), escrita principalmente por Edgar Goldsmith y Robert Allen, que precedió la primera cumbre mundial sobre ambiente y desarrollo que tuvo lugar en Estocolmo en 1972 y que llevó por nombre la Conferencia de las Naciones Unidas de 1972 sobre Ambiente Humano (USEPA, 2000); éste fue uno de los primeros escenarios internacionales para la discusión sobre protección ambiental, crecimiento y desarrollo económico, que sentó parte de las bases que se plantearon posteriormente de manera formal en el Informe Brundtland de 1987, *Nuestro futuro común*, para definir el concepto de desarrollo sostenible como política ambiental global para enfrentar los problemas ambientales mundiales, regionales y locales que afrontaba y sigue afrontando el planeta, y que luego se presentó y se discutió ampliamente en la Cumbre de Río de 1992 (Chacón, 2008).

En este documento se planteó de nuevo un debate del papel de las sociedades industrializadas, y la tecnología y su incidencia sobre los recursos naturales renovables y no renovables, además de que se hizo un llamado para que se efectuaran cambios radicales en los patrones de consumo y producción y se evitara así el colapso de la humanidad.

## NACIMIENTO Y ADOLESCENCIA DEL ACV EN ESTADOS UNIDOS Y OTROS HITOS IMPORTANTES

### En Estados Unidos

Quizás uno de los primeros estudios en los que se empezaron a tener en cuenta los impactos ambientales de los productos fue el que Harold Smith presentó en la Conferencia Mundial de Energía de 1963, en el que informaba sobre las cantidades de energía para la fabricación de productos químicos.

Otro trabajo que puede catalogarse de pionero y en el que se aplicó el concepto de ciclo de vida se hizo entre 1960 y 1970, para determinar requerimientos de energía de algunos procesos y sistemas y el análisis de los efectos ambientales por el empleo de la energía. Se elaboró con el auspicio del Departamento de Energía de Estados Unidos (U.S. Department of Energy) (Bishop, 2000).

En 1969, Harry E. Teasley Jr., de Coca-Cola Company, quien estaba al mando de la División de Envases, encargó un estudio (nunca publicado debido a su contenido confidencial) al Midwest Research Institute (MRI), que tenía su oficina en la ciudad de Kansas, con el objeto de determinar las cantidades de energía, materiales e impactos ambientales asociados a lo largo del ciclo de vida de envases, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. A este trabajo se le denominó “Análisis del perfil ambiental y de recursos” (Resources and Environmental Profile Analysis, Repa). (Hunt et al., 1996; Ayres, 1995; European Environment Agency; Sullana et al., 1997).

Lo que motivó a Coca-Cola Co. a hacer este estudio fue el conocimiento de los efectos ambientales de la fabricación y uso de los envases con los siguientes fines (Ecobilan, 2002):

- Escoger entre productos embotellados en plástico y productos embotellados en vidrio. Algo bien importante era saber si existía la posibilidad y conveniencia para la compañía de emplear botellas plásticas, lo cual para esa época se consideraba una idea traída de los cabellos.
- Seleccionar si era conveniente que la misma empresa fabricara el envase o lo hiciera externamente.
- Conocer qué gestión ambiental debería dársele al envase escogido (reciclaje o disposición final).

Gracias a esto se descubrió que los envases plásticos eran la mejor opción, contrario a lo que todos esperaban; así las cosas, el estudio de Coca-Cola sirvió también para cambiar en el público y la industria la percepción negativa que se tenía por los plásticos, considerados “los malos del paseo”, reputación que tenía bases infundadas (Hunt et al., 1996).

Un resumen del estudio se publicó en 1976 en la Oficina de Evaluación de Tecnología del Congreso de Estados Unidos (The Office of Technology Assessment of the U.S. Congress) y posteriormente apareció un artículo en abril de 1976 en *Science Magazine* (Hunt et al., 1996).

A partir de este estudio en Estados Unidos se empezó a llamar Repa a la metodología para cuantificar los recursos y las descargas ambientales de los productos, al tiempo que se buscaba perfeccionar cada vez más dicha metodología en ese país.

Las contribuciones más importantes hechas durante los años setenta en ACV se publicaron en el *Journal Energy Policy* entre 1974-1975 y posteriormente se compilaron en un libro de J.A.G. Thomas en 1977, titulado *Análisis de energía (Energy analysis)* (Boulder Co.: Westview Press) (Ayres, 1995).

En 1975, William Franklin, uno de los expertos en REPA del MRI, fundó junto con Marge Franklin una de las empresas líderes en ACV de Estados Unidos, la firma Franklin Associates, la cual llevó a cabo algo más de 60 estudios, principalmente para compañías del sector privado.

Hacia 1971, la academia de Estados Unidos, de manera independiente, empezó a estudiar el ACV; por ejemplo, la Universidad de Illinois (con la dirección del profesor Bruce Hannon) y la Universidad de Stanford fueron líderes al respecto. Estos trabajos principalmente eran proyectos de los estudiantes de ingeniería y de otros interesados por temas de la ecología. En ambas universidades la atención se centró en estudiar aspectos de consumo de energía de botellas para bebidas.

Otro estudio para la misma época en el que se intentaba aplicar el concepto de ciclo de vida en particular con la determinación de los residuos generados por los procesos de producción, en contraste con otros estudios que su énfasis era determinar el consumo neto de energía, fue el que patrocinó el Programa de la Fundación Nacional para la Ciencia sobre Investigación de las Necesidades Nacionales (Programme of

National Science Foundation of Research on National Needs, Rann) (Ayres, 1995), que como caso trató la comparación de botellas de vidrio, polietileno (PE) y policloruro de vinilo (PVC).

Este estudio tuvo un énfasis en el desarrollo de un modelo (denominado modelo producto-materiales-procesos) que permitió tener un método para realizar lo que hoy se conoce como la fase del inventario del ACV.

En 1971 se llevó a cabo un segundo Repa por MRI para Mobil Chemical Company, en el que se analizaron bandejas de espuma de poliestireno y bandejas de pulpa de papel que se utilizaban para empacar la carne que se vendía en los supermercados y tiendas de víveres.

Este estudio surgió porque los fabricantes de bandejas de cartón les decían a sus clientes que las bandejas plásticas eran un problema ambiental serio. Para salir de dudas, el personal directivo de Mobil encargó a MRI el estudio mencionado anteriormente. Para sorpresa de todos, las bandejas plásticas resultaron ambientalmente mejores; la razón principal es que la bandeja plástica pesaba muy poco y empleaba menos material, comparada con la bandeja de cartón, que era más pesada. Esta fue otra experiencia para la industria que la llevó a cambiar de opinión y dejar de ver al plástico como “el villano ambiental”.

Para la misma época, el Consejo Presidencial de Calidad Ambiental (Presidential Council for Environmental Quality), una agencia gubernamental de Estados Unidos, encargó al MRI varios estudios Repa sobre reciclaje de diferentes materiales, con el fin de ayudar en el establecimiento de políticas gubernamentales relativas a la gestión de los residuos sólidos.

En 1973 se creó en Estados Unidos el primer *software* sobre ACV financiado por una empresa cliente de MRI, el cual, como se entenderá, todavía no era perfecto y tenía ciertos errores que había que corregir para la lectura de los datos.

En 1972, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US Environmental Protection Agency, USEPA) encargó a MRI la realización de estudios para evaluar las implicaciones ambientales de envases para bebidas gaseosas y decidir si era conveniente promover desde el gobierno el uso de botellas y latas retornables en vez de las no retornables. En 1976, estos trabajos produjeron por parte de la agencia el informe titulado “Análisis del perfil ambiental y de recursos de nueve alternativas de envases para bebidas” (“Resource and en-

vironmental profile analysis of nine beverage container alternatives”), el cual se puso a disposición del público a través del Servicio Nacional de Información Técnica (National Technical Information Service, NTIS).

En 1976 la Agencia Federal de Energía de Estados Unidos (U.S. Federal Energy Agency) que después se convertiría en el Departamento de Energía (Department of Energy), puso a disposición del público bases de datos y la metodología Repa derivada de estudios que llevaron a cabo Franklin Associates y Research Triangle Institute sobre envases de bebidas.

En Estados Unidos, entre 1975 y 1988, empezó a disminuir el interés por el ACV porque se pensaba que después de haber pasado la crisis del petróleo, ya se habían hecho muchos estudios Repa y avances en soluciones a los problemas ambientales, principalmente sobre residuos sólidos y consumo de energía. Un reflejo de esto fue que USEPA decidió que el empleo del ACV no era práctico.

No obstante la falta de interés, se siguieron haciendo algunos trabajos por parte de las empresas sin que se conocieran sus resultados por el carácter confidencial de estos estudios, con excepción de un informe de 1980 elaborado por el Instituto de Investigación en Energía Solar (Solar Energy Research Institute) y otro publicado de manera parcial en 1978 por Good Year Tire & Rubber Company sobre empaques para bebidas gaseosas en PET de dos litros, que dio pie a que comercialmente empezara a tener acogida este tipo de envase.

Sólo hasta 1988 volvió a renacer el interés por el ACV en Estados Unidos, con ocasión de lo que algunos han denominado “la crisis de los residuos sólidos”, que comenzó a raíz de que un montón de basura en un barco yacía flotando en el mar y ningún puerto quería encargarse de su disposición final. Esto fue la chispa que encendió la preocupación en Estados Unidos por los residuos sólidos, aunada a la presión que para esa misma época estaban sintiendo las empresas multinacionales en sus sedes de Europa (por el Movimiento Verde, que hacía furor en ese entonces).

En 1990, un trabajo de Franklin Associates<sup>3</sup> generó gran controversia entre el público norteamericano porque fue el que primero usó el concepto de ciclo de vida para determinar los impactos ambientales adversos y benéficos de los productos, y también porque indagaba si ambientalmente eran mejores los pañales de tela reusables o los pañales desechables.

Es interesante mostrar los resultados que arrojó este estudio: los pañales desechables tenían 90 veces más residuos sólidos, pero únicamente el 2% de la totalidad de los residuos municipales, mientras que los pañales reusables ocasionaban diez veces más contaminación de las aguas (por los detergentes, principalmente) y consumían tres veces más energía.

En 1990 se desarrolló el primer taller de la Sociedad de Toxicología Ambiental y Química (Society of Environmental Toxicology and Chemistry, Setac) para discutir la metodología y utilidad de los Repa. Un resultado que cabe destacar de este encuentro fue la adopción en Estados Unidos del término “Life Cycle Assessment” (evaluación de ciclo de vida o análisis de ciclo de vida), acogido posteriormente por la comunidad internacional estudiosa de este tema.

En 1991, la Agencia de Protección Ambiental de Estados (US Environmental Protection Agency) empezó a promover el ACV con el propósito principalmente de poner a disposición del público en general guías metodológicas y bases de datos.

En cooperación con la Setac-Norteamérica, se llevaron a cabo cinco talleres (Ayres, 1995):

- El primero de ellos, cuyo tema central fue el inventario, en Vermont (Estados Unidos), en 1990.
- El segundo, sobre evaluación de impacto (parte I), en Leiden (Holanda), en 1991.
- El tercero, sobre evaluación de impacto (parte II), en Sandestin (Florida, Estados Unidos), en 1992.
- El cuarto, para hablar sobre calidad de los datos, en Wintergreen (Virginia, Estados Unidos), en 1992.
- El quinto, encuentro para discutir sobre códigos de prácticas, en Sesimbra (Portugal), en 1993.

En 1992, por encargo del Consejo de Gobiernos Estatales (Council of State Governments) y de la Agencia de Protección Ambiental, Tellus Institute elaboró el informe “Tellus Packaging Study: Inventory of Material and Energy Use and Air and Water Emissions from the Production of Packaging Materials” (Ayres, 1995).

En este mismo año, Franklin Associates publicó un artículo que incluía una explicación exhaustiva por primera vez de la metodología del ACV.

En 1993, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos publicó una guía para la etapa del inventario, y luego creó el Programa de Compras Verdes

(Environmentally Preferible Purchasing Program), para promover y ayudar al gobierno federal en la compra de bienes y servicios ambientalmente responsables.

Posteriormente, a través de su Oficina de Investigación y Desarrollo y del Instituto para la Investigación Ambiental y la Educación (The Institute for Environmental Research & Education, IERE), organizó en el año 2000 la Conferencia Internacional sobre Evaluación de Ciclo de Vida, que tuvo lugar en la ciudad de Washington D.C. Después, se continuaron realizando más eventos no sólo sobre este tema sino sobre gestión del ciclo de vida, en especial con el auspicio y financiación del IERE (Curran, 2007).

En el 2001 nació el Centro Americano para la Evaluación de Ciclo de Vida (American Center for Life Cycle Assessment, ACLCA), para fortalecer la capacidad en la disseminación del conocimiento sobre el ACV. Esta organización promovió el empleo del ACV mediante conferencias, talleres, proyectos específicos, donde participaron miembros del gobierno, la industria, academia, ONG, entre otros (Fava et al., 2002).

Existe una recopilación interesante de los estudios que se hicieron en Estados Unidos entre 1969 y 1995 (Curran, 1996), pero lamentablemente hubo dificultad en conocer listados tan exhaustivos como éste para otros países. Este listado no se incorporó al presente artículo debido a su extensión relativamente grande, pero si el lector lo desea puede consultarlo en la referencia citada.

#### OTROS HITOS IMPORTANTES EN LA HISTORIA DEL ACV

En 1971 se publicó el libro *Design for real world: human ecology and social change*, escrito por P. Papanek, en el que de algún modo se incorpora el pensamiento de ciclo de vida en el diseño de productos, al llamar la atención que los productos no sólo deben diseñarse teniendo en mente características estéticas sino que el producto debería mirarse más ampliamente, teniendo en cuenta otros factores como su función, su utilidad, reparabilidad, asequibilidad y sus consecuencias sociales y ambientales (Lewis et al, 2001).

Otro de los primeros elementos sobre pensamiento de ciclo de vida y una preocupación por los recursos minerales y la energía fue un aviso publicitario de la compañía de carros Fiat, que apareció en 1974 en la revista *The Times Magazine* (anexo 1) (Siegenthaler, 2008).

En 1979 se fundó Setac, que sigue siendo hoy en día una de las organizaciones líderes en el desarrollo y promoción de metodologías para el ACV.

En 1985, la Directiva de la Comunidad Económica Europea sobre Envases de Alimentos Líquidos (EC Directive 85/339) incorporó la aplicación del pensamiento de ciclo de vida al exigir a los fabricantes identificar y monitorear el consumo de energía y materiales, y la generación de residuos en los productos (Giudice et al., 2006).

En 1992 se fundó Spold (Society for the Promotion of LCA Development), que fue una asociación de 20 empresas grandes de Europa (entre ellas Ciba, Danfoss, Dow Corning, Electricote de France, Procter & Gamble y Unilever) con la finalidad de ayudar en la construcción de metodologías sobre ACV y promover su aplicación en la industria.

Infortunadamente, Spold terminó sus actividades a finales del año 2001, de las cuales las más destacadas (Bretz, 1998) fueron las siguientes:

- El desarrollo de un formato con aceptación internacional para la recopilación e intercambio de datos en estudios de ACV, específicamente para la fase de inventario (conocido como formato Spold).
- La publicación en 1993 del *LCA Sourcebook*, un estudio en su momento de los más completos sobre ACV, en el que se podía hallar información sobre las aplicaciones del ACV, contactos con expertos e instituciones de renombre internacional, principales bases de datos, etc.
- El lanzamiento en 1995 del proyecto “Winning Acceptance”, que fue un espacio para el diálogo constructivo entre gobierno, industria, ambientalistas, consultores e investigadores, y de un grupo de trabajo para acordar por consenso la adopción de buenas prácticas para la recopilación y uso de datos de inventario en el ACV, que dio como resultado el formato Spold mencionado anteriormente.
- El apoyo decidido que dio al proyecto LCANET/Chainet, el cual buscaba integrar el ACV con otros métodos de gestión ambiental<sup>4</sup>.

En agosto de 1993, Setac publicó *Setac guidelines for Life-Cycle Assessment: a code of practice* (Pap, 2004), donde se empezó a dejar claro el marco de trabajo para realizar

estudios de ACV y que tuvo en cuenta la ISO/TC-207, como se explica más adelante.

Francia publicó en marzo de 1994 la norma experimental *FR - X30-300 ACV. Definición, deontología y metodología*, que fue útil para las actividades de normalización del ISO/TC-207 (Díaz et al., 2004; Ecobilan, 2002).

Europa, a través del Consejo Nórdico de Ministros (Nordic Council of Ministers), publicó en 1995 *Nordic Guidelines for Life Cycle Assessments*, que presenta una descripción detallada de la metodología para elaborar estudios de ACV (Pap, 2004).

En 1995 nació el *International Journal of Life Cycle Assessment*, que sigue siendo hoy en día la publicación de más reconocimiento en el mundo científico dedicada al ACV y que en enero de 1996 sacó a la luz el primer número (volumen 1) (Klöppfer et al., 2005).

El 16 de junio de 1997 se publicó por primera vez la primera norma internacional de la serie ISO 14040 sobre ACV, titulada “Environmental Management -Life Cycle Assessment-Principles and Framework”, después de un arduo trabajo por parte del Comité Técnico de la ISO, el TC-207, específicamente el subcomité 5 (SC5). El código de prácticas que Setac publicó en 1993 fue un impulso e insumo importante para el SC5 en el desarrollo de este estándar mundial (Marsmann, 1997), así como la contribución de varios talleres internacionales en Europa y Estados Unidos promovidos por Setac, que a propósito tuvieron un énfasis marcado en el método para aplicar el ACV, pero muy poco de cómo implementarlo en la industria.

En 1998 se llevó a cabo un estudio en Europa acerca del uso del ACV en las empresas de Alemania, Italia, Suiza y Suecia (Frankl et al., 1999), que han sido países pioneros en el mundo en el estudio y aplicación de esta herramienta.

De este estudio se observó que Alemania, para esa época, era líder en la elaboración de estudios de ACV, seguido por Suecia y Suiza y, un poco más atrás, Italia. Sin embargo, cuando se tenían en cuenta los estudios de ACV realizados por unidad del PIB de cada país, el panorama era otro; esta vez Suecia se destacaba, seguido por Suiza, y a la zaga quedaban Italia y Alemania.

Vale la pena destacar también algunas conclusiones de este estudio que ilustran cómo veían los empresarios de los países avanzados el instrumento de ACV (Frankl et al., 1999):

- Existían grandes diferencias entre un país y otro debido al grado de sensibilización ambiental de cada nación.
- El pensamiento de ciclo de vida era un enfoque que empezaba a tener interés en el mundo desarrollado, aun cuando la aplicación misma del método de ACV no era tan fuerte para esa época.
- El ACV era una herramienta que no se usaba de manera rutinaria en las empresas para la innovación de sus productos.
- Los empresarios veían que los beneficios de aplicar el ACV se obtenían a largo plazo.
- La mayoría de las compañías que formaron parte del estudio eran optimistas acerca del futuro del ACV.

En el 2000 se incrementó la elaboración de estudios de ACV en todo el mundo, con énfasis en el tema de los combustibles fósiles, biocombustibles, energía nuclear y energías renovables para producir electricidad, y perfeccionamiento de la metodología para hacer ACV.

En el 2001, y como respaldo al desarrollo de la Política Integrada al Producto de la Unión Europea, se publicaron dos grandes estudios sobre el estado del arte en la Unión Europea acerca del diseño de productos sostenibles:

El primer estudio, de 400 páginas, se denominó “Ecodiseño: estado europeo del arte (“Ecodesign: European State of the Art”), que recopiló la experiencia de quince países sobre los métodos empleados y su aplicación en el diseño de productos, incluyendo el concepto de ACV.

El segundo estudio, de 300 páginas, se llamó “Estrategias de ecodiseño para su difusión en pymes”<sup>5</sup> (“Ecodesign-Strategies for Dissemination to SMEs”). Este trabajo presentó los planteamientos teóricos acerca de los obstáculos y factores que impulsaron la aplicación en las pymes de medidas ambientales, como el ecodiseño.

Sólo hasta el año 2001 se realizó la primera conferencia sobre gestión del ciclo de vida (Rex et al., 2004). (Si el lector desea ampliar la comprensión de este concepto, véase Chacón, 2008).

De 1999 al 2003 se disparó la venta de licencias de *software*, estimándose un aumento de más del 100% con respecto a los niveles de 1999.

Del 2002 al 2006 se siguió impulsando el ACV en el mundo. Se formaron asociaciones de ACV por regiones y se desarrollaron modelos computacionales especializados y genéricos; entre las asociaciones que surgieron en este período están, entre otras:

- ALCAs- Australian Life Cycle Society
- ISLCA- Indian Society for LCA
- JLCA-LCA Society of Japan
- KSLCA- Korean Society for LCA
- UNEP-SETAC LC-Initiative

Finalmente, otro factor importante que impulsó el ACV, en especial en Europa, fue la incorporación del tema en las políticas, programas y aplicación de principios ambientales en la Unión Europea, como por ejemplo (Cappellaro, 2008; European Commission, 1997; Van Rossem, 2006):

- Primer programa europeo de ecosellos creado en 1992, que exige la aplicación de metodologías de ACV.
- La Directiva sobre Requisitos de Ecodiseño para Productos que usan Energía.
- Estrategias Temáticas sobre el Uso Sostenible de los Recursos Naturales.
- Plan de Acción para el Consumo y Producción Sostenible.
- Política Integrada al Producto (*Integrated Product Policy*, IPP), la cual se incluyó en el Consejo Europeo en Weimar en 1999. IPP es un enfoque integrado de política ambiental para ayudar en la mejora continua del desempeño ambiental de bienes (productos y servicios) en todas las fases de su ciclo de vida (Sundkvist et al., 2007).
- El 7 de febrero de 2001 la Comisión Europea presentó el Libro Verde sobre la política integrada al producto. Este informe contempla un conjunto de acciones propuestas y herramientas de aplicación.
- La Responsabilidad Extendida al Productor (*Extended Producer Responsibility*, EPR) es un principio de política nacido en 1999 en la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (Oede) (Organization for Economic Cooperation and Development, OECD), para promover mejoras en el ciclo de vida de los productos, extendiendo la responsabilidad del fabricante del producto hacia varias



partes del ciclo de vida de los bienes, especialmente en la recuperación y disposición final.

- Programa Marco Europeo para la Investigación, que es quizás el instrumento financiero más importante para la Unión Europea y el mundo, dirigido a apalancar recursos destinados a proyectos de investigación y desarrollo. En el contexto de este programa, el Séptimo Programa Marco apoyó proyectos relativos al ACV, como por ejemplo LCANET, Chainet, Cascade, Omnitox, y en años recientes el proyecto Calcas (Tilche et al., 2008).
- En 1992, la Oede incluyó la gestión del ciclo de vida como parte del desarrollo de políticas de productos sostenibles (Astrup, 2007).

### CONFERENCIAS, FOROS Y TALLERES

En el anexo 2 se ilustran, de manera resumida, algunos eventos sobre ACV a partir de 1997 y los temas que allí se trataron, que ofrecen una idea del impulso y tendencias que partir de los años noventa ha tenido esta herramienta de gestión ambiental, sobre todo en los países desarrollados.

### OTROS PAÍSES QUE LIDERARON TAMBIÉN EL ACV EN EL MUNDO

#### Los países nórdicos

Los países de la región nórdica (Finlandia, Noruega, Suecia, Dinamarca e Islandia) se han destacado por ser pioneros en el diseño de metodologías y aplicación del ACV, con un marcado énfasis en la elaboración de guías o manuales específicos de implementación del ACV más que en la expedición de normas ambientales sobre este tema (Díaz et al., 2004).

El Consejo Nórdico de Ministros comenzó con el Programa de ACV en 1991, y en 1992 elaboró un informe sobre el estado actual de las actividades de ACV (Hanssen, 1999).

Durante los años 1993 a 1995 se enfatizó en el desarrollo de metodologías para el ACV que arrojó tres informes: dos relativos a metodologías y otro sobre guías para aplicar el ACV.

De 1993 a 1999 se realizaron varias actividades en ACV, algunas de ellas a nivel nacional y otras a nivel regional, entre las que se destacaron (Hanssen, 1999):

1. Proyecto de Ecología del Producto, con la participación de doce compañías suecas grandes y una empresa noruega para diseñar metodologías y probar su aplicación.
2. Proyecto Nórdico para el Desarrollo de Productos Ambientalmente Mejores, donde participaron 22 compañías nórdicas de importancia, para la aplicación del ACV en el desarrollo de productos.
3. Desarrollo Ambiental de Productos Industriales, donde estuvieron involucradas cinco empresas de Dinamarca, la Agencia de Protección Ambiental de Dinamarca y la Confederación de Industrias de Dinamarca, para el desarrollo de bases de datos de inventario y la aplicación del ACV en el diseño de productos.
4. Proyectos Nórdicos sobre ACV en la industria cementera, para el desarrollo de productos.
5. Proyecto Nórdico para Productos de Iluminación, orientado al diseño de *software* y su aplicación en el ecodiseño.
6. Proyecto Indicadores de Desempeño Ambiental, con doce empresas entre noruegas y suecas, donde se aplicaron indicadores ambientales con base en el ACV.
7. Clasificación de Productos con base en el consumo de energía y recursos.

Finalmente, más adelante se hará un recuento histórico más específico de las actividades de ACV que algunos países de esta región emprendieron.

#### Canadá

Acerca del nacimiento del ACV en Canadá, el profesor Young (2003) ofrece una completa radiografía al respecto.

Durante la primera mitad de los años noventa, las empresas grandes y los sectores industriales más importantes del Canadá fueron los que comenzaron el estudio y aplicación del ACV (industrias del aluminio, plásticos, productos forestales, acero, pulpa y papel, autopartes, energía eléctrica, química y telefonía).

En 1991, la compañía Alcan Aluminium Ltd. formó parte de un proyecto que se hizo con Estados Unidos sobre inventario de ciclo de vida para envases de bebida de aluminio. Igualmente los fabricantes de plásticos, a través del Consejo Industrial de Plásticos y Medio

Ambiente, ayudaron junto con Estados Unidos para la creación de bases de datos de inventario de productos de resinas, al igual que lo hizo la industria del acero.

En el año de 1995, el Consejo Canadiense de la Madera publicó los *Efectos ambientales de los materiales de la construcción* (*Environmental effects of building materials*), el cual sigue siendo muy activo en el tema de la arquitectura y construcción sostenibles.

En 1998, algunas empresas internacionales hicieron un estudio de ACV de un periódico de circulación diaria y de una revista semanal.

Las universidades también tuvieron un papel clave en el ACV durante la primera mitad de los noventa. British Columbia, Toronto, Dalhousie, Carleton y Memorial fueron y siguen siendo muy activas en este tema, a través de cursos, investigación y realización de tesis de grado, desarrollo de *software*, proyectos y estudios de ACV. Entre algunos de sus resultados que vale la pena destacar, están los siguientes:

- ACV para el uso de energía eólica (Universidad Memorial).
- ACV para la utilización de energías renovables en la exploración y explotación de petróleo en el mar (Universidad Memorial).
- Procedimiento de indexación para una aplicación rápida de toma de decisiones basadas en ACV (Universidad Memorial).
- Estudio de factibilidad empleando ACV para combustibles alternativos y sistemas de propulsión para el suministro de energía en Canadá y Estados Unidos (Universidad de Toronto).
- Construcción del primer modelo económico de análisis Input-Output para ACV (Universidad de Toronto).
- Publicación de libros sobre herramientas para la gestión ambiental, incluyendo el ACV: *Tools for environmental management*, de D. Thomson (2002). Gabriola Island, British Columbia: New Society Publishers (Universidad de Calgary).
- Modelo integrado para la gestión de residuos (Universidad de Waterloo).
- *Software* de ACV, que incorporó también los efectos económicos para estudios sobre sistemas de gestión de residuos plásticos (Universidad de Waterloo).
- Base de datos canadiense de materias primas (Universidad de Waterloo).

En 1994 se publicaron las primeras normas sobre ACV, como resultado de la activa participación de los canadienses en el ISO/TC-207:

- Z760 Life Cycle Assessment.
- Z810 Life Cycle Impact Assessment: Pulp and Paper Production Phase.
- PLUS 1115: Life Cycle Review.

El gobierno canadiense cumplió también un papel protagónico en el impulso del ACV hacia comienzos de los años noventa; por ejemplo, el Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente publicó *Perfiles ambientales: lineamientos para ayudar a la industria en el logro de las metas del protocolo nacional de empaques y de las fuentes de datos para los análisis de ciclo de vida de los productos de empaque canadienses* (*Environmental profiles: guidelines to help industry meet the goals of the national packaging protocol and sources of data for the life-cycle analysis of Canadian packaging products*).

Así mismo, Environment Canada contribuyó principalmente con capacitaciones, talleres, seminarios y educación sobre el ACV, como por ejemplo el desarrollo de la publicación periódica *Eco-cycle*, que estuvo en circulación de 1995 al 2000; el estudio “Gestión ambiental del ciclo de vida: una guía para mejorar la toma de decisiones empresariales” (“Environmental life cycle management: a guide for better business decisions”), y la publicación de 1997 titulada *Gestión del ciclo de vida en Canadá* (*Life cycle management in Canada*).

Hacia finales de los años noventa decayó el interés en Canadá por el ACV, a causa de las siguientes razones (Young, 2003):

- Todavía no se tenía una metodología totalmente clara y concluyente para hacer los ACV.
- Los estudios de ACV eran muy costosos.
- Los estudios de ACV demandaban mucho tiempo.
- Los estudios de ACV no eran una herramienta que podían utilizarse efectivamente para ser más competitivos en los mercados; se preferían otras como ISO 14001, indicadores ambientales, ecoetiquetado, reportes ambientales/sociales.

Otras entidades, como el Instituto Athena de Materiales Sostenibles (Athena Sustainable Materials Institute), Instituto Pembina para el Buen Desarrollo

(Pembina Institute for Appropriate Development), Ciraig (Interuniversity Reference Center for the Life Cycle Assessment, Interpretation and Management of Products, Processes and Services), algunas desde tiempo atrás y otras desde el año 2000, vienen desarrollando cursos y metodologías de ACV.

Más recientemente, el Consejo de Investigación Nacional del Canadá, que forma parte del gobierno federal, viene canalizando esfuerzos de otros departamentos del gobierno para el estudio de ACV y la participación activa del Canadá en la iniciativa de ACV de SETAC-UNEP que se explica más adelante, con un énfasis en el sector de los minerales (productores de aluminio, del acero, níquel, entre otros).

Finalmente, en el 2003 y con el auspicio de Ciraig se realizó el primer foro canadiense de ACV, que aglutinó a representantes de la academia, industria, gobierno, ONG, consultores, etc.; una de las conclusiones a que se llegó es que se requiere incorporar a otros sectores de la economía, como la agricultura, producción de alimentos, pesca, y temas como combate contra el cambio climático, los impactos sociales y la evaluación ambiental de las tecnologías, al campo de las actividades sobre ACV que venían trabajándose en el Canadá.

### Reino Unido

Los trabajos Repa, y específicamente los proyectos dirigidos por el profesor Hannon, de la Universidad de Illinois, tuvieron una influencia en el desarrollo del ACV en el Reino Unido, en particular sobre el doctor Ian Boustead, de la Open University (Baumann et al., 2004).

En 1972, el doctor Boustead, del Departamento de Ciencia de los Materiales de la Open University, en el Reino Unido, estaba elaborando un libro de texto sobre la producción de vidrio, cuando se encontró con los trabajos realizados por el profesor Hannon en 1972 y a partir de allí adaptó la metodología para calcular el uso total de energía de diferentes clases de envases para leche (vidrio, plástico, acero y aluminio). Esta experiencia le sirvió para perfeccionar su método y aplicarlo a una gama variada de materiales, que culminó con la publicación en 1979 del libro *Manual para el análisis industrial de energía (Handbook of industrial energy analysis)* (Boustead, 1996; Baumann et al., 2004; European Environment Agency, 1996).

### Alemania

Al igual que en el Reino Unido, Alemania también tuvo la influencia de los trabajos Repa que se hicieron en Estados Unidos, como se pone de manifiesto más adelante.

Este país tradicionalmente ha estado interesado en el ACV, sobre todo a partir de 1990, con un promedio de 16 estudios al año (Wrisberg et al.).

En 1972 el doctor Bonifaz Oberbacher, quien trabajaba para Battelle Institute e.V. Frankfurt, fue pionero en ese entonces en Alemania y quizás en Europa al desarrollar, junto con el doctor H. Nikodem, el primer protocolo para el ACV, basado en el método Repa; contenía todos los aspectos fundamentales del inventario de ciclo de vida, además de contemplar una evaluación del costo para la comparación de diversos envases y empaques (Klöpffer, 2006).

El Ministerio Federal de Educación y Ciencia (Federal Ministry of Education and Science) fue de las primeras instituciones alemanas en interesarse en el ACV para dilucidar las inquietudes que se tenían por los empaques y envases plásticos, y los residuos que éstos generaban. Fue así como a un grupo del Battelle Institut en Frankfurt-am-Main se le encargó en 1972 estudiar este tema (Baumann, 2004), y los trabajos que se hicieron para Mobil Chemical Company y Coca-Cola los motivaron a utilizar para este proyecto la metodología Repa (Baumann et al., 2004).

Otro aspecto que cabe destacar fue el estudio que Franklin Associates en 1985 llevó a cabo, denominado “Comparative energy and environmental impacts of 21 PET and 11 refillable glass bottles used for soft drink delivery in Germany” (Ayres, 1995).

Por último, en 1993 el Instituto Nacional de Normalización de Alemania (Deutsches Institut für Normung, DIN) publicó un estándar sobre ACV que tuvo como aspecto innovador la incorporación de temas sobre salud laboral, además de mostrar las relaciones de esta herramienta con otras que contienen consideraciones sociales y económicas (Díaz et al., 2004).

### Bélgica

Entre los años 1997 y 2002 se desarrollaron proyectos demostrativos para evaluar las bondades y dificultades de la aplicación del ACV.

Vale la pena destacar las siguientes dos actividades que durante el anterior período se realizaron en ese país (Vercauteren, 2000):

La primera de ellas se llevó a cabo en 1997 y se refería a un proyecto de demostración del ecodiseño, que introducía el concepto de ciclo de vida en las pequeñas y medianas empresas. Este proyecto tenía como objetivo apoyar a las empresas en la aplicación del ecodiseño y revisar si las pymes eran capaces de alcanzar una mejora significativa del desempeño ambiental de sus productos.

Como parte del proyecto se desarrolló el *software* Ecoscan, basado en el método Ecoindicator 95<sup>6</sup>, que pretendía facilitarle a la empresa de manera rápida cuál podría ser el mejor esquema de comunicación ambiental para sus productos.

Es interesante resaltar las principales conclusiones de este proyecto:

- No todas las pymes tenían el potencial de integrar el concepto de ciclo de vida en el desarrollo de productos.
- Ecoscan no fue el instrumento que se adaptaba mejor a las necesidades de las pymes.
- Las herramientas para analizar el impacto ambiental de los productos fueron un factor de éxito importante.

La segunda actividad fue un proyecto de demostración de mayor escala en Flanders, que tenía, entre otros, los siguientes objetivos:

- Ofrecer a la industria la oportunidad de conocer y experimentar en diseño sostenible de productos.
- Estimular a las empresas la adopción del ecodiseño.

Las conclusiones más importantes de la experiencia anterior fueron:

- El ecodiseño sí era una tarea que podía llevarse a cabo en pymes.
- Era necesario que las pymes pudieran tener acceso a herramientas para simplificar la aplicación del ecodiseño.

## Suecia

Suecia ha sido, tradicionalmente, un país líder en el campo del ACV. Existen algunas referencias sobre los inicios del ACV y sobre otras actividades desarrolladas en tal campo en este país (Baumann, 2004; Baumann, 2000; Ayres, 1995), que se resumen a continuación.

Los países europeos, principalmente Alemania, Reino Unido e Italia, tuvieron una influencia de los trabajos Repa que se hicieron en Estados Unidos y que impulsaron en Europa el desarrollo de los trabajos en el campo del ACV. Por el contrario, Suecia tuvo una inspiración más desde sus sectores industriales (Baumann, 2004).

Hacia finales de los años sesenta, Tetra Pak fue de las primeras empresas en incursionar en el ACV. La razón para hacerlo era que deseaba emplear botellas en PVC y para ese entonces, ambientalmente hablando, este tipo de material causaba bastante controversia, no sólo por los residuos sólidos generados sino como una fuente de contaminación gaseosa de HCl (ácido clorhídrico) cuando se incineraban las botellas.

Esta compañía contactó al ingeniero Gustav Sundström, quien realizó un estudio sobre las emisiones de este tipo de material con el fin de encontrar medidas de control para el HCl.

Posteriormente, a comienzos de los setenta, la empresa encargó otro estudio para comparar los efectos ambientales y el consumo de recursos de varios tipos de envases desde una perspectiva de sus ciclos de vida. Del estudio salió un informe que se publicó en 1973, que ayudó a que la incineración de plásticos tuviera mayor acogida y se perfeccionaran los métodos de control de la contaminación atmosférica generada con la incineración de estos materiales, además de que sirvió para que la ciudad de Malmö decidiera que el incinerador suministrara la energía que de éste se recuperaba para el sistema de calefacción de la ciudad.

En 1985 se publicó un estudio de ABT Tetra Pak de la ciudad de Malmö, elaborado por M.P. Lundholm y G. Sundström, titulado *Resource and environmental impact of tetra brick carton and refillable and no-refillable glass bottles. Tetra brick aseptic environmental profile*, que sigue siendo un importante referente histórico del trabajo desarrollado por ese país en ACV.

Hacia finales de la década de los noventa se realizaron dos proyectos sobre ACV para investigar los mecanismos que subyacen cuando la industria aplica esta herramienta (Baumann, 2000).

Dicha investigación se hizo en dos grandes empresas internacionales: una perteneciente a la industria química (Akzo Nobel) y la otra al sector de la electrónica (Ericsson), las dos con experiencia previa en la elaboración de estudios de ACV. A continuación, algunas consideraciones que a modo de conclusión se hicieron del estudio:

- Se requería una mayor comprensión del ACV.
- Se necesitaba más comprensión del *software* de ACV e incorporación de algunas mejoras.
- El ACV ofrece la oportunidad de documentar mejor información sobre los productos para uso de los gerentes de producto.

Es útil resaltar la creación en 1996 del Centro para la Evaluación Ambiental de Sistemas de Producto y Materiales (Centre for Environmental Assessment of Product and Material Systems, CPM), de Chalmers University of Technology, una de las organizaciones que han hecho esfuerzos importantes en el campo de la investigación académica sobre ACV.

En el año 2003, CPM decidió evaluar qué se había hecho en ACV en la industria sueca y para ello llevó a cabo una evaluación amplia de esta actividad en la industria de productos forestales, que es el sector donde más se han efectuado estudios de ACV, y se halló que 72% de las empresas usan esta herramienta. Las empresas escogidas fueron Stora Enso y SCA (Svenska Cellulosa Aktiebolaget).

## Suiza

Afortunadamente existen algunas referencias (Fink, 1997) que documentan el nacimiento del ACV en este país.

El informe del Club de Roma, la crisis del petróleo de los años setenta, un estudio de los fabricantes de aluminio sobre empaques y energía, los planteamientos éticos de Daniel Spreng (quien trabajó en el sector de la industria del aluminio y posteriormente dirigió el Centro para Políticas de Energía de Suiza, promovió la necesidad de hacer desarrollos en la industria y en la tecnología para una mayor eficiencia energética en Suiza) y la experiencia de Empa, adquirida en los sesenta en proyectos ambientales (en el campo de la contaminación hídrica por detergentes, en emisiones gaseosas del tráfico y en problemas ambientales de algunos empaques),

cumplieron un papel definitivo en la realización de las dos investigaciones que se describen a continuación, las cuales verdaderamente marcaron los comienzos del ACV en Suiza; las desarrolló en 1977 el Laboratorio Federal Suizo para Ensayos e Investigación de Materiales (Swiss Federal Laboratories for Material Testing, Empa), no sin antes mencionar que en 1974 ya se había llevado a cabo el primer ecobalance en la empresa Rocco Conserves por parte del Instituto Federal Suizo de Tecnología (Swiss Federal Institute of Technology Zurich, ETHZ) y la Escuela de Gestión, Tecnología y Leyes (conocida como HSG) (Siegenthaler, 2008).

La primera se conoció con el nombre “Estudio BUS” (“Bundesamt für Umweltschutz”) para el establecimiento de una base de datos sobre materiales para empaques (aluminio, vidrio, plástico, papel, cartón y hojalata). La base se completó en 1984.

La segunda fue un trabajo sobre el yogur que comenzó la industria de alimentos (fabricantes de lácteos, distribuidores y proveedores de envases para productos lácteos) y que buscaba comparar las diferentes clases de empaque de yogur en relación con el desempeño de la tecnología para fabricarlos, sus costos, su aceptación en los mercados del país y los impactos ambientales generados. El estudio culminó con la publicación de un informe en 1979.

Suiza, también en la década de los noventa (principalmente de 1992 a 1996), lideró en el mundo el desarrollo de diferentes bases de datos para el ACV, con el apoyo de organismos científicos y técnicos como:

- ETHZ, uno de los institutos que han estado a la vanguardia en la investigación en el campo del ACV en Suiza.
- Swiss Federal Institute of Technology (EPFL).
- Paul Scherrer Institute (PSI).
- Empa.
- Swiss Federal Research Station for Agroecology and Agriculture (Agroscope FAL Reckenholz).

En el año 2000 se fundó el Centro Suizo para Inventarios de Ciclo de Vida (The Swiss Centre for Life Cycle Inventories), conformado por instituciones y departamentos de los institutos federales suizos, incluyendo los que ya se mencionaron.

Este centro desarrolló la base de datos europea Ecoinvent, hoy ampliamente conocida y usada por la

comunidad internacional para estudios de ciclo de vida, en particular para la etapa del inventario (Ecoinvent, 2009).

No obstante todo lo anterior, según un estudio muy completo llevado a cabo por Claude Patrick Siegenthaler (Siegenthaler et al., 2005) entre 669 empresas (de ellas 500 con certificación ISO 14001), parece que la difusión del ACV, y en particular su aplicación, sigue siendo lenta en la industria suiza, a pesar de que ha sido un país líder en el mundo en la investigación sobre ACV; por ejemplo, el estudio mostró que solamente 60 empresas habían hecho estudios de ACV. Y muy pocas se refirieron a ISO 14040 como herramienta importante para su negocio, aunque señalaron que tenían confianza en los métodos de ponderación. También se evidenció que las empresas ven al ACV como un tema complejo, pero cuando lo aplican confían en el método y en los resultados obtenidos.

### Italia

Este país tuvo unos inicios algo tardíos en ACV, si se le compara con otros países líderes en este campo como Alemania, Suiza, Suecia, Estados Unidos y Canadá. Sólo hasta comienzos de la década de los noventa hubo interés en los sectores académico y empresarial por los estudios de ACV.

Algunos factores que influenciaron el estudio y la adopción del ACV fueron los sistemas de gestión ambiental ISO 14000, el Plan Nacional sobre Gestión de Residuos y la obligatoriedad de aplicar el ACV en varias construcciones de ingeniería (Giacomucci, 1999).

Hacia finales de los años noventa, las pymes aceptaban el ACV como herramienta para su gestión ambiental; sin embargo, su aplicación la consideraban muy costosa y no se reflejaba inmediatamente en beneficios económicos para las empresas. También para este mismo período sólo las grandes empresas estaban haciendo estudios de ACV (Fiat, ABB, Telecom, Italtel, entre otras).

Aparte de los estudios de la industria, existen también otras entidades que hicieron esfuerzos importantes por dar impulso al ACV; por ejemplo, la Universidad Politécnica de Turín viene trabajando el tema desde 1993. La Universidad Politécnica de Milán, la Agencia Nacional para la Protección Ambiental, la Organización para la Investigación del Medio Ambiente de Italia, la

Universidad de Pisa, la Universidad de Florencia, la Universidad de Bari y la Universidad de Palermo.

En febrero de 1998 se publicó la primera guía sobre ACV, llamada *Manual de operación del ACV (LCA- Istruzioni per l'uso)*, escrita por el profesor Vanni Badino y el ingeniero Gian Luca Baldo, el primero del Politécnico de Turín y el segundo de la firma consultora Boustead Consulting Ltd. (Int. J. LCA, 1999).

En la evolución del ACV en Italia es interesante destacar la creación en 1999 de la Sociedad Italiana para el Análisis de Ciclo de Vida, con 50 miembros fundadores, entre los cuales se contó con empresas destacadas de ese país (ABB, ENI, Fiat, Italtel, Pirelli, Telecom), universidades como la de Bari, Boloña, Torino y Palermo, centros de investigación como Enea, el Centro de Investigaciones de la Fiat, y compañías consultoras de prestigio como Boustead, Ecobilan y Tame Caree. El centro fue y sigue siendo un referente importante en Italia para el estudio, promoción y adopción del ACV (Baldo, 1999).

Finalmente, hacia el año 2006 surgió la Red Italiana sobre ACV para la difusión del ACV, promovida por Enea (Agencia Nacional Italiana para Nuevas Tecnologías, Energía y Medio Ambiente) y el Ministerio del Medio Ambiente (Cappellaro, 2008).

### Los países del Asia

Algunos países del Asia son también líderes en la adopción del ACV (Siegenthaler, 2008), por lo que es interesante conocer cómo ha sido la evolución histórica que ha tenido este instrumento de gestión ambiental en dichas naciones.

### Japón

Existen algunas referencias que ilustran la evolución histórica que en el Japón ha tenido el ACV y actividades más recientes en este campo (Yano, 2000; Finkbeiner, 2000; Inaba, s.f.; Yano et al., 2000; Siegenthaler, 2005; Hunkeler et al., 1998; Natsuno et al., 2009).

El reconocimiento del ACV en este país se tradujo con la fundación, auspiciada por la industria, del Foro Japonés sobre ACV en 1991. Para ese mismo año, el Instituto para la Gestión de Residuos Plásticos hizo una investigación sobre productos plásticos y sus efectos ambientales.

En 1992 al Centro Eco-Vida se le encargó, por parte de la Agencia Japonesa Ambiental, llevar a cabo un estudio para conocer los aspectos ambientales de los productos.

En 1993, la Agencia para las Ciencias y la Tecnología comenzó el Proyecto de Investigación de Ecomateriales, en el que se incorporó el ACV de los materiales.

En octubre de 1995, con el patrocinio del Ministerio de Industria y Comercio Internacional del Japón (conocido por su sigla en inglés como Miti), se creó la Sociedad Japonesa de ACV con 250 organizaciones participantes (Ilca Forum, 1998).

Durante los años 1993 a 1998, a través del Proyecto sobre Ecomateriales, se realizaron varios estudios de ACV.

Desde 1994 se vienen efectuando conferencias internacionales sobre ecobalances, como por ejemplo la Tercera Conferencia Internacional sobre Ecobalance, que se llevó a cabo en Tsukuba en noviembre de 1998 y contó con la participación de 460 personas; en su momento, este evento se consideró la reunión más grande en el mundo en torno al tema del ACV.

La legislación también ha sido un aspecto que ha influido en el interés por la aplicación del ACV. En 1995 se expidió una ley sobre empaques, mediante la cual se exigió a las empresas que ellas mismas se encargasen de recoger los productos y empaques que, como residuos, dejaban sus clientes y usuarios. Igualmente, una regulación sobre reciclaje de 1991, a la cual se le incorporaron en 1993 algunas mejoras, ayudó en la difusión del ACV.

También en Japón se creó el Centro del ACV en el interior de la Asociación Japonesa de Gestión Ambiental (conocida por su sigla en inglés como Jemai) para la creación de una base de datos, así como también de una metodología para la evaluación de impacto del ciclo de vida.

En 1998, el Ministerio de Agricultura, Bosque y Pesca comenzó un proyecto de ACV para una agricultura sostenible, con énfasis en el sector agrícola de producción de tomates y arroz.

Otro acontecimiento importante se produjo en el año 1998 con el inicio del Proyecto Nacional sobre ACV, auspiciado por el Miti, y con la secretaria para el proyecto a cargo del Jemai. El proyecto tenía como objetivo elaborar una base de datos bastante confiable, una metodología de ACV fácilmente aplicable en todo Japón y servir de catalizador para la difusión de la he-

rramienta en el país.

Así mismo, es interesante mostrar las organizaciones japonesas que trabajan el ACV, lo cual ilustra por qué Japón es un país líder en este tema:

- Foro Japonés de ACV.
- Sociedad Japonesa de ACV (Miti).
- Asociación Japonesa de Gestión Ambiental para la Industria.
- Proyecto Sistemas Hombre-Planeta (Ministerio de Educación).
- Centro Japonés de Producción Limpia (MITI).
- Centro de Recursos de Reciclaje.
- Foro de Ecomateriales.
- Centro Japonés de Eco-Vida.
- Junta de Acreditación Japonesa para la Certificación de Sistemas de Calidad (Miti).
- Agencia de Protección Ambiental del Japón.
- Instituto Nacional de Recursos y Medio Ambiente.
- Filial Nedo del Miti.
- Agencia para las Ciencias y Tecnología.
- Instituto para la Gestión de los Residuos Plásticos.

Finalmente, Japón ha sido también pionero en la realización de *software* sobre ACV, como por ejemplo el Nire-LCA, desarrollado por el Instituto Nacional de Recursos y Medio Ambiente; ISO-LCA Navigation Software, del Laboratorio de Ingeniería Mecánica, Easy LCA de Ingeniería Toshiba, y LCASUPPORT, de NEC Kansas.

## China

China, que tendrá un papel importante en la economía mundial, no podía quedarse atrás en el campo del ACV, aunque en este aspecto todavía no está tan avanzado como los países europeos.

La historia del ACV no ha sido fácil de rastrear, pero algunos pocos autores nos permiten vislumbrar cuáles han sido los comienzos y los temas que interesan en ese país (Inaba, 2003; Zuoren et al., 2001; Zacaria et al., 1999).

El interés por el ACV en China se inicia hacia comienzos de los años noventa. Para ese período empezaron en el país las investigaciones sobre ecomateriales donde confluyeron esfuerzos de varias universidades, empresas y laboratorios nacionales, y con el auspicio y la

tutela del gobierno. Se estudió bastante la evaluación del ciclo de vida de los materiales, con un énfasis marcado en la elaboración de bases de datos y normas acordes con las necesidades de China.

ISO 14040 se adoptó como norma nacional hacia finales de 1997.

Con el apoyo del Programa Nacional de Altas Tecnologías, se realizó el Proyecto 863 para evaluar desde la perspectiva del ACV y con las metodologías desarrolladas en China, los procesos de fabricación y las tecnologías del acero y hierro, aluminio, cemento, cerámica, plástico y elaboración de recubrimientos. De este estudio se alcanzaron los siguientes resultados, entre otros:

- Una tabla para la recolección de cargas ambientales de los materiales.
- Un *software* para el ACV de los materiales.
- Comparación del flujo estándar, una metodología innovadora que compara los parámetros de impacto ambiental del flujo industrial actual con un estándar de flujo; esto evita que se tenga que calcular el valor absoluto del impacto ambiental.
- Un método de evaluación del impacto ambiental de los materiales, denominado Factor escalar sintético, que calcula el impacto ambiental de un metal puro y luego permite, entonces, determinar el impacto de los materiales metálicos.
- Incorporación y desarrollo de un nuevo concepto llamado Evaluación del ciclo de vida total, que consta de la evaluación del ciclo de vida de los materiales y la evaluación del ciclo de vida de los productos.

Por otro lado, el Consejo Nacional de Ciencia, el Ministerio de Asuntos Económicos y la Administración de Protección Ambiental han sido organismos líderes en la promoción del ACV en la industria de China, en la academia, y en institutos de investigación y ONG (Zakaria et al., 1999).

Finalmente, China es el primer país en el mundo en haber expedido una ley para la promoción de la producción más limpia (PML), que obliga a implementar este concepto en algunas empresas y que abre la posibilidad de incorporar herramientas de gestión ambiental, como el ACV (Hicks et al., 2007).

La PML forma parte de la Estrategia Nacional China de Economía Circular (ECir) (si el lector desea entender este concepto, véase Chacón, 2008).

## Corea

Este país, junto con Japón y China, muestra un interés creciente por el ACV.

El profesor Hur ha ilustrado el desarrollo y evolución del ACV en ese país (Hur, 1999).

El ACV se introdujo en 1990 y su impulso se derivó de las normas ISO 14000.

Desde ese entonces, el gobierno, la industria, la academia, y particularmente la Sociedad Coreana para la Evaluación del Ciclo de Vida (fundada en diciembre de 1997), han hecho un trabajo destacado en el estudio y difusión del ACV.

Esta sociedad ha focalizado sus actividades de ACV en cuatro clases:

- Políticas y estrategias.
- Desarrollo de metodologías.
- Construcción de bases de datos.
- Casos de estudio.

También se destacan el Instituto Nacional de Tecnologías y Calidad (a través de la División Normas Coreanas), el Ministerio de Comercio, Industria y Energía, el Ministerio del Medio Ambiente, el primero de ellos con una activa participación en ISO/TC 207/SC5, y los ministerios con la elaboración de políticas y regulaciones para promover la adopción de sistemas de gestión ambiental ISO 14001 y la incorporación del ACV en las empresas.

## Tailandia

Existen muy pocos referentes que hagan mención de la evolución histórica del ACV en este país; no obstante, el profesor Lohsomboon (Lohsomboon, s.f.<sup>7</sup>) ofrece algunos aspectos suficientes para comprender los inicios de esta herramienta en Tailandia:

El ACV se empezó a conocer en 1997 con la expedición de las primeras normas ISO 14040 sobre ACV de la serie ISO 14000.

Son tres los temas que ofrecen el panorama inicial de las actividades en ACV de ese país:

La primera de ellas, relativa a la realización de seminarios y talleres sobre ACV que lideró el Instituto Tailandés del Medio Ambiente (Itma) durante los años de 1997 a 2002 y que facilitó el lanzamiento por parte del Itma en 1997 del Foro Tailandés de ACV.



La segunda, el uso del ACV en los programas nacionales de ecoetiquetado y específicamente en el proyecto de Sello Verde que se comenzó en 1993 y que estuvo a cargo del Consejo Empresarial Tailandés para el Desarrollo Sostenible y el Ministerio de Industria, apoyado por una secretaría conformada por el Instituto Tailandés de Normas Industriales e Itma. El proyecto culminó en el 2002 y abrió la posibilidad desde ese entonces para que los empresarios accedieran a ese sello ecológico para sus productos.

La última actividad tiene que ver con la base de datos para el inventario de ciclo de vida y la realización de estudios de ACV. Así, entonces, el primer estudio para el inventario se hizo en el 2002 por Itma, que arrojó como resultado bases de datos para el sector de la energía eléctrica. Este trabajo se efectuó en el marco del proyecto de Jemai que tenía como fin hacer estudios de ACV para materiales básicos y sistemas de energía en Japón, Malasia, Corea, China, Taipei y Tailandia. El proyecto terminó su primera fase en el 2001.

Tailandia también trabajó de la mano con la Organización Asiática de Productividad (Asia Productivity Organization, APO) en ACV. De esta cooperación surgió su participación en el proyecto “Desarrollo de casos de estudio en ACV en los países miembros seleccionados de APO” (India, Indonesia, Japón, Corea, Malasia, Singapur, Taiwán y Tailandia).

Algunas universidades e institutos tecnológicos y de investigación también han colaborado en la diseminación del concepto de ACV a través de seminarios y cursos, y la elaboración de tesis de grado (por ej. Universidad de Chiagmai e Instituto Asiático de Tecnología).

Finalmente, en el 2006 se creó la Red Tailandesa de ACV (Thai LCA Network, 2006) para la promoción y estudio del ACV.

### Latinoamérica

Si bien todavía esta región no tiene los avances, desarrollo y conocimientos de algunos países desarrollados, puede resultar útil e interesante conocer cómo ha sido la evolución que se ha habido en algunos países de este continente.

No ha sido fácil hallar referentes para rastrear las actividades que dieron inicio al ACV en algunos países de Latinoamérica y los trabajos que actualmente desarrollan en esa materia; sin embargo, varios autores e

instituciones ofrecen algunos elementos de juicio para contar, quizás de manera fragmentada, lo que pasó y está pasando en la arena del ACV, principalmente en países como México, Chile, Colombia, Argentina y Brasil, pioneros en la región en aplicar esta herramienta (Suppen, 2005; Suppen, 2006; Peña, 2008; Peña, 2009; Arena, 2001; InterfacEHS, 2009; Botero et al., 2008; Van Hoof, 1999; Colciencias, 2007; Cilca, 2009; Botero et al., 2008; Naranjo, 2009).

Antes de contar la historia del ACV de algunos países en particular, se ofrece a continuación una mirada de conjunto de algunas actividades que marcan, por así decirlo, el inicio de las actividades de ACV en Latinoamérica, y algunos factores que han contribuido a su lenta evolución y otros que favorecerían su desarrollo.

Primero resulta útil mencionar algunos aspectos que han influenciado el lento desarrollo del ACV en la región (Arena, 2001):

- Los estudios de ACV requieren muchas veces el apoyo de personal experto, disponibilidad de datos, tiempo y dinero.
- Los países en vías de desarrollo tienen otras preocupaciones y prioridades (educación, acabar con la pobreza, seguridad y salud para sus ciudadanos, combate contra la corrupción, problemas políticos y de violencia, etc.).
- Las empresas son muy renuentes a mostrar y dar a conocer información de sus procesos y productos.
- Ausencia de una base de datos de inventario de ciclo de vida en cada país.
- Esfuerzos aislados de aquellos organismos y profesionales interesados en el estudio del ACV.
- Leyes y regulaciones poco innovadoras que no permiten un espacio real para la promoción y adopción del ACV en la industria y en las políticas del gobierno.
- Percepción de que el ACV no es una herramienta útil para los empresarios.
- Falta de un número suficiente de expertos en ACV.
- Ausencia de fuentes de financiación de proyectos de ACV.
- Carencia de metodologías que respondan a las necesidades de cada país.

Ahora bien, otros factores que por el contrario podrían ayudar a difundir el ACV serían los siguientes (Arena, 2001):

- Muchas materias primas que requieren los países ricos son suministradas por los países en vías de desarrollo, por lo que si los países desarrollados siguen impulsando la aplicación del ACV, necesariamente requerirán información de los procesos de producción de los países como Latinoamérica.
- Los programas de ecoetiquetado y las regulaciones ambientales y sanitarias y de seguridad y salud ocupacional, y las políticas que tienen algunos países desarrollados pueden convertirse en una barrera al comercio para la industria de los países en vías de desarrollo que quieren penetrar esos mercados.
- Algunas compañías multinacionales mantienen directrices de casa matriz de aplicar el concepto de ACV en todas las operaciones que tienen en el mundo, y las plantas y oficinas que están en Latinoamérica no escapan a esas exigencias.

Por otro lado, la preocupación de los países de esta región por el ACV fue sólo hasta principios de la década del 2000 y son los siguientes eventos quizás los que lo demuestran:

Se lleva a cabo en Costa Rica la Primera Conferencia Internacional de Ciclo de Vida en Latinoamérica, del 25 al 28 de abril de 2005 (conocida también como Cilca 2005) y fue ese escenario el que sirvió para fundar la Asociación de Ciclo de Vida de Latinoamérica (Acvla) para el desarrollo y promoción del ACV en la región.

Acvla tiene sus oficinas centrales en Costa Rica y es el vocero oficial de Latinoamérica para representar los intereses y actividades realizadas en ACV.

En el 2007 se realizó una segunda conferencia (Cilca 2007) en São Paulo (Brasil) y la tercera en Chile en abril de 2009.

Finalmente, hay que destacar también la creación de la Red Latinoamericana de Ciclo de Vida, la cual nació en el año 2003 y que produjo en el 2004 la publicación titulada *El análisis de ciclo de vida ISO 14040 en Latinoamérica*.

## México

A comienzos de la década del 2000 y hacia el 2005 se llevaron a cabo las primeras actividades sobre ACV

en México, entre las cuales se destacan las siguientes (Suppen, 2005 y 2006):

- Base de datos para el inventario de ciclo de vida.
- Diseño del ciclo de vida para el cumplimiento ambiental.
- Estudio para la evaluación del ciclo de vida de los productos mexicanos.
- Estudios y proyectos de ACV en el sector minero en el año 2003, que arrojaron los siguientes resultados:
  - Elaboración de una metodología para el inventario de ciclo de vida en el procesamiento de minerales.
  - Evaluación del impacto ambiental en el reciclaje del cobre.
  - Estudios de ACV para los procesos de metalurgia del zinc y del cobre.
- Estudio de ciclo de vida para las botellas de resina PET.
- Base de datos para el inventario de ciclo de vida en el sector eléctrico.

México sigue siendo un país muy activo en la región, como lo demuestra su participación continua y efectiva en las conferencias Cilca que se han hecho hasta el momento.

## Chile

Hacia mediados de la década del 2000 puede decirse que comienza la actividad en ACV en Chile.

La minería ha sido motor fundamental para la adopción del ACV en Chile, por las siguientes razones (Peña, 2008):

- La industria minera cuprífera de Chile tiene una importancia económica y de generación de empleo (Chile aporta el 34% de la producción de cobre en el mundo).
- Un porcentaje alto del cobre que Chile exporta va con destino a países comprometidos por la protección ambiental y otros asuntos de responsabilidad social, como la seguridad y salud ocupacional de los trabajadores.

Uno de los primeros estudios de ACV que se destacan dentro del sector minero chileno fue el que se llevó

a cabo hacia mediados de década del 2000, denominado “Estudio comparativo de los impactos ambientales del cobre en las plantas de fundición de Chile y Brasil” en el marco del proyecto *Prosul* (Proyecto Suramericano de Análisis de Ciclo de Vida de los Metales para la Producción Sostenible Minera) (Peña, 2008).

El proyecto *Prosul* buscaba determinar cuáles eran los principales rasgos al modelar un ACV en la producción de metales en Suramérica, identificando mediante un ACV simplificado, puerta a puerta<sup>8</sup>, los aspectos comunes del sector de la minería de la región y los particulares de cada país.

El estudio mencionado anteriormente y el proyecto en general arrojaron, entre otros resultados, los siguientes:

- La construcción de una base de datos para el inventario de ciclo de vida de referencia y modelos parametrizables para el sector minero.
- Modelo para la evaluación de impacto del ciclo de vida para el sector minero.

En el marco del foro mundial de expertos en ACV, denominado Iniciativa de ciclo de vida de UNEP-SETAC, que se explicará con detenimiento más adelante, Chile viene cumpliendo un papel activo, ya que fue miembro del Grupo de Trabajo de Análisis de Impacto de Ciclo de Vida sobre Metales y Minerales y lo presidió hasta el año 2005 (LCIA Task Force Group. Metals y Minerals) y el esfuerzo que ha hecho Chile en ACV se ve también reconocido al lograr como sede la ciudad de Santiago para la Conferencia Cilca 2009.

Así mismo, el sector de la construcción es un bien activo en la aplicación del ACV y una de las razones para ello ha sido el papel destacado que ha tenido la Cámara Chilena de la Construcción (CChC) en el planteamiento de políticas ambientales como las siguientes (Goijberg, 2003):

- En 1999 aprobó su política ambiental.
- En ese mismo año comenzó su vínculo con Green Building Challenge.
- En el año 2000 firmó un convenio de producción más limpia con el Ministerio de Economía.
- En el 2001 creó la empresa Regemac para la disposición de los residuos sólidos (denominados también inertes o escombros) de la construcción.

- También en el 2001 CChC firmó un convenio con el Ministerio de Obras Públicas y de Vivienda y Urbanismo para desarrollar actividades de colaboración mutua para la construcción sostenible.

El liderazgo de CChC también se refleja en la participación activa que ha tenido, mostrando sus logros y proyectos en eventos internacionales de prestigio como la Conferencia Internacional sobre Construcción Sostenible que se llevó a cabo en Maastricht (Holanda) en el año 2000 y en Oslo (Noruega) en el 2002.

## Brasil

Se tienen muy pocas referencias sobre la evolución del ACV en este país, pero las que existen ofrecen un panorama completo al respecto (InterfacEHS, 2006).

Los comienzos del ACV en Brasil se remontan al año de 1993 con la conformación del Grupo de Apoyo a la Normalización (Grupo de Apolo à Normalização, Gana) y que participó activamente en el ISO/TC-207.

En 1997 salió a la luz pública la primera publicación especializada en ACV, que llevaba por título *Análisis de ciclo de vida de los productos: herramienta de gestión ambiental ISO 14000* (*Análise de ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000*), escrita por José Ribamar Chenebe (InterfacEHS, 2009).

En 1998 ocurre otro hito importante en la historia del ACV en el Brasil, con el nacimiento del Grupo de Prevención de la Contaminación (Grupo de Prevenção da Poluição, GP2) de la Universidad de São Paulo, que tuvo como una de sus líneas principales de trabajo el ACV, con la dirección del profesor Gil Anderi da Silva, y que hacia el 2005 había arrojado seis tesis de maestría, una tesis doctoral y algo más de 40 artículos publicados nacional e internacionalmente.

A mediados de 1998 desapareció Gana y lo reemplazó el Comité Brasileño de Gestión Ambiental, conocido como CB-38, perteneciente al organismo nacional de normalización de Brasil denominado Asociación Brasileña de Normas Técnicas (Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT), que continuó desarrollando proyectos y estudios en ACV y apoyando en general la elaboración de normas de la serie ISO 14000.

En el 2002 se fundó Asociación Brasileña de Ciclo de Vida (Associação Brasileira de Ciclo de Vida, ABCV),

cuyo trabajo se centró inicialmente en la elaboración de una base de datos nacional para los estudios de ACV, fortalecer la capacidad del país en el tema y participar activamente en el concierto internacional sobre ACV.

En el año 2004, ABCV tomó la decisión de iniciar el Proyecto Brasileño de ACV (Projeto Brasileiro de ACV), con dos énfasis en particular: capacitación en ACV y creación de la base de datos para inventarios de ACV que se lleven a cabo con la industria brasileña.

Por último, y como consecuencia de los esfuerzos anteriormente mencionados, el ACV hoy es un tema que está incorporado en muchos currículos de pregrado y posgrado de diversas disciplinas profesionales.

### Argentina

Al igual que en el caso del Brasil, existen pocas fuentes que ofrezcan de manera completa cuál ha sido la trayectoria de ese país en el ACV; sin embargo, la fuente consultada ofrece un panorama, aún general, de la historia del ACV en Argentina (Arena, 2001).

Hacia finales de la década de los noventa se llevó a cabo en Argentina una pequeña encuesta entre 30 personas provenientes de diversas instituciones que tenían algún interés o estaban trabajando el tema de la gestión ambiental, con el fin de indagar lo siguiente:

- El estado del arte de la aplicación del ACV.
- Las personas y organizaciones que participaban en la aplicación del ACV.
- El papel que las instituciones tenían en el desarrollo y adopción del ACV.
- Las amenazas y oportunidades para la difusión en Argentina del ACV.

Los resultados del estudio no se conocieron mucho y no despertaron mayor interés en el público especializado y no especializado, más cuando se supo que el nivel de encuestas respondidas fue muy bajo (30%).

Lo que en general arrojó las encuestas fue que el ACV casi no se conocía y poco se había aplicado, pero resulta interesante resaltar que el estudio mostró que la metodología del ACV en sí no es un obstáculo para su aplicación; con todo, esta apreciación tiene que analizarse con cuidado porque quizás se deba a que las instituciones de diversa índole para esa época no

habían aplicado mucho el ACV y, por tanto, sobre su metodología podían decir cualquier cosa.

### Colombia

La Universidad de los Andes en Bogotá y la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) en Medellín fueron las instituciones que impulsaron en Colombia el conocimiento y la aplicación del ACV, y son las que sirven como referente importante para conocer un poco de la historia sobre esta materia en el país (Van Hoof, 1999; Botero et al., 2008; Naranjo, 2009).

Los primeros trabajos y talleres sobre ACV surgieron a partir de 1997 cuando se crearon en el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec) los Comités Técnicos de Normalización Espejos del ISO/TC-207 para discutir y homologar a normas nacionales la serie de estándares internacionales de la familia ISO 14000, entre ellas la serie ISO 14040 sobre ACV. Los comités más activos en ese período fueron el Comité 14 de Sistemas de Gestión Ambiental, el Comité 13 de Gestión Ambiental, el Comité 33 de Auditorías Ambientales y el Comité 36 de Análisis de Ciclo de Vida, aún cuando este último cobró mayor ímpetu sólo hasta mediados de la década del 2000.

Hacia finales de los años noventa algunas universidades e institutos realizaron varios proyectos y seminarios internacionales para introducir a los participantes en el conocimiento básico de aplicación del *software* SimaPro; entre las organizaciones que para ese entonces se destacaron en la ejecución de tales actividades estaban:

- Universidad de los Andes, a través del Departamento de Ingeniería Industrial.
- La Universidad del Valle, en Cali, a través del Departamento de Ingeniería Química.
- La Universidad Pontificia Bolivariana.
- Centro Nacional de Producción más Limpia y Tecnologías Ambientales, en Medellín.
- Universidad Industrial de Santander, en Bucaramanga.

La Universidad de los Andes, por ejemplo, mediante los cursos de producción más limpia impartidos a los estudiantes de pregrado de ingeniería industrial, elaboró algunos estudios de ACV y tesis de grado en ACV

entre 1998 y 2006 que abarcaron diferentes sectores industriales, entre los que se contaron:

- Sector agrícola (azucarero, cafetero y floricultor).
- Fabricación de empaques.
- Sector químico (producción de agroquímicos y detergentes).
- Sector de los polímeros (producción de grifería y jeringas).
- Sector metalmecánico (fabricación de autopartes y maquinaria).
- Sector de la construcción (proyectos de ingeniería civil).
- Sector petroquímico (producción de guantes de látex).
- Sector de servicios (empresas de servicios públicos).

A modo de ilustración, a continuación se listan los nombres de algunos proyectos y tesis de grado relacionados con el ACV que se hicieron en la Universidad de los Andes (Universidad de los Andes, 2009):

- Análisis de ciclo de vida en proyectos de ingeniería civil (2006).
- Análisis ambiental del proceso de fabricación de guantes de látex en Eterna S.A., aplicando la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) (2004).
- Base para la elaboración de ecoindicadores a partir del análisis del ciclo de vida (2001).
- Estimación del impacto ambiental del cultivo de caña de azúcar utilizando la metodología del análisis del ciclo de vida (ACV) (2000).
- Análisis ambiental de Termotasajero S.A., ESP, aplicando la metodología análisis de ciclo de vida (ACV) (2000).
- Ecoindicador basado en el análisis del ciclo de vida para la industria cafetera (2000).
- Análisis de ciclo de vida (LCA) del Curacron 500 EC (1999).

Por su parte, la UPB inicia su conocimiento del ACV a través de su participación en el año 2001 en el Comité Técnico 33 del Icontec.

Posteriormente, el profesor Édgar Botero, en sus estudios de doctorado en energía en España, aplicó el ACV, que arrojó las primeras tablas de inventario para

procesos en Colombia, donde se adaptó el método de Ecoescasez desarrollado en Suiza para la evaluación de los impactos; estos resultados se obtuvieron con el *software* Apeironpro, desarrollado por la firma Avansoft y la UPB, y cofinanciado por Colciencias.

En el 2005 la UPB participó en un curso internacional sobre ACV dictado por la Universidad de Charlmers (Suecia) en la ciudad de Bogotá en las instalaciones del Icontec.

En el año 2006 la UPB llevó a cabo un estudio de ACV para la compañía Carbones del Cerrejón.

En el 2007 la UPB, junto con la Universidad de Medellín y la Firma MAC S.A., comenzó con la financiación de Colciencias el proyecto “Ecoetiquetado de baterías plomo-ácido”, que tuvo posteriormente un feliz término.

Para esa misma época, la UPB realizó el proyecto “Valorización de llantas usadas para el área metropolitana del valle de Aburrá”, para determinar desde la perspectiva de un estudio de ACV cuál era la mejor opción de disposición final de llantas usadas.

En el 2008, la revista científica *International Journal of Life Cycle Assessment* publicó un artículo de la UPB sobre el *software* Apeinpro (Botero et al., 2008).

Últimamente, la UPB viene apoyando la realización de proyectos de tesis en estudios de ACV en los programas de pregrado en ingeniería química y en la maestría en ingeniería ambiental, y junto con el CNPMLTA y Empa ha venido formulando proyectos de ACV de biocombustibles.

Finalmente, algunas universidades de Colombia han venido contemplando en sus currículos el ACV, como por ejemplo la Escuela Colombiana de Ingeniería en la ciudad de Bogotá, la cual incorporó en el 2008, en los cursos de producción más limpia impartidos a los estudiantes del programa de ingeniería industrial, los fundamentos del ACV.

## ORGANIZACIONES E INICIATIVAS INTERNACIONALES PIONERAS DEL ACV

### SETAC

La Society of Environmental Toxicology and Chemistry (Setac) fue el primer organismo internacional que empezó a aglutinar los esfuerzos en el mundo para el desarrollo del ACV, en 1989 (Guinée et al., 2002). Este cuerpo de naturaleza investigativa y científica en

el campo de la gestión ambiental es líder en el mundo en el desarrollo de la gestión del ciclo de vida (si el lector desea ampliar el concepto, véanse Chacón, 2008; Remmen et al., 2007, y Hellweg et al., 2008) y de las metodologías para el ACV.

Existen oficinas de la Setac en Europa y Estados Unidos, cada una con algunas diferencias menores en cuanto a los énfasis de sus investigaciones aplicadas.

Pero sólo hasta 1991 Setac de Europa decidió empezar formalmente sus estudios en ACV con la conformación del Grupo de Trabajo de Setac de Europa sobre ACV, el cual se reunió por primera vez el 26 de junio de 1991 en el Centro Tecnológico de Procter & Gamble en Bruselas (Astrup et al., 2008).

Para ese mismo año, Setac de Estados Unidos tuvo su reunión anual en noviembre de 1991 y se decidió allí iniciar los contactos con la Setac de Europa para discutir temas relativos al ACV.

La Setac formuló en 1993 el primer código internacional de ACV, llamado *Código de prácticas para el ACV* (*Code of practice for life cycle assessment*), con el propósito de unificar criterios metodológicos para la realización de estudios de ACV (Astrup et al., 2008). Este código fue punta de lanza para la aplicación “masiva” del ACV en el mundo, así como también un insumo importante que la ISO tuvo en cuenta posteriormente para la creación del marco de trabajo, de metodologías, procedimientos y terminología en las normas ISO 14040.

## ISO

La Organización Internacional de Normalización (The International Organization for Standardization, ISO) es un organismo privado para la elaboración de normas internacionales, integrado principalmente por los organismos nacionales de normalización de cada país.

En 1993, la ISO creó el comité técnico ISO/TC-207 para el desarrollo de la serie ISO 14000 sobre sistemas de gestión ambiental y herramientas de apoyo, y dentro de este alcance dicho comité trabaja la serie de normas ISO 14040 sobre ACV a través del subcomité 5.

En el cuadro 1 se ilustra la serie de normas ISO 14000 que específicamente tratan el marco de referencia aceptado en el ámbito internacional y ejemplos sobre ACV (Chacón, 2008).

**Cuadro 1**  
Serie ISO 14040 sobre ACV

**ISO 14040:2006:** Principios y marco de referencia. Esta norma establece los principios y marco de referencia para llevar a cabo un ACV, describe las fases claves del proceso de ACV. Se recomienda usarla junto con ISO 14044.

**ISO 14044:2006:** Requisitos y lineamientos. Esta norma establece los requisitos y orientaciones para llevar a cabo un ACV. Se recomienda utilizarla junto con ISO 14040.

**ISO/TR 14047:2003:** Ejemplos de aplicación de ISO 14042.

Ofrece ejemplos del empleo del ACV.

ISO 14042 se eliminó en el 2006, pero su contenido se incorporó en las versiones de ISO 14040 e ISO 14044.

**ISO/TS 14048:2002.** Formato para la documentación de datos. Ilustra los formatos para la recolección de información con énfasis en la fase del inventario de ciclo de vida (recopilación de las entradas y salidas de los procesos).

**ISO/TR 14049:2000.** Ejemplos de aplicación de ISO 14041 para la definición del objetivo, alcance y análisis del inventario.

ISO 14041 se eliminó en el 2006, pero su contenido se incluyó en las versiones del 2006 de ISO 14040 e ISO 14044.

Fuente: Chacón (2008).

## UNEP

Otro jugador importante en la arena del ACV es el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (The United Nations Environmental Programme, Unep), específicamente a través de su División de Tecnología, Industria y Economía, que promueve y brinda apoyo a los gobiernos y empresarios para la aplicación de prácticas que contribuyan al desarrollo sostenible.

Un aporte de la Unep en el campo del ACV fue la edición en 1996 de una guía para comprender el ACV denominada *Evaluación del ciclo de vida. Qué es y qué hacer con esta herramienta* (*Life Cycle Assessment: What it is, and what to do about it*). Otra contribución que hizo este organismo fue la publicación de 1999 titulada *Hacia el empleo global de la evaluación de ciclo de vida* (*Towards global use of life cycle assessment*), además del apoyo a un conjunto de seminarios y talleres en ACV que se efectuaron en Estados Unidos y Europa.

## INICIATIVA GLOBAL DE LA UNEP-SETAC PARA EL ACV (UNEP-SETAC LIFE CYCLE INITIATIVE)

El foro mundial de expertos más importante actualmente para el estudio y la difusión del ACV es la Iniciativa de ciclo de vida de la UNEP-SETAC (The UNEP-SETAC life cycle initiative), que se lanzó oficialmente en Praga (República Checa), el 28 de abril del 2002 (Töpffer, 2002) con tres programas (Astrup, 2007):

- Gestión del Ciclo de Vida (GCV).
- Inventario de Ciclo de Vida (ICV).
- Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV).

El programa de GCV inicialmente determinó seis grupos de tareas (Astrup, 2007):

- Grupo 1: Manual de GCV.
- Grupo 2: Ciclo de vida basado en el desarrollo del producto.
- Grupo 3: Comunicación de información de ciclo de vida.
- Grupo 4: Gestión a lo largo del ciclo de vida.
- Grupo 5: Participación de las partes interesadas a lo largo del ciclo de vida.
- Grupo 6: Desarrollo de materiales de entrenamiento en GCV.

Después los grupos 4 y 5, así como el 1 y el 6, se fusionaron en uno solo, respectivamente.

La iniciativa UNEP-SETAC fue una respuesta al llamado que hicieron más de cien ministros del Medio Ambiente, reunidos en el Primer Foro de Ministros de Medio Ambiente (a través de la Declaración de Malmö del 31 de mayo de 2000), a buscar el empleo del concepto de ciclo de vida en las economías de los pueblos con el fin de lograr patrones de consumo y de producción más sostenibles, aspectos estos últimos que se enfatizaron y se ratificaron en la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible que se realizó en Johannesburgo (Sudáfrica), del 26 de agosto al 4 de septiembre del año 2002 (Remmen et al., 2007, UNEP-SETAC).

Esta iniciativa viene trabajando los siguientes temas, para poner en práctica el pensamiento de ciclo de vida (puede ampliarse la comprensión de este concepto consultando Chacón, 2008) en el mundo (UNEP-SETAC, 2007):

- Gestión del Ciclo de Vida.
- Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida.
- Inventario de Ciclo de Vida.
- Fortalecimiento de la capacidad en ACV, principalmente en países en vías de desarrollo.

Finalmente, vale la pena hacer un recuento histórico de los principales eventos acaecidos sobre GCV, que es hoy en día un tema de amplio debate y desarrollo en el mundo, sobre todo en el seno de la Iniciativa de Ciclo de Vida de la UNEP-SETAC (Astrup et al., 2005; Astrup, 2007):

1993

Taller sobre GCV auspiciado por la Oede y realizado en París.

1998

- Primera reunión del Grupo de GCV de SETAC de Europa sostenida en Bordeaux (Francia).
- Segunda reunión del Grupo de GCV de Setac de Europa sostenida en Aalborg (Dinamarca).

1999

- Tercera reunión del Grupo de GCV de Setac de Europa sostenida en Stuttgart (Alemania).
- Cuarta reunión del Grupo de GCV de Setac de Europa sostenida en Leipzig (Alemania).
- Quinta reunión del Grupo de GCV de Setac de Europa sostenida en Copenhague (Dinamarca).
- Sexta reunión del Grupo de GCV de Setac de Europa sostenida en Bruselas (Bélgica).

2000

- Séptima reunión del Grupo de GCV de Setac de Europa sostenida en Brighton (Reino Unido).
- Octava reunión del Grupo de GCV de Setac de Europa sostenida en Lausana (Suiza).

2001

- Primera conferencia sobre GCV en Copenhague.
- Primer taller de la Unep sobre GCV realizado en Soeborg (Dinamarca).

## 2002

- Iniciativa de Ciclo de Vida de UNEP-SETAC incorpora, entre otros temas, la GCV.
- Se publica la *Guía de gestión del ciclo de vida (Life cycle management guide)*, de Five Winds International.

## 2003

- Informe de UNEP-SETAC del estudio sobre GCV.
- Se conforman cinco grupos de tareas para GCV.
- Conferencia Internacional sobre ACV/GCV en Seattle (Estados Unidos).
- Segundo Foro Internacional sobre GCV en Seattle (Estados Unidos).
- Taller sobre Política Integrada al Producto y GCV en Skoghall (Suecia).
- Informe danés sobre GCV de Arne Remmen y Marie Münster, titulado “Introducción al pensamiento y gestión del ciclo de vida” (“An introduction to life-cycle thinking and management”).

## 2004

- Monografía sobre GCV publicada por la Setac.
- Reunión del Grupo de Tareas 1 sobre GCV en Praga (Checoslovaquia) y luego en Berlín (Alemania).
- Taller de la Unep sobre Ecodiseño como parte de la GCV, en Gotemburgo (Suecia).
- Reunión del Grupo de Tareas 1 de UNEP-SETAC en Portland (Estados Unidos).

## 2005

- Reunión de los grupos de tareas 4 y 5 en Bolonia (Italia).
- Conferencia Cilca en Costa Rica.
- Reunión de los grupos de trabajo sobre GCV de la UNEP-SETAC, en Lille (Francia).
- Conferencia de GCV en Barcelona (España).
- Taller de UNEP-SETAC sobre GCV y comunicaciones de información de ciclo de vida a partes interesadas, en Barcelona (España).

## 2006

- Finalización de los materiales de entrenamiento sobre GCV elaborados por UNEP-SETAC.
- Conferencia sobre ACV y oportunidades de mercado en el pensamiento de ciclo de vida, en Lund (Suecia).

- Conferencia internacional sobre GCV en Washington D.C. (Estados Unidos).
- Taller de UNEP-SETAC sobre comunicaciones sostenibles en el sector de la construcción en diferentes regiones del mundo, en Stuttgart (Alemania).

## 2007

- Conferencia Cilca en São Paulo (Brasil).
- Publicación de la *Guía empresarial sobre GCV (LCM business guide)* de la UNEP-SETAC.
- Se inicia la colaboración entre el Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sostenible y UNEP-SETAC.
- Conferencia internacional sobre GCV en Zúrich (Suiza).
- Conferencia internacional sobre ACV/GCV en Portland (Estados Unidos).

## A MODO DE CONCLUSIONES

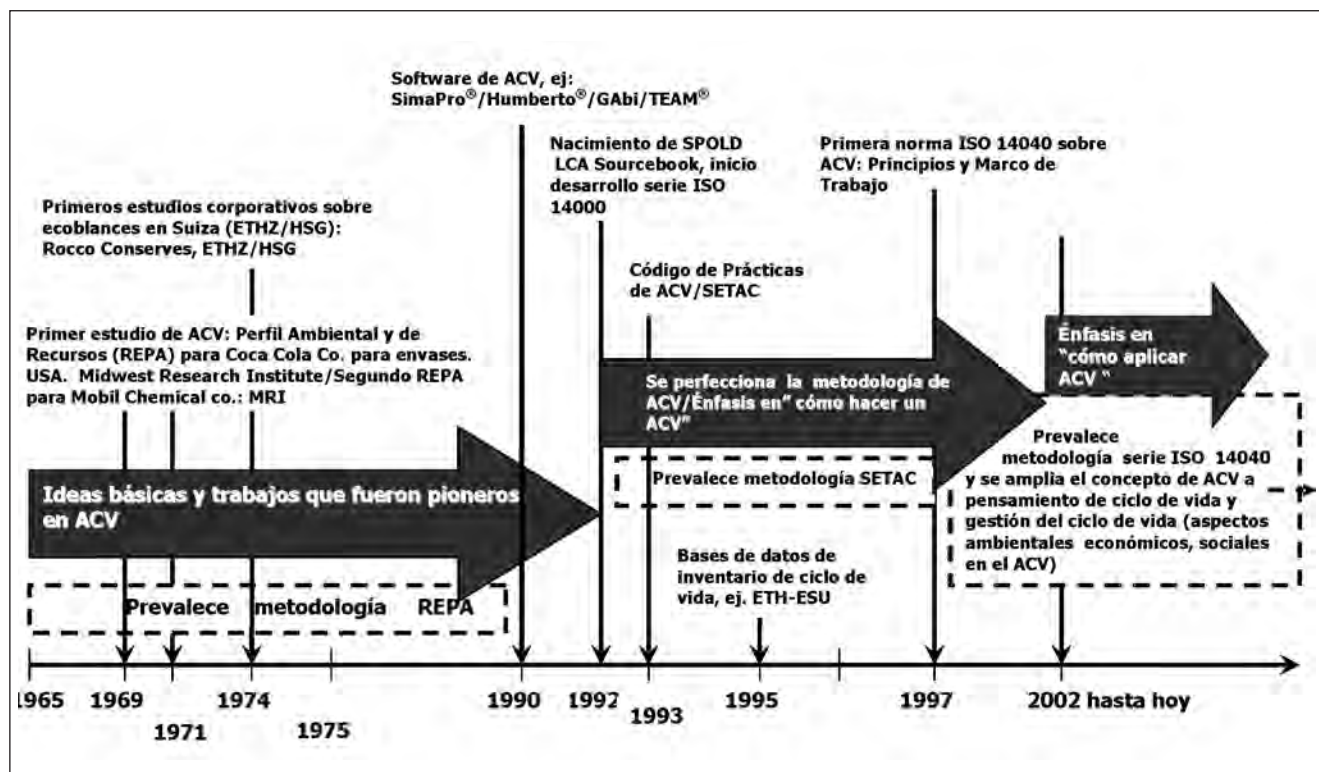
En la figura 1 se ilustran, de manera resumida, el desarrollo histórico y las tendencias del ACV, destacándose allí los siguientes aspectos:

- El ACV tuvo sus comienzos en Estados Unidos y Europa, especialmente.
- La metodología que prevaleció para los proyectos y estudios de ACV fue Repa, desde principios de la década de los setenta hasta finales de la década de los ochenta.
- En los comienzos de los años noventa y hasta finales de la misma década prevalece el marco de trabajo de la Setac para los estudios de ACV.
- A partir de 1997 empieza a prevalecer el marco de trabajo de la ISO para los estudios de ACV.
- Desde comienzos de la década de los setenta hasta mediados de la década del 2000, el principal énfasis ha sido perfeccionar las metodologías de ACV (el énfasis era “Cómo aplicar el ACV”).
- Desde mediados de la década del 2000 se empiezan a hacer esfuerzos para el desarrollo de estrategias, programas y metodologías para que las empresas y gobiernos usen o apliquen el ACV (el énfasis es “Cómo usar el ACV”).
- A partir de la década del 2000 se pasa de hablar de ACV a gestión del ciclo de vida, que incorpora no sólo los aspectos e impactos ambientales, sino tam-



bién consideraciones económicas y sociales; hasta hoy se continúan estudiando métodos internacionalmente aceptados para incorporar estos dos últimos aspectos al ACV.

Por último, en el anexo 3 se hace un resumen cronológico del ACV que recoge de manera sucinta los principales aspectos expuestos a lo largo del presente artículo.



Fuente: Tomado y modificado de Siegenthaler, 2008.

Figura 1. Evolución histórica y tendencias del análisis de ciclo de vida (ACV).

ANEXO 1. AVISO PUBLICITARIO DE LA FIAT EN THE TIMES MAGAZINE (1974)

“We can no longer measure the cost of an automobile by money alone”

	Big car (more than 2,5 liters)	Small car (less than 1 liter)
WHAT IT DOES	It carries 5 people and 500 cu.dm of luggage and reaches a top speed of 180 kph	It carries 4 people and 365 cu.dm of luggage and reaches a top speed of 140 kph
WHAT IT COSTS	More than twice as much as the smaller car	Less than half as much as the bigger car
WHAT IT USES UP	Fuel: 11 liters per 100 km at 2/3 of maximum speed	6.9 liters per 100 km at 2/3 of maximum speed
	Raw materials:	
	steel 1.334 kg	steel 686 kg
	cast iron 234 kg	cast iron 75 kg
	light alloys 100 kg	light alloys 25 kg
	copper 12 kg	copper 4 kg
	brass & bronze 15 kg	brass & bronze 4 kg
	zinc, tin, lead alloys 35 kg	zinc, tin, lead alloys 12 kg
	rubber 75 kg	rubber 39 kg
	<u>1.805 kg</u>	<u>845 kg</u>

Fuente: Siegenthaler, 2008.

ANEXO 2. EVENTOS Y REUNIONES SOBRE ACV (1998-2007)

Nombre del evento	Fecha de realización	Lugar	Objetivo/Temas tratados/Conclusiones
Tercera Conferencia Internacional sobre Ecobalances	25-27 de noviembre de 1998	Tsukuba (Japón)	<b>Temas tratados</b> -Aplicaciones del ACV -Gestión del ciclo de vida -Ecodiseño -Pensamiento de ciclo de vida
Primera Conferencia Internacional sobre Gestión del Ciclo de Vida	27-29 de agosto de 2001	Copenhague (Dinamarca)	Gestión del ciclo de vida (GCV) <sup>1</sup> <b>Temas tratados</b> -Sostenibilidad -Por qué la GCV -Qué es la GCV -Indicadores de sostenibilidad -Desempeño ambiental -Gestión y evaluación de datos -Costeo de ciclo de vida -Política integrada al producto -Valores éticos y sociales -Participación de las partes interesadas -Gestión de la cadena de suministro -Declaraciones ambientales de producto -Ecoetiquetado -Gestión del ciclo de vida -Integración de conceptos y herramientas -Comunicación y toma de decisiones
Noveno Simposio sobre Casos de ACV	14-15 de noviembre de 2001	Noordwijkerhout (Holanda)	<b>Temas tratados</b> -Declaraciones ambientales para manejar e impulsar la creación de valor en la cadena de suministro -Verificación y auditorías de las declaraciones ambientales para los productos de consumo -Posibilidades y limitaciones del ACV en las declaraciones ambientales
<b>Nombre del evento</b>	<b>Fecha de realización</b>	<b>Lugar</b>	<b>Objetivo/Temas tratados/Conclusiones</b>

Nombre del evento	Fecha de realización	Lugar	Objetivo/Temas tratados/Conclusiones
Primera Conferencia Internacional 2000: La tribología <sup>2</sup> en el diseño ambiental. Las características de superficies que interactúan. Un factor clave para productos sostenibles	4-6 de septiembre de 2000	Bournemouth (Reino Unido)	-Productos orientados al ciclo de vida -Herramientas para el ecodiseño -Estudios de energía en la fase de uso de los productos -Calidad de las superficies -Ingeniería de las superficies -Materiales avanzados -Desarrollo de productos sostenibles -ACV para optimizar los productos -Evaluación del impacto ambiental -Estudios analíticos
Tercer Taller Europeo de materiales usados en la industria: Desarrollo eficiente de productos sostenibles	27 de abril de 1999	Berlín (Alemania)	Selección de materiales asistida por computador en el contexto del diseño para el medio ambiente
Conferencia Internacional y Exhibición sobre Análisis de Ciclo de Vida: Herramientas para la Sostenibilidad	25-27 de abril de 2000	Arlington (Virginia, Estados Unidos)	-Enfoques para integrar los valores económicos, ambientales y sociales en la toma de decisiones con énfasis en las aplicaciones del ACV y casos de estudio. -Cómo el ACV sirve para: i) crear ventajas comerciales ii) mejorar la toma de decisiones ambientales iii) ahorrar dinero a las organizaciones iv) organizar los sistemas de gestión ambiental v) medir el desempeño ambiental y el progreso hacia la sostenibilidad vi) entablar comunicaciones dentro y fuera de las organizaciones
Octavo Simposio Europeo de la Setac sobre casos de estudio	30 de noviembre de 2000	Bruselas (Bélgica)	<b>Tema general:</b> Aumentando la credibilidad del ACV <b>Temas tratados</b> -Incertidumbre y calidad de los datos -Aplicaciones del ACV en las decisiones actuales que toman los negocios -La revisión crítica, su papel, los obstáculos y perspectivas futuras
Tercer Congreso Mundial de la Setac	21-25 de mayo de 2000	Brighton (Reino Unido)	<b>Temas tratados</b> -Integración de información económica y ambiental en el ACV -El inventario de ciclo de vida desde que se expidieron las normas ISO 14041 e ISO 14049 -Evaluación del impacto en el ciclo de vida para el uso de los recursos y del suelo -Evaluación del riesgo ambiental -Gestión integrada de residuos vs. Jerarquía de residuos
Foro sobre Instrumentos para la evaluación ecológica de productos dentro de las compañías	21 de noviembre de 2001	Frankfurt/Main (Alemania)	El foro tuvo un énfasis en la aplicación de variados sistemas de información ecológica orientados al producto (ACV, el método Basf para el análisis de la ecoeficiencia de productos, entre otros)
XI Reunión Anual Europea de la Setac	6-10 de mayo de 2001	Madrid (España)	<b>Temas tratados</b> -Definición del objetivo y alcance: calidad de los datos y la incertidumbre en el ACV -El inventario de ciclo de vida después de ISO 14041: nuevos desarrollos en la modelación. -Avances en la evaluación de impacto del ciclo de vida: el agua y otros asuntos -Evaluación comparada del riesgo y el ACV -Gestión del ciclo de vida -El ACV y herramientas relacionadas: química verde y sostenible, costeo del ciclo de vida, contabilidad del flujo de materiales, diseño para el medio ambiente y ecología industrial
Conferencia sobre sostenibilidad ambiental	12-14 de noviembre de 2001	Graz (Austria)	<b>Temas tratados</b> -Contribución de la industria de la movilidad al desarrollo sostenible -La responsabilidad del fabricante en el diseño de productos -La responsabilidad extendida al productor

Taller de la Unep sobre gestión del ciclo de vida (GCV): Compartiendo experiencias en GCV	30 de agosto de 2001	Copenhague (Dinamarca)	Entre otros temas, se trataron los siguientes: -Desarrollo de metodologías completas y simplificadas de ACV -Otras herramientas cuantitativas diferentes del ACV -Metodología para costeo de ciclo de vida -Metodología para el análisis Input/Output -Pensamiento de ciclo de vida, empleando criterios cuantitativos -Comunicación y educación -Integración de las herramientas de gestión ambiental -Consideración de los aspectos socioeconómicos de la sostenibilidad en la perspectiva del ciclo de vida -Estrategias de la comunicación -Lado del demanda del ACV: necesidades de mejora -Relación con la política integrada al producto
Quinta Conferencia Internacional sobre Ecobalances: Herramientas Prácticas y Principios para la Sostenibilidad	6-8 de noviembre de 2002	Tsukuba (Japón)	<b>Temas tratados</b> -ACV -Indicadores de desempeño ambiental -Aplicaciones del pensamiento de ciclo de vida en el desarrollo de productos -Información ambiental de productos y su uso en las compañías -Ecología industrial/Ciclo de materiales y energía -Evaluación y selección de materiales ambientalmente sanos <b>Temas que deben trabajarse en el futuro en Japón y resto del mundo</b> -Establecimiento del estado del arte de la práctica del ACV -Vincular el ACV con otras herramientas, en particular con aquellas que tienen importancia comercial, como las compras verdes -Establecimiento de indicadores o métricas para el desarrollo sostenible -Cerrar la brecha entre teoría y práctica -Promoción del ACV en las pymes y en los países en vías de desarrollo
XII Reunión Anual Europea de la Setac	12-16 de mayo de 2002	Viena (Austria)	<b>Temas tratados</b> -La aplicación del análisis Input-Output en el ACV -Desarrollos en la metodología del inventario de ciclo de vida y su aplicación -Gestión del ciclo de vida y toma de decisiones -Evaluación del impacto del ciclo de vida -ACV, evaluación del riesgo y herramientas relacionadas -El ACV y la gestión de residuos -Costeo de ciclo de vida -ACV y los mercados de la energía -Esquemas de información del ciclo de vida del producto (ecoetiquetado, declaraciones ambientales de producto, política integrada al producto) y gestión del ciclo de vida
Séptimo Foro Empresarial Internacional	20-22 de agosto de 2002	Johannesburgo (Sudáfrica)	<b>Temas tratados</b> -Las pymes y la gestión ambiental -La gestión ambiental y la Internet -Turismo sostenible
Quinta Conferencia Internacional sobre Ecobalances	6-8 de noviembre de 2002	Tsukuba (Japón)	<b>Temas tratados</b> -ACV -Indicadores de desempeño ambiental -Pensamiento de ciclo de vida aplicado al desarrollo de productos y a la gestión de las empresas -Información ambiental para compañías y productos -Ecología industrial y los ecomateriales
XIV Reunión Anual Europea de la Setac	19-22 de abril de 2004	Praga (República Checa)	<b>Temas tratados</b> -Evaluación del impacto del ciclo de vida -El ACV y los mercados de la energía eléctrica -El ACV y el análisis Input-Output -El ACV y el costeo de ciclo de vida -El ACV y la toma de decisiones estratégicas de política -El ACV y Omnitox (simposio especial) -Incertidumbre y errores de cálculo en el ACV
<b>Nombre del evento</b>	<b>Fecha de realización</b>	<b>Lugar</b>	<b>Objetivo/Temas tratados/Conclusiones</b>

Nombre del evento	Fecha de realización	Lugar	Objetivo/Temas tratados/Conclusiones
Sexta Conferencia Internacional sobre Ecobalances. Desarrollo y sistematización de herramientas de ecobalance con base en el pensamiento de ciclo de vida	25-27 de octubre de 2004	Tsukuba (Japón)	<p><b>Temas tratados</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida y análisis de riesgos</li> <li>-Agricultura</li> <li>-Metodología del inventario de ciclo de vida</li> <li>-Casos avanzados de ACV</li> <li>-Bases de datos y <i>software</i></li> <li>-Gestión de residuos</li> <li>-Análisis del flujo de materiales</li> <li>-Costeo de ciclo de vida</li> <li>-Diseño para el medio ambiente</li> <li>-Ecoeficiencia</li> <li>-Ecomateriales</li> <li>-Sistemas de tecnología</li> <li>-Herramientas de apoyo para la toma de decisiones en política ambiental</li> <li>-Ecología industrial</li> <li>-Contabilidad del costo del flujo de materiales</li> <li>-Comportamiento del consumidor y el medio ambiente</li> </ul> <p><b>Algunas conclusiones y observaciones que cabe destacar (Hellweg et al.)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-En la toma de decisiones de política del gobierno es bien importante la adopción del pensamiento de ciclo de vida y la comunicación sobre sostenibilidad con las partes interesadas; por ejemplo, en el tema de compras estatales, el tema de las compras verdes debería contemplarse sobre la base del ACV</li> <li>-La evaluación del impacto social con base en el pensamiento de ciclo de vida todavía es un aspecto interesante e importante para desarrollar, por lo que se requiere hacer esfuerzos en el diseño de metodologías que permitan hacerlo</li> <li>-Los métodos del ACV no sólo deben considerar en el "cómo hacerlo" sino que también debe haber esfuerzos en el "cómo usarlo"</li> <li>-También sigue siendo necesario desarrollar metodologías que ayuden a incorporar los flujos monetarios con el ciclo de vida de los productos y servicios.</li> <li>-Las necesidades del consumidor tienen un papel relevante en la construcción de una sociedad sostenible</li> </ul>
Conferencia 2005 sobre gestión del ciclo de vida. Innovación a través de la gestión del ciclo de vida	5-7 de septiembre de 2005	Barcelona (España)	<p><b>Temas tratados</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-GCV en la práctica. Ecoetiquetado de los recursos bióticos</li> <li>-Políticas ambientales y estrategia del producto</li> <li>-Declaraciones ambientales del producto</li> <li>-Factores sociales</li> <li>-Pensamiento del ciclo de vida en la práctica</li> <li>-Integración de herramientas</li> <li>-Análisis Input/Output</li> <li>-Opciones de gestión de residuos</li> <li>-Agricultura y la producción de alimentos y los biocombustibles</li> </ul>
Séptima Conferencia Internacional sobre Ecobalance	25-27 de noviembre de 2006	Tsukuba (Japón)	<p><b>Temas tratados</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Energía y sostenibilidad</li> <li>-Desarrollo ecoindustrial</li> <li>-La ecoeficiencia para la información y las tecnologías de la comunicación</li> <li>-Gestión de flujos para la innovación de procesos y la sostenibilidad</li> <li>-Gestión y reciclaje de residuos</li> <li>-Análisis del inventario</li> <li>-Evaluación del impacto</li> <li>-La ecoeficiencia y los índices</li> <li>-Ecodiseño/Análisis Input/Output</li> <li>-Análisis del flujo de materiales</li> <li>-Gestión del ciclo de vida</li> <li>-Bases de datos y <i>software</i></li> <li>-Consumo sostenible</li> <li>-Ecomateriales</li> </ul>

Tercera Conferencia Internacional sobre Gestión del Ciclo de Vida	27-29 de agosto de 2007	Zúrich (Suiza)	Temas tratados
			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Diseño para el medio ambiente</li> <li>-Ecoeficiencia</li> <li>-Comunicación ambiental</li> <li>-Eficiencia energética</li> <li>-Ecología industrial</li> <li>-Gestión del ciclo de vida y las ONG</li> <li>-Gestión del ciclo de vida en los países emergentes</li> <li>-Desarrollo del proceso</li> <li>-Análisis de escenarios</li> <li>-Responsabilidad social</li> <li>-Herramientas y bases de datos</li> <li>-Consumo sostenible</li> <li>-Gestión del ciclo de vida y los sistemas de gestión ambiental</li> <li>-Promoción del pensamiento de ciclo de vida</li> </ul>

**Fuente:** Construcción propia del autor.

1. Chacón Vargas, Jairo Raúl, *op. cit.*

2. La ciencia y tecnología de la fricción, lubricación y uso de superficies en movimiento, aplicada principalmente en el diseño de rodamientos.

### ANEXO 3. CRONOLOGÍA DEL ACV

Década	Año	Evento
1960	1963	Informe de Harold Smith, presentado en la Conferencia Mundial de Energía, sobre los impactos ambientales de los productos
	1969	Estudio para Coca-Cola Co. sobre los impactos ambientales y consumo de energía de varios tipos de envases, elaborado por MRI con metodología Repa
	1960	En Suecia, Tetra Pak encarga al doctor Gustav Sundström la realización de estudios de ACV de botellas de PVC
1970	1971	En Estados Unidos, la Universidad de Illinois y la Universidad de Stanford realizan estudios de ACV de botellas para bebidas
	1970	Estudio de comparación de botellas de vidrio, PE y PVC elaborado en el marco del Programa RANN de los Estados
	1970	En Suecia, Tetra Pak encarga otro estudio de ACV de envases plásticos
	1971	Se publica el libro <i>Design for real world: human ecology and social change</i> , escrito por P. Papanek
	1971	En Estados Unidos, segundo Repa de MRI para Mobil Chemical Company para bandejas de plástico y cartón
	1972	Informe "Los límites del crecimiento"
	1972	Publicación del documento <i>A blueprint for survival</i>
	1972	Conferencia de las Naciones Unidas sobre Ambiente Humano (conocida también como Conferencia de Estocolmo)
	1972	USEPA encarga a MRI estudio de ACV de envases de bebidas
	1972	En el Reino Unido, el doctor Ian Boustead elabora un estudio de ACV de envases para leche
	1972	En Alemania, el doctor Bonifaz Oberbacher desarrolla junto con el doctor H. Nikodem el primer protocolo para el ACV
	1972	En Alemania, el Batelle-Institut hace estudios de ACV de envases plásticos
	1973	Embargo de la Opep a los países de Europa y Estados Unidos
	1973	Se desarrolla en Estados Unidos el primer <i>software</i> de ACV
	1973	En Suecia, publicación de los estudios de ACV de Tetra Pak
	1974-1975	Avances y contribuciones del ACV en Estados Unidos, publicados en el <i>Journal Energy Policy</i>
	1974	Aparece en la revista <i>The Times Magazine</i> un aviso publicitario de la Fiat que incorpora elementos de pensamiento de ciclo de vida
	1974	En Suiza, primer ecobalance en la empresa Rocco Conserves, elaborado por ETHZ y HSG
	1975	Se funda la firma Franklin Associates, pionera en Estados Unidos y en el mundo en la elaboración de estudios de ACV
1975 - 1988	En Estados Unidos decae el interés por el ACV	
1976	Publicación del resumen del estudio de Coca-Cola Co. en la revista <i>Science Magazine</i>	
1976	USEPA publica <i>Resource and environmental profile analysis of nine beverage container alternatives</i>	
1976	US Federal Energy Agency pone a disposición del público bases de datos y la metodología Repa	
1977	Publicación del libro <i>Energy analysis</i> , de J.A.G. Thomas	
1978	Publicación parcial del estudio de ACV de Good Year Tire & Rubber Co.	
1979	Se funda Setac	

Década	Año	Evento
1980	1980	En Estados Unidos, Informe del estudio de ACV de Solar Energy Research Institute
	1985	Expedición de la Directiva 85/339 de la Comunidad Económica Europea sobre envases de alimentos líquidos que incorpora el pensamiento de ciclo de vida
	1985	En Alemania, Franklin Associates hace el estudio "Comparative energy and environmental impacts of 21 PET and 11 refillable glass bottles used for soft drink delivery in Germany"
	1985	En Suecia, ABT Tetra Pak encarga a M.P. Lundholm y G. Sundström la elaboración del estudio "Resource and environmental impact of Tetra Brik carton and refillable and non-refillable glass bottles. Tetra Brik Aseptik Environmental Profile"
	1987	Informe de la Comisión Brundtland titulado "Nuestro futuro común"
1990	1990	En Estados Unidos, Franklin Associates elabora el estudio de ACV de pañales desechables y no desechables
	1990	En Suecia se llevan a cabo dos proyectos sobre ACV para ver las implicaciones de aplicar esta herramienta en la industria sueca
	1990	En Japón se crea el Centro del ACV
	1990	En China se adopta ISO 14040 como norma nacional
	1990	En Argentina se lleva a cabo una encuesta sobre ACV
	1990	Primer Taller de la Setac de Norteamérica sobre ACV
	1991	Setac de Norteamérica realiza cinco talleres sobre ACV en Estados Unidos, Holanda y Portugal
	1991	El Consejo Nórdico de Ministros inicia el programa de ACV
	1991	En Canadá, la empresa Alcan Aluminium participa en un estudio de ACV
	1991	En Canadá, los fabricantes de plásticos y del acero participan en proyectos sobre ACV
	1991	Se expiden en Japón regulaciones sobre reciclaje
	1992	En Europa, se funda Spold
	1992	En Japón, el Centro Eco-Vida realiza un estudio de ACV de varios productos
	1992	En Estados Unidos, elaboración del informe "Tellus Packaging Study: Inventory of Material and Energy Use and Air and Water Emissions from the Production of Packaging Materials"
	1992	En Estados Unidos, Franklin Associates publica un artículo en el que se explica la metodología del ACV
	1993	USEPA publica una guía para la etapa del inventario
	1993	USEPA crea el "Programa de Compras Verdes"
	1993	Publicación en Europa de <i>LCA Sourcebook</i> , de Spold
	1993	Setac publica <i>Setac guidelines for life-cycle assessment: a code of practice</i>
	1993	En Japón, la Agencia para las Ciencias y la Tecnología inicia el Proyecto de Investigación de Ecomateriales
	1994	En Canadá se publican las primeras normas nacionales de ACV
	1995	Lanzamiento del proyecto "Winning Acceptance" por parte de Spold
	1995-2000	En Canadá se publica <i>Ecocycle</i>
	1995	En Canadá se publica <i>Life cycle management: a guide for better business decisions</i>
	1995	En Canadá se publica <i>Los efectos ambientales de los materiales de la construcción</i>
	1995	En los países nórdicos, publicación de <i>Nordic guidelines for life cycle assessment</i>
	1995	Nace la publicación periódica científica sobre ACV llamada <i>International Journal of Life Cycle Assessment</i>
	1995	Se crea la Sociedad Japonesa de ACV
	1996	Primer número de <i>International Journal of Life Cycle Assessment</i>
	1997	Publicación de la primera norma internacional sobre ACV, ISO 14040
	1997	En Canadá se publica <i>Life cycle management in Canada</i>
	1997	En Bélgica se lleva a cabo un proyecto de demostración sobre ecodiseño
	1997	En Bélgica se desarrolla el primer <i>software</i> para estudios de ACV llamado <i>Ecoscan</i>
	1997	En Corea se funda la Sociedad Coreana para la Evaluación del Ciclo de Vida
1997	En Brasil, primera publicación de ACV titulada <i>Análisis de ciclo de vida de los productos: herramientas de gestión ambiental ISO 14040</i> , de José Ribamar Chenebe	
1997	En Colombia se crean los comités técnicos del Icontec para la homologación a normas nacionales de las normas internacionales de la serie ISO 14000	
1998	En Canadá, empresas internacionales hacen un estudio de ACV de un periódico y de una revista	
1998	En Italia, se publica la primera guía sobre ACV titulada <i>Manual de operación del ACV</i> , del profesor Vanni Badino	
1998	En Japón, el Ministerio de Agricultura, Bosque y Pesca inicia un proyecto de ACV	
1998	En Europa se lleva a cabo un estudio de ACV para ver el grado de aplicación de esta herramienta en empresas de Alemania, Italia, Suiza y Suecia	
1998	En Japón se comienza el Proyecto Nacional de ACV	
1998	En Brasil, nacimiento del Grupo de Prevención de la Contaminación de la Universidad de São Paulo, que entre otros temas de investigación, trató el ACV	
1998	En Brasil, nace el Comité Brasileño de Gestión Ambiental que apoyó el desarrollo de la serie ISO 14040	
1998	En Colombia, primeros cursos y estudios de ACV en la Universidad de los Andes	
1999	En Italia se crea la Sociedad Italiana para el ACV	
1999-2003	Aumento sustancial de ventas de licencias de <i>software</i> de ACV	
1999	Planteamiento de la Oede de la política integrada al producto	
1999	Se contempla la política integrada al producto en el Consejo Europeo reunido en Weimar	

Década	Año	Evento
Ecoinvent	2000	Se incrementa en el mundo la elaboración de estudios de ACV
	2000	En Suiza se funda el Centro Suizo para Inventarios de Ciclo de Vida, el cual desarrolló la base de datos europea
	2001	En Estados Unidos se funda el Centro Americano para la Evaluación del Ciclo de Vida
	2001	Se terminan las actividades de Spold
	2001	En Europa se publican dos grandes estudios sobre el estado del arte del diseño de productos sostenibles
	2001	En Tailandia, termina Primera Fase del Proyecto Jemai de ACV
	2001	En Tailandia se crea la Red Tailandesa de ACV
	2001	La Comisión Europea presenta el <i>Libro Verde sobre Política Integrada al Producto</i>
	2001	En Colombia, la UPB inicia su interés en ACV participando en el Comité Técnico 36 del Icontec sobre ACV
	2002	Se lanza oficialmente en Praga la Iniciativa de Ciclo de Vida de UNEP-SETAC
	2002	En Brasil se funda la Asociación Brasileña de Ciclo de Vida (ABCV)
	2003	En Canadá, con el auspicio de Ciraig se realiza el primer foro canadiense de ACV
	2003	En Suecia, CPM elabora el proyecto de ACV en el sector forestal
	2004	En Brasil, ABCV inicia el Proyecto Brasileño de ACV
	2005	La UPB y la Escuela Colombiana de Ingeniería, empresas industriales y ONG participan en el curso internacional de ACV de la Universidad de Chalmers, en Suecia, en las instalaciones del Icontec
	2006	En Italia, surge la Red Italiana de ACV
	2006	En Tailandia se crea la Red Tailandesa de ACV
	2005-2008	En Colombia, la UPB realiza estudios de ACV para una compañía carbonífera, para una empresa fabricante de baterías plomo-ácido y para una entidad ambiental regional (en el tema de las llantas usadas)
	2008	En Colombia, la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito incorpora los fundamentos del ACV en sus cursos de producción más limpia dictados en el programa de ingeniería industrial.

## NOTAS

1. La Organización de Países Exportadores de Petróleo (sus miembros son Argelia, Qatar, Ecuador, Irán, Iraq, Kuwait, Libia, Arabia Saudita, Emiratos Árabes Unidos, Venezuela, Nigeria y Angola). Se fundó en 1960 como respuesta a la presión que ejercían las grandes compañías de petróleo para la reducción de los precios del crudo que cobraban los productores.
2. Fundado en 1968 por Aurelio Peccei, un industrial italiano, y Alexander King, un científico escocés, con el propósito de llevar a cabo actividades que propendieran a un desarrollo y crecimiento industrial más dignificante desde el punto de vista humano.
3. *Energy and Environmental Profile Analysis of Children's Disposable and Cloth Diapers* (1990). Franklin Associates.
4. Si el lector desea una ampliación de este tema puede consultar el artículo "Métodos de apoyo para una gestión ambiental en las organizaciones. Una perspectiva general", de Jairo Raúl Chacón Vargas, publicado en la *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, año 18, No. 70, abril-junio de 2008.
5. Pequeñas y Medianas Empresas.
6. Método para la evaluación del impacto ambiental utilizado en estudios de ACV, desarrollado en Holanda por la firma Pré Consultants.
7. Sin fecha.
8. Los estudios de ACV simplificados se focalizan en el sistema de producción; específicamente evalúan el impacto ambiental del uso del material. Por ejemplo, un ACV puerta a puerta entra al sistema materia prima a la fundición y sale del sistema el cobre refinado. Un ACV reducido también puede ser de la "cuna a puerta". Por ejemplo, se extrae el mineral de cobre, éste entra al sistema de producción y sale de allí el cobre refinado.

## REFERENCIAS

1. Jensen, Allan Astrup. Setac Europe LCA Steering Committee-The Early Years.
2. Jensen, Allan Astrup (2007). The LCM Conferences - How They Came About. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12. Special Issue 1: 2-3.
3. Arena, Alejandro Pablo (2001). Spreading Life-Cycle Assessment to Developing Countries. Lessons from Argentina. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 4, No. 3: 3-6.
4. Jensen, Allan Astrup & Remmen, Arne (2005). The Historical Development of Life Cycle Management (Slides). Force Technology and Aalborg University. 2<sup>nd</sup> International Conference on Life Cycle Management. Barcelona, September 5-7.
5. Díaz, Adenso, Álvarez, María José & González, Pilar (2004). *Logística inversa y medio ambiente*, Madrid: McGraw-Hill/Interamericana de España, SAU.
6. Jensen, Allan Astrup, Hoffman, Leif, Möller, Schmidt, Anders, Christiansen, Kim, Elkington, John & Van Dik Franceska. European Environment Agency. Life Cycle Assessment (LCA). A Guide to Approaches, Experiences and Information Sources. *Environmental Issues Series/No. 6*, pp. 13-15.
7. Ayres, Robert U. (1995). *Life Cycle Analysis: a critique. Resources, conservation and recycling*, 14, 199-223.
8. Baldo, Gian Luca & Giacomucci, Antonio (1999). Institutions: The LCA-Society of Italy. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 4, (3).
9. Baumann, Henrikke & Tillman, Anne-Marie (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA*. Lund, Sweden: Studentlitteratur AB.
10. Baumann, Henrikke (2000). Introduction and organization of LCA activities in industry. Description and analysis of two projects in Swedish companies. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 5 (6) 363-368.
11. Bishop, Paul L. (2000). *Pollution prevention. Fundamentals and practice*. McGraw-Hill Higher Education. International Edition.
12. Book Reviews (1999). *Int. J. LCA* 4 (4).
13. Botero E., Naranjo, C., Aguirre. Apeinpro, Software for Life



- Cycle Assessment (LCA) and Environmental Performance Evaluation (EPE). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 13 (2), 172-174.
14. Boustead, Ian (1996). LCA-How it came about the beginning in the U.K. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1 (3) 147-150.
15. Bretz, Rolf (1998). Spold. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 3 (3), 119-120.
16. Cappellaro, Francesca, Scalbi, Simona & Masoni Paolo (2008). Editorial. The Italian network on LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 13: 523-525.
17. Chacón Vargas, Jairo Raúl (2008). Métodos de apoyo para una gestión ambiental en las organizaciones. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, año 18, No. 70, abril-junio, 43-72.
18. Cilca (2009). III Conferencia Internacional de Análisis de Ciclo de Vida en Latinoamérica. Acerca de Cilca 2009. [http://www.cilca2009.cl\\_07/02/2009](http://www.cilca2009.cl_07/02/2009).
19. Conference Announcement: Environmental Sustainability Conference (2000). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 5 (6).
20. Conference Announcements (1999). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 4 (5).
21. Conference Reports: LCA in Brighton (2000). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 5 (4), 249.
22. Conference Reports: 8<sup>th</sup> LCA Case Studies Symposium (2001). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 6 (1), 53-54.
23. Curran, Mary Ann (1996). *Environmental Life-Cycle Assessment*, McGraw-Hill.
- Curran, Mary Ann (2007). The InLCA/LCM Conferences-How They Came About. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12, Special Issue 1, 4.
24. Ecobilan. Life Cycle Assessment History. [http://www.ecobilan.com/uk\\_lca02.php](http://www.ecobilan.com/uk_lca02.php). 31/08/2002.
25. Ecoinvent. History of the Ecoinvent Centre, the Swiss Centre for Life Cycle Inventories. <http://www.ecoinvent.org/we-about-us/history/> 04/09/2008.
26. European Commission. Guidelines for the application of life cycle assessment in the EU eco-label scheme. ISBN 92-827-8684.
6. Luxemburgo (1997). Office for Official Publications of the European Communities.
27. Fava, James & Cooper, Joyce Smith (2002). Alignment of North American Activities to the UBEP/SETAC Life-Cycle Initiative. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 5, No. 4, pp. 3-5.
28. Fink, Paul (1997). The roots of LCA in Switzerland-Continuous learning by doing. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2 (3), 131-134.
29. Finkbeiner, Matthias & Matsuno, Yasunario (2000). LCA in Japan-The past, the present, the future. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 5 (5), 253-254.
30. Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (Fondef). <http://www.fondef.cl/> 07/02/2009.
31. Frankl, Paolo & Rubik, F. (1999). Life-Cycle Assessment (LCA) in Business an Overview on Drivers, Applications, Issues and Future Perspectives. Center for the Management of Environmental Resources (CMER, France). Institut fuer oekologische Wirtschaftsforschung (Germany). *Global Nest: the Int. J.* Vol. 1, No. 3, pp. 185-194.
32. From Rio to Johannesburg- A Business Perspective (2002). The 7<sup>th</sup> International Business Forum. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 7 (5), 253-260.
33. Fullana, Pere & Puig, Rita (1997). Análisis de Ciclo de Vida. *Cuadernos de Medio Ambiente*, 1<sup>a</sup> ed. Barcelona: Rubes Editorial, S.L.
34. Giacomucci, Antonio & Baldo, Gian Luca (1999). LCA Activities in Italy. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 4 (4).
35. Ginnée B., Jeroen (final editor), Gorrée, Marieke, Heijungs, Reinout, Huppes, Gjalt, Kleijn René, De Koning, Arjan, Van Oers, Laurant, Sleswijk, Wegener, Anneke, Suh, Sangwon, Udo de Haes, Helias, De Brujin, Hans, Van Duin, Robbert, Huijbregts, Mark, Lindeijer, Erwin, Roorda, Aksel & Van der Ven, Bernhard (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
36. Ginnée B., Jeroen (final editor), Gorrée, Marieke, Heijungs, Reinout, Huppes, Gjalt, Kleijn, René, De Koning, Arjan, Van Oers, Laurant, Sleswijk, Wegener, Anneke, Suh, Sangwon, Udo de Haes, Helias, De Brujin, Hans, Van Duin, Robbert, Huijbregts, Mark, Lindeijer, Erwin, Roorda, Aksel & Van der Ven, Bernhard (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
37. Giudice, Fabio, La Rosa, Guido & Risitano, Antonino (2006). *Product Design for the Environment. A Life Cycle Approach*. Boca Raton. US: Taylor & Francis Group.
38. Goijberg, Norman (2003). Reducción de gases de efecto invernadero. Construcción sustentable. Seminario Cambio Climático en Chile. Oferta de Bonos de Carbonos y de Servicios Ambientales al Mundo. Santiago de Chile, 18-19 de junio.
39. Hanssen, Ole J. (1999). Status of Life Cycle Assessment (LCA). Activities in the Nordic Region. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 4 (6), 315-320.
40. Hellweg, Stefanie & Frischknecht (2004). Evaluation of Long-Term Impacts in LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 9 (5), 339-341.
41. Hellweg, Stefanie, Koehler, Annette & Rebitzer, Gerald (2007). Conference Announcement and Call for Papers. LCM2007 Zurich. From analysis to implementation, 3<sup>rd</sup> International Conference on Life Cycle Management. Zurich, August 27-29. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 11 (6), 447-448.
42. Hicks, C. & Dietmar, R. (2007). Improving cleaner production through the application of environmental management tools in China. *Journal of Cleaner Production*, 15, 395-408.
43. Hondo, Hiroki, Tokimatsu, Koji, Fujita, Tsuyoshi, Matsuno, Yasunari & Nakajima, Michiyasu (2007). Designing our Future Society Using Systems Thinking. November 25-27, 2006, Tsukuba, Japan. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12 (1), 66-69.
44. Hunkeler, David, Ryochi, Yamamoto & Itaru, Yasui (1999). A Review of the Third International Conference on Ecobalances. Tsukuba, Japan, November 25-27, 1998. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 4 (2), 118-120.
45. Hunkeler, David, Rebitzer, Gerald & Inaba, Atsushi (2002). Environmental Performance Indicators and Application of Life Thinking to Product Development and Corporate Management. A detailed LCM-related excerpt of the Fifth International Conference on Ecobalances. November 6-8, Tsukuba, Japan.
46. Hunkeler, David, Yasui, Itaru & Yamamoto, Ryoichi (1998). LCA in Japan: Policy and progress. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 3 (3), 124-130.
47. Hunt, Robert G. & Franklin, William E. (1996). LCA- How it came about: Personal Reflections on the Origin and the Development of LCA in the USA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1(1), 4-7.
48. Hur, Tak (1999). Activities of the Korean Society for Life Cycle Assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 4 (5), 247-248.

49. Inaba, Atsushi, Hunkeler, David, Rebitzer, Gerald, Finkbeiner, Matthias, Siegenthaler, Claude & Saur, Konrad (2003). The Fifth International Conference on Ecoblances. Practical Tools and Thoughtful Principles for Sustainability. November 6-8, 2002, Tsukuba, Japan. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8 (1), 1-5.
50. Inaba, Atsushi & Grant, Tim (2003). AIST Workshop "Gateway to Life Cycle Impact Assessment for Apec Member Economies". *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8 (2), 62.
51. InterfacEHS. Life Cycle Concept. A Journal on Integrated Management of Occupational Health and the Environment (2006). <http://www.interfacehs.sp.senac.br/07/02/2009>.
52. Jensen, Allan Astrup, Hunkeler, David, Gaillard, Gérard, Hellweg, Stefanie & Christiansen, Kim (2005). LCM 2005- Innovation by Life Cycle Management. Barcelona: 5-7 September 2005. *International Journal of Life Cycle Management*, 10 (6), 451-453.
53. Klöpffer, Walter (2006). In Memoriam. Bonifaz Oberbacher (1916-2005). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 11 (4), 294.
54. Klöpffer, Walter & Heinrich, Almut B. (2005). Editorial. 2005-The 10th Anniversary Volume of Int LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 10 (2), 95-96.
55. Konrad, Wilfried (2002). Conference Reports. International Journal of Life Cycle Assessment. Forum "Instruments for Ecological Assessment of Products Within Companies". *International Journal of Life Cycle Assessment*, 7 (1), 55.
56. Lewis, Helen, Gertzakis, John, Grant, Tim, Morelli, Nicola & Sweatman, Andrew. (2001). Design + Environment. A Global Guide To Designing Greener Goods. UK: Greenleaf Publishing. Sheffield.
57. Lohsomboon, Pongvipa. LCA Activities in Thailand. Business and Environment Program, Thailand Environment Institute. Sf.
58. Marsmann, Manfred (1997). Editorial. ISO 14040-The First Project. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2 (3), 122-123.
59. Matsuno, Yasunari & Kondo, Yasushi (2008). The Collaboration between Int J Life Cycle Assess and J LCA Jpn. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 14: 83-88.
60. Naranjo, Carlos. Análisis de ciclo de vida. Universidad Pontificia Bolivariana. Recuento histórico. Comunicación personal.
61. Pålson, Ann-Christin & Carson, Raúl (2000). Using an LCI Database For Reporting and Communication. CPM. Chalmers University. Conference on Life Cycle Assessment: Tools for Sustainability. Arlington, Virginia: April 25-27.
62. Pap, Nóra. Introduction to Life Cycle Assessment (LCA) (2004). Industrial Ecology and Recycling Course. 19.10. (Slides). University of Oulu.
63. Peña, Claudia, Caldeira-Pires, Armando, Raval, Antoine, Palma, Silvia, Lima Ferreira, Ángela María, Hirohumi, Tanimoto, Armando, Kiperstok, Asher & Wiertz, Jacques (2008). Universidad de Brasilia. Centro Chileno de Investigaciones Minera y Metalúrgica (CIMM). The 6th Workshop on LCA for APEC Members Economies. Tokio: 6-7 of March.
64. Peña, Claudia (CIMM) (2008). Life Cycle Assessment (LCA): a Methodological Tool for Industrial Sustainability. 8th International Conference Clean Technologies for the World Mining Industry. Santiago, Chile: 13-16 April.
65. Peña, Claudia (2008). Hitos en la evolución de la industria en el mundo. Innova Minería. <http://www.innovamineria.cl/07/02>.
66. Rebitzer, Gerald, Köhler, Annette, Suh, Sangwon, Klöpffer, Jolliet, Olivier & Saur, Konrad (2003). Theory and Practical Implementation of Life Cycle Assessment. 13th Setac-Europe Annual Meeting, 27 April – 1 May, 2003 in Hamburg, Germany. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8 (4), 235-240.
67. Rebitzer, Gerald, Pere, Fullana, Olivier, Jolliet & Klöpffer, Walter (2001). An Update on the Liaison of the Two LCA-Planets: 11th Setac Europe Annual Meeting, 6-10 May 2001 in Madrid, Spain. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 6 (4), 187-191.
68. Rebitzer, Gerald, Windsperger, Andreas, David, Pennington & Jolliet, Olivier (2002). Science and Application of Life Cycle Assessment. 12th Setac Europe Annual Meeting, 12-16 May 2002 in Viena, Austria. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 7 (4), 251-252.
69. Remmen, Arne, Jensen, Allan Astrup & Frydendal, Jeppe (2007). Life Cycle Management. A Business Guide to Sustainability. Unep-Setac Life Cycle Initiative. Unep DTIE Sustainable Consumption and Production Branch. pp. 49-51.
70. Research Projects (2001). Sustainable Product Design: Two major studies published on State of the Art in the EU and Dissemination to SMEs. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 6 (4), 250.
71. Rex, Emma & Baumann, Henrikke (2004). Expanding the Green Practice of LCA. The first decade of Life Cycle Assessment Activity in the Swedish Forest Products Industry. Centre for Environmental Assessment of Product and Material System. Chalmers University of Technology.
72. Scharnhorst, Wolfram, Köhler, Annette, Rebitzer, Gerald, Hischier, Roland & Jolliet, Olivier (2004). Progress in Modern Life Cycle Assessment: Practice and Research. 14th Setac Europe Annual Meeting, 19th -22nd April 2004 in Prague, Czech Republic. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 9 (3), 143-151.
73. Setac Meetings (2001). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 6 (4), 254.
74. Siegenthaler, Claude Patrick & Margni, Manuele (2005). Dissemination, Application and Assessment of LCA in industry. 25th LCA Discussion Forum at ETH Zürich, Switzerland. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 10 (5), 377-378.
75. Siegenthaler, Claude Patrick (2008). Life Cycle Analysis and Applications. Corporate Sustainability and Technology. Guest Lecture, ETHZ. Faculty for Humanity and Environment-Hosei University Tokyo. October.
76. Sonnemann, Guido W., Solgaard, Anne, Saur, Konrad, Udo de Haes, Helias, Christiansen, Kim & Jensen, Allan Astrup (2001). Life Cycle Management: Unep-Workshop. Sharing Experiences on LCM. Copenhagen, Denmark, August 30. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 6 (6), 325-333.
77. Sundkvist, Åsa & Göran, Finnveden (2007). Stakeholder needs study on indicators for IPP (Integrated Product Policy). *Journal of Cleaner Production*, 15, 323-326.
78. Suppen, Nydia, Carranza, Mario, Huerta, Mario & Hernández, Mario (2006). Environmental Management and Life Cycle Approaches in the Mexican Mining Industry. *Journal of Cleaner Production*, 14, 1101-1115.
79. Suppen, Nydia (2005). LCA Association in Latin America. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 10 (5), 376.
80. Tellenbach, Mathias (2008). Life Cycle Assessment as a Decision Tool in Environmental Policy (Slides). Federal Department of the Environment, Transport, Energy and Communications Detec. Federal Office for Waste and Raw Material FOEN. Waste and Raw Material Division. Lausanne, March 14.
81. Thai LCA Network. <http://www.thailca.th.gs/>. 2006.
82. Tilche, Andrea & Galatola, Michele (2008). Life Cycle Assessment in the European Seventh Framework Programme for Research (2007-2013). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 13 (2), 166-167.
83. Töpffer, Klaus (2002). Editorial for Int J LCA on the Launch of the UNEP-SETAC Life Cycle Initiative. *International Journal of*

*Life Cycle Assessment*, 7 (4), 191.

84. U.S. Environmental Protection Agency (2000). National Risk Management Research Laboratory. Office of Research and Development. EPA/600/R-06/060. Cincinnati, Ohio 45268. May.

85. United Nations Industrial Development Organization (1994). Learning 5. Analytical Tools for Identifying Cleaner Production Opportunities.

86. Universidad de los Andes. Catálogo Uniandes. <http://biblioteca.uniandes.edu.co/09/02/2008>.

87. Van Hoof, Bart (1999). El análisis de ciclo de vida (ACV) como herramienta de la gestión ambiental para la industria colombiana. Universidad de los Andes. Conferencia para el Seminario de Producción más Limpia. Diciembre. Bucaramanga, Colombia.

88. Van Rossem, Chris, Tojo, Naoko & Lindhqvist, Thomas (2006). Extended Producer Responsibility-An Examination of its impact on innovation and greening products. International Institute for Industrial Environmental Economics. Report commissioned by Green Peace International, Friends of the Earth and European Environmental Bureau.

89. Vercauteren, An (2000). Integrating the Life Cycle Concept in the Product Development of SMEs: 2 tools that support this integration. Arlington, Virginia: International Conference on Life Cycle Assessment: Tools for Sustainability. April 25-27.

90. Weidema, Bo Pedersen (1997). *Environmental Assessment of Products. A textbook on Life Cycle Assessment*. Finland: Published by The Finnish Association of Graduate Engineers TEK.

91. Werner, Frank (2005). Ambiguities in Decision-Oriented Life Cycle Inventories-The Role of Mental Models and Values. Springer.

92. Wrisberg, Noline & Udo de Haes, Helias (eds.) (2002). *Analytical tools for environmental design and management in a systems perspective*. Kluwer Academic Publishers.

93. Yano, Masataka, Aoki, Ryohsuke, Yoshihumi, Nakahara, Itsubo, Norihiro & Ohta, Toshio (2000). Current Activities of the National LCA Project in Japan. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 5 (5), 261-264.

94. Young B., Steven (2003). Life Cycle Assessment in Canada. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8 (6), 321-322.

95. Zakaria, Zulina, Nasir Hassan, Mohd & Awang Muhamad (1999). Current Status and Needs for Life Cycle Assessment Development in Asian/Pacific Regions. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 4 (4), 191-194.

96. Zuoren, Nie, Xianghua, Di, Tiejong, Guiqi & Tiejong Zuo (2001). Material Life Cycle Assessment in China. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 6 (1), 47-48.

# Estudio comparativo de monocapas de Al-N y Cr-N como recubrimientos duros sobre acero Aisi D3

G. CABRERA, F. TORRES, J. C. CAICEDO

Grupo de Películas Delgadas, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

C. AMAYA

Grupo de Películas Delgadas, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Laboratorio de Recubrimientos Duros, CDT-Astin Sena, Cali, Colombia.

N. A. DE SÁNCHEZ

Grupo Ciencia e Ingeniería de Materiales - GCIM, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia.

A. MENDOZA

Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

P. PRIETO

Centro de Excelencia en Nuevos Materiales - CENM, calle 13 No. 100-00, edificio 320, espacio 1026, Cali, Colombia.

Artículo recibido: 06/10/2008

Evaluación: 10/10/2008

Aprobado: 24/10/2008

## Resumen

Se depositaron recubrimientos de nitruro de aluminio (AlN) y nitruro de cromo, sobre sustratos de silicio (100) y de acero Aisi D3, mediante un sistema multiblancos magnetron *sputtering* con r.f. (13,56 MHz), a partir de un blanco de Al y Cr de alta pureza (99,99%) en una atmósfera compuesta de Ar/N<sub>2</sub>. Con el fin de estudiar de manera comparativa sus propiedades tribológicas, las muestras se sometieron a estudios de composición química, estructural y de respuesta tribológica. Se analizaron la cristalinidad y la composición química mediante difracción de rayos X (XRD), observando una orientación preferencial para AlN correspondiente a la dirección (002). De los análisis por FTIR se encontraron modos activos alrededor de 680 cm<sup>-1</sup> asociados a los enlaces Al-N y modos activos alrededor de 550 cm<sup>-1</sup> asociados a los enlaces Cr-N. Se observaron recubrimientos de AlN y CrN. Mediante microscopía de fuerza atómica (AFM) y microscopía electrónica de barrido (SEM) se estudiaron la morfología y la textura; de los resultados de AFM, se analizó el tamaño de grano con valores de 74 ± 4 nm para el AlN y 56 ± 4 nm para el CrN. En este estudio tribológico se realizaron pruebas de *pin on disk* y rayado, donde se encontró que el coeficiente de fricción para la película de CrN fue 1,2 veces menor que el de la película de AlN, y la carga crítica para el CrN fue de 1,5 veces mayor que para el AlN; las huellas de rayado se observaron por microscopía óptica, revelando las diferencias existentes entre los dos recubrimientos, lo cual confirma la diferencia físico-mecánica

de estos dos recubrimientos, que es relevante cuando se aplican en dispositivos industriales de uso mecánico-tribológico, como los moldes de inyección de polímero.

**Palabras claves:** nitruro de aluminio, nitruro de cromo, magnetron *sputtering* reactivo, propiedades tribológicas.

## Abstract

Aluminum (AlN) and chromium nitride (CrN) thin films were deposited on silicon (100) and steel substrate Aisi D3 by magnetron sputtering by using a r.f. (13,56 MHz) multi-target system, from Al and Cr high purity (99,99%) targets in an Ar/N<sub>2</sub> atmosphere, with the purpose to study the micro structural, crystallographic arrangement and the tribological response. The cristality and the chemical composition were analyzed; by XRD that determined the preferential orientation (100) direction for AlN and the (111) direction for CrN. FTIR analysis showed the active modes around 680 cm<sup>-1</sup> associated to the active Al-N bonds and 550 cm<sup>-1</sup> associated to the active Cr-N bonds. Atomic Force Microscopy (AFM) and scanning electron microscopy (SEM) were use to study the morphology and texture; AFM results reveals grain sizes with values of 74 ± 4 nm for the AlN coating and 56 ± 4 nm for the CrN coating. Tribological study was made by using pin on disk and scratch tests, where it was founded that the friction coefficient for

the CrN coating was 1.2 times less than the AlN coating, and the critic load for the CrN was 1.5 times higher than the AlN coating; the scratch paths were observed by optical microscopy revealing the differences existents between both coatings, which confirms the mechanical difference between this two systems. These type of coatings showed excellent characteristics for mechanical and tribological applications, like in molds for polymer injection.

**Keywords:** aluminum nitride, chromium nitride, reactive magnetron sputtering, tribological properties.

## INTRODUCCIÓN

Situaciones en las cuales hay superficies en contacto y movimiento relativo presentan efectos de fricción, desgaste y lubricación. A nivel industrial, estos efectos se evidencian en procesos de corte, engranajes, válvulas, rodamientos, conducción corrosiva de gases, etc. La mayoría de estas aplicaciones se asisten actualmente por aceros endurecidos con recubrimientos duros. En particular, los recubrimientos de nitruro de titanio fueron de los primeros materiales empleados sobre las herramientas de aplicación tribológica. El continuo desarrollo de nuevos materiales para recubrimientos ha conducido al mejoramiento de las propiedades mecánicas y a la prolongación de la vida útil de las herramientas. Entre los recubrimientos prometedores como alternativa para el recubrimiento de aceros están los nitruros base cromo, como el  $\text{Cr}_2\text{N}$  y el CrN, los cuales se emplean en la actualidad sobre herramientas de aplicación mecánica [1]. Muchas técnicas se han utilizado para la deposición de recubrimientos de CrN, entre ellas por deposición en fase de vapor reactiva. Entre las principales características de películas depositadas por esta técnica, el CrN se puede mencionar que posee buena dureza, alta tenacidad y un coeficiente de fricción comparable con el TiN (cuando está en contacto con acero). Por otro lado, la alta estabilidad química y térmica de este material, así como una temperatura de oxidación alrededor de 700 °C, hacen que este material sea apropiado para aplicaciones de trabajo en caliente [2]. Por otra parte, se ha despertado interés por los recubrimientos de nitruro de aluminio (AlN) debido a propiedades como estabilidad química, bajo coeficiente de expansión térmica, dureza alrededor de 20 GPa, conductividad térmica de 320  $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$  y temperatura de fusión alrededor de 3.000 °C. Debido a las propiedades del AlN, este material se utiliza en capas aislantes, además de recubrimientos duros y anticorrosivos [3]. En este trabajo se evaluaron

propiedades físicas y químicas de monocapas de AlN y CrN depositadas sobre sustratos de acero Aisi D3, y se identificó cuáles poseen mejores características para emplearlos como recubrimientos duros de herramientas y dispositivos industriales fabricados en este acero.

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se fabricaron los recubrimientos de CrN y AlN sobre sustratos de silicio (100) y acero Aisi D3 utilizando la técnica magnetron *sputtering* reactivo en la planta piloto del CDT Astin (Sena, regional Valle). El sistema empleó una fuente r.f. (13.56 MHz), blancos de Cr y Al de 10 cm de diámetro y pureza del 99,9%. La deposición se realizó a una potencia r.f. de 350 W sobre el blanco de Cr y 400 W sobre el blanco de Al para generar CrN y AlN, respectivamente, un voltaje bias de -50 V, temperatura del sustrato de 250 °C y una relación de gases  $\text{Ar}/\text{N}_2$  (92%/8%) a una presión de  $2 \times 10^{-3}$  mbar para ambos recubrimientos. Para reducir posibles contaminaciones de las muestras se realizó un proceso estándar de limpieza de la cámara a una presión base de  $1,4 \times 10^{-6}$  mbar por medio de una bomba turbomolecular, y los sustratos de acero se sometieron a un proceso de pulido al espejo y limpieza de *presputtering*. La deposición de los recubrimientos se hizo de manera simultánea sobre un sustrato de silicio y uno de acero, los cuales se utilizaron en los diferentes procesos de caracterización que se mencionan a continuación: difracción de rayos X (XRD) para realizar un análisis estructural de los recubrimientos, con un difractómetro Panalytical X'Pert PRO con radiación de  $\text{Cu K}_\alpha$  a temperatura ambiente en el modo de haz rasante; Espectroscopía de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR) para analizar el tipo de enlaces presentes, la cual se realizó en un espectrómetro Shimadzu 8000 ( $600 - 3.500 \text{ cm}^{-1}$ ), con fuente cerámica tipo Nerst.

Una vez confirmada la deposición del material en las fases requeridas (CrN y AlN), se procedió a realizar un estudio morfológico del material. Este análisis incluyó la evaluación del tamaño de grano y rugosidad, y características de homogeneidad superficial. Las primeras se realizaron con un microscopio de fuerza atómica (AFM) Asylum Research MFP-3D<sup>®</sup>, mientras que las características superficiales se determinaron con un microscopio electrónico de barrido (SEM) (Phenom FEI) equipado con una luz óptica con un rango de magnificación de

525-24.00X y un detector de alta sensibilidad (multi-modos) para electrones retrodispersados.

Finalmente, se hicieron pruebas mecánicas con un tribómetro Microtest, *MT 4001 - 98*, usando como patrón deslizante una bola de acero 100 Cr6 de 6 mm de diámetro y una carga aplicada de 0,5 N con longitud total de recorrido de 1.000 m; y de adherencia de las capas por aplicación de pruebas de rayado (*Scratch Test*) en un equipo de *Scratch Test* Microtest *MTR2* con la asistencia de un microscopio óptico Olympus *PME-3* para analizar los tipos de fallas de adherencia a una longitud de rayado de 6 mm y una carga máxima de 90 N.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las propiedades de cada una de las películas se evaluaron a través de diferentes técnicas, cuyo resultado y análisis se presenta a continuación:

### Análisis de XRD

La estructura cristalográfica de la película de AlN se obtuvo por difracción de rayos X en el modo de haz rasante. En la figura 1a se muestra el difractograma conseguido para un recubrimiento depositado sobre silicio (100). Aquí se pueden observar orientaciones preferenciales para el AlN correspondientes a reflexiones de los picos de Bragg de los planos (100) con un alto grado de cristalinidad en  $2\theta=33,185^\circ$ ; otras reflexiones de baja intensidad para el AlN se han presentado para los planos (002) en  $2\theta=35,5^\circ$  y (101) en  $2\theta=35,5^\circ$ , asociados

a la fase hexagonal tipo (*m*-AlN). Dado que el difractograma se ha obtenido con la técnica de haz rasante, y que a las condiciones de crecimiento, los picos (100) y (002) pueden tener igual intensidad, concluimos que la dirección privilegiada de crecimiento es la (002) por ser reducida en este diagrama. Adicionalmente se observan algunos picos correspondientes al  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en el plano (006) a  $2\theta=40,53^\circ$  y (113) a  $2\theta=24,81^\circ$  y  $2\theta=52,05^\circ$ . La presencia de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  es asociada al oxígeno residual en la cámara de vacío. También se observan picos correspondientes al Al (*buffer layer*) en la dirección (200) [4-6].

En la figura 1b se observa la estructura cristalográfica de la película de CrN obtenida por difracción de rayos X en el modo de haz rasante, difractograma obtenido para un recubrimiento depositado sobre silicio (100). Se observan orientaciones para el CrN correspondientes a reflexiones de los picos de Bragg en los planos (111) para  $2\theta=33,65^\circ$ , el cual presenta una alta cristalinidad debido a la intensidad del pico, mientras que el plano (200) para  $2\theta=42,85^\circ$  prácticamente no es observable, picos que están asociados a la fase fcc del CrN [7]. Lo anterior sugiere que la dirección (200) es la dirección preferencial de crecimiento en esta película. Como es de esperarse, para las presiones de trabajo está presente también la fase hexagonal del  $\text{Cr}_2\text{N}$ , del cual se observan los planos (111), (112) y (300) para  $2\theta=41,01^\circ$ ,  $2\theta=52,46^\circ$  y  $2\theta=66,85^\circ$ , respectivamente [8]. Además, se observan algunos picos correspondientes a los planos (110) asociados al Cr (*buffer layer*) [7] y (104) para el  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . La presencia de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  es un resultado del oxígeno residual en la cámara de vacío [9,10].

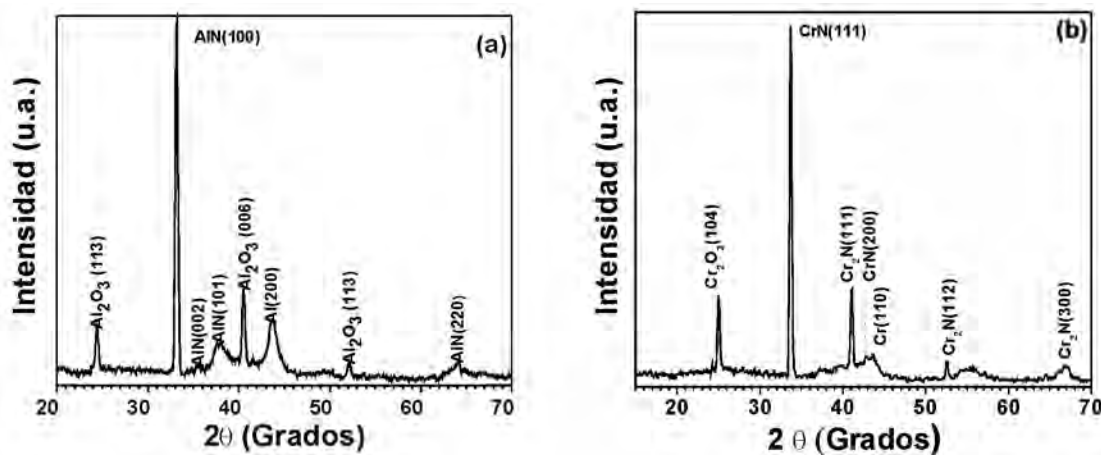


Figura 1. Patrón XRD obtenido para recubrimientos depositados con  $-50$  V sobre silicio (100) a) AlN y b) CrN.

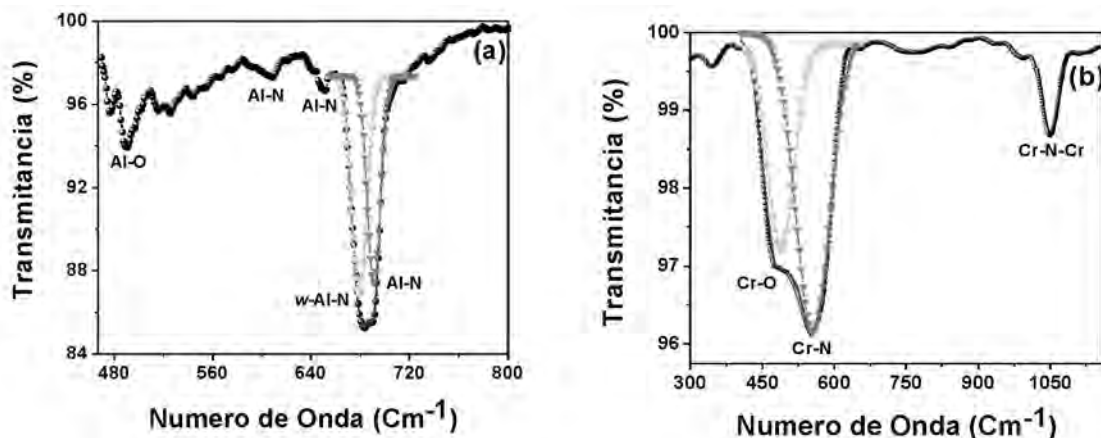


Figura 2. Espectro de FTIR obtenido para recubrimientos depositados con  $-50$  V sobre silicio (100), a) AlN y b) CrN.

### Análisis de FTIR

Para realizar el análisis de FTIR, el recubrimiento de AlN se depositó sobre un sustrato de Si (100). Los espectros de FTIR se tomaron en el modo de transmitancia. En la figura 2a se presenta un espectro en el rango de  $468$  a  $800$   $\text{cm}^{-1}$ ; después de las respectivas deconvoluciones se observan modos activos en el infrarrojo, principalmente una banda estrecha centrada en  $680$   $\text{cm}^{-1}$ , el cual se puede atribuir a la contribución del modo fonónico  $E_1(\text{TO})$  del w-AlN [11], así como también la presencia de cuatro bandas alrededor de  $485$   $\text{cm}^{-1}$ ,  $520$   $\text{cm}^{-1}$ ,  $615$   $\text{cm}^{-1}$ ,  $655$   $\text{cm}^{-1}$  y  $691$   $\text{cm}^{-1}$ , asociados a los enlaces Al-O, característicos de un alargamiento simétrico (*stretching*) [12], Al-N de fases no estequiométricas ( $\text{Al}_x\text{N}_y$ ) [13], al modo fonónico  $A_1(\text{TO})$  del AlN hexagonal y al modo fonónico LO del AlN hexagonal [13, 14], respectivamente.

En la figura 2b se observa un espectro de FTIR para el recubrimiento de CrN, depositado sobre un sustrato de Si (100). Los espectros de FTIR se tomaron en el modo de transmitancia en el rango de  $300$  a  $1.150$   $\text{cm}^{-1}$ ; después de las respectivas deconvoluciones se observan modos activos en el infrarrojo, principalmente una banda estrecha centrada en  $550$   $\text{cm}^{-1}$ , el cual puede asociarse a los enlaces Cr-N; además aparece una segunda banda intensa, centrada en  $450$ , correspondiente al enlace Cr-O proveniente de la fase  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  [15]. Finalmente, se observa una banda de baja intensidad centrada en  $1.050$   $\text{cm}^{-1}$ , correspondiente a los enlaces Cr-N-Cr. La formación de los óxidos de cromo puede corresponder a contaminación durante el proceso de formación de la película [16,17].

### Perfilometría y análisis SEM

En la figura 4, partes a) y b), se muestran las gráficas de perfilometría realizada sobre los recubrimientos de AlN y CrN. De las medidas de espesor de los recubrimientos:  $1,8$   $\mu\text{m}$  y  $4,1$   $\mu\text{m}$  para el AlN y CrN, respectivamente, se observa una razón entre las tasas de deposición efectiva  $t_e$  de 1:2,3, teniendo en cuenta que  $t_e$  es la diferencia entre el material que alcanza la superficie del sustrato y el material que se extrae nuevamente de la superficie. Por lo anterior, y dado que las condiciones a las cuales se han sometido los sustratos, en ambos casos, son iguales, se sugiere en este trabajo que la diferencia en las tasas de deposición se origina en la cantidad de material que alcanza el sustrato, o en otras palabras, en la cantidad de material que se remueve del blanco. En el caso del Cr, se observa entonces una mayor remoción de material del blanco que en el caso del Al.

En las imágenes SEM (figura 4) aparecen superficies altamente homogéneas a escala microscópica para los recubrimientos de AlN y CrN. Este aspecto es fundamental para el recubrimiento de herramientas de aplicación tribológica, dado que en la mayoría de los casos las fallas mecánicas se inician a esta escala.

### Análisis superficial a escala nanométrica

La superficie de los recubrimientos de AlN y CrN se observó mediante microscopía de fuerza atómica (AFM), con el fin de determinar las características morfológicas de los recubrimientos. El área analizada fue de  $2$   $\mu\text{m} \times 2$   $\mu\text{m}$  y se empleó la técnica en modo no contacto. En la figura 3, partes a) y b), se muestra la superficie para

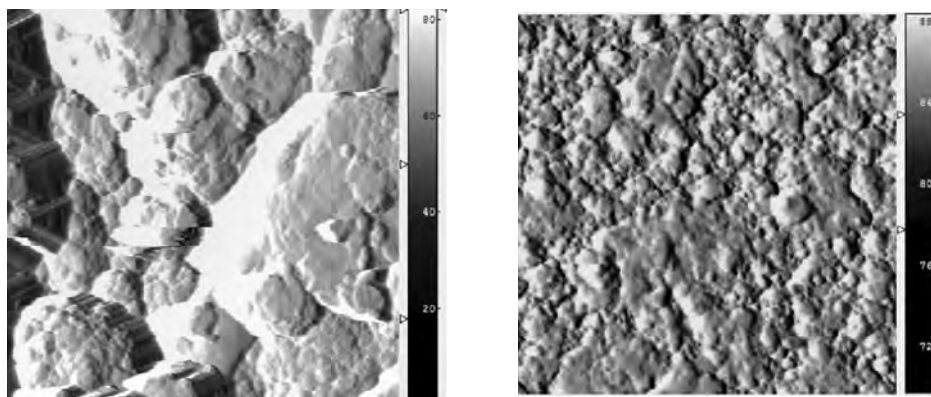


Figura 3. Imágenes de AFM ( $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ ) obtenidas para recubrimientos depositados sobre acero Aisi D3, a) AlN y b) CrN.

los recubrimientos de AlN y CrN, depositados sobre acero Aisi D3. El tamaño del grano y la rugosidad se calculó mediante el *software* estadístico para imágenes (SPIP). Para el caso del tamaño de grano, la película de AlN presentó un valor de  $74 \pm 4\ \text{nm}$ , y la película de CrN registró un valor de  $39 \pm 2\ \text{nm}$ . Para el caso de la rugosidad la película de AlN exhibió un valor de  $56 \pm 4\ \text{nm}$  y la película de CrN presentó un valor de  $39 \pm 2\ \text{nm}$ . De lo anterior podemos observar que la superficie de la película de CrN muestra una superficie más regular respecto a la película de AlN, lo cual se refleja en los valores del tamaño de grano y rugosidad.

#### Análisis de fricción

El comportamiento tribológico de los recubrimientos de AlN y CrN se evaluó mediante el ensayo de *pin-on-disc*. En la figura 5 se muestra el coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento de los recubrimientos depositados sobre acero Aisi D3. Se puede observar en los dos casos un comportamiento típico al comienzo del recorrido. Esta etapa, conocida como etapa de asentamiento [18], está presente en distancias de recorrido entre 0 y 100 m. Dado que las dos superficies están sujetas a la fricción de deslizamiento y desgaste, se puede esperar que la composición química

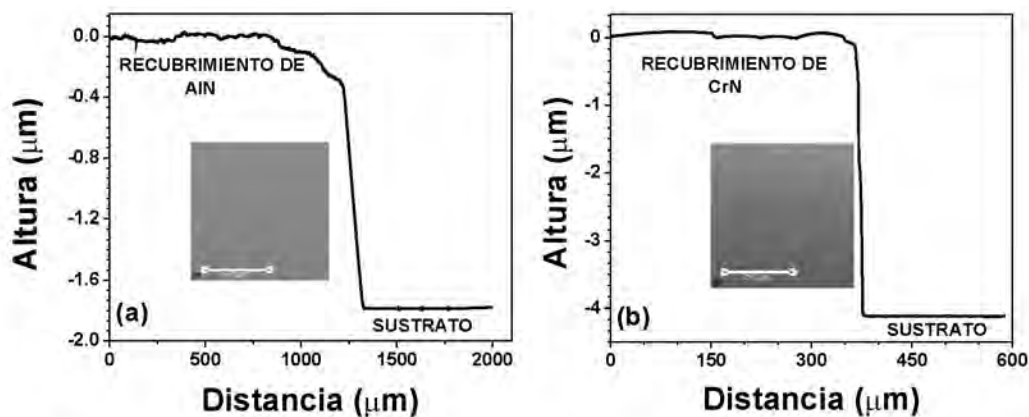


Figura 4. Curvas de perfilometría y SEM obtenidas para recubrimientos depositados con  $-50\text{V}$  sobre silicio (100), a) AlN y b) CrN.



superficial se modifique a causa de las interacciones entre las superficies en contacto. Básicamente, estas interacciones llevan a la transferencia de material y, en consecuencia, a la formación de una capa conocida como capa de transferencia, la cual tiene efectos bien conocidos sobre la fricción y el desgaste [19]. En esta etapa el coeficiente de rozamiento se reduce y se hace constante, el área de contacto pierde rugosidad y la fricción tiende a disminuir, situándose en un régimen de estado estable. Como se ve a continuación, la capa de transferencia se hizo presente en los dos recubrimientos para distancias superiores a 100 m (figura 5). En este régimen se esperan efectos adicionales que generan mecanismos de desgaste abrasivos y adhesivos sobre el recubrimiento [20].

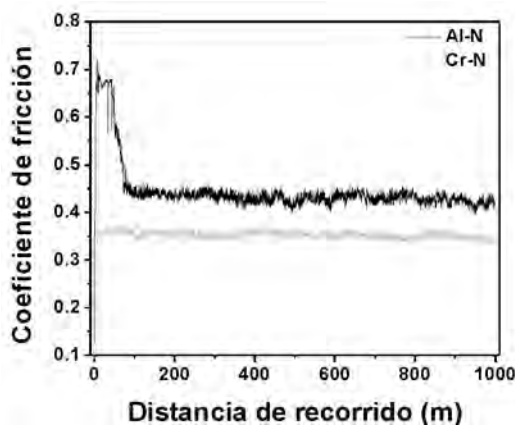


Figura 5. Coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento para los recubrimientos de CrN y AlN.

Para la película de AlN, el coeficiente de fricción alcanzó un valor estable de 0,43 y el coeficiente de fricción para la película de CrN con un valor de 0,35, observando así un coeficiente de fricción menor para la película de CrN.

#### Análisis de rayado

La adherencia de los recubrimientos se estudió mediante la aplicación de una prueba de rayado o *Scratch Test*. En la figura 6 se muestran las curvas del coeficiente de fricción en función de la carga aplicada (entre 0 N y 90 N) sobre los recubrimientos de AlN y CrN, y se identifican dos cargas críticas, sobre cada muestra. La

primera correspondiente a la carga crítica en zona de daño cohesivo ( $L_{c1}$ ) y la carga crítica correspondiente a la zona de la falla adhesiva ( $L_{c2}$ ), donde la mayoría de la película se ha desprendido del sustrato. Una carga crítica  $L_{c1}$  se observa alrededor de 15 N y 5 N para las películas de AlN y CrN, respectivamente. La carga crítica  $L_{c2}$  se observa claramente en el caso de la película de AlN, con un valor de 25 N. En el caso del CrN se observa un deterioro de la película de manera continua, es decir, donde el incremento rápido del rozamiento no está presente. De la imagen es claro que a valores cercanos a 25 N, el recubrimiento de AlN se ha delaminado en un alto porcentaje, mientras que la superficie de CrN sufre un desgaste paulatino hasta una carga crítica de 28 N en la película de CrN, lo que indica que el CrN resiste mayores cargas antes que se presente la falla por delaminación. Se observa además que la carga crítica a la cual ocurre el fallo adhesivo de la película de AlN es menor que la presentada por la película de CrN, pudiéndose también identificar las primeras variaciones del coeficiente de fricción para ambos materiales. Esta variación corresponde a una deformación elástica de la película [21, 22].

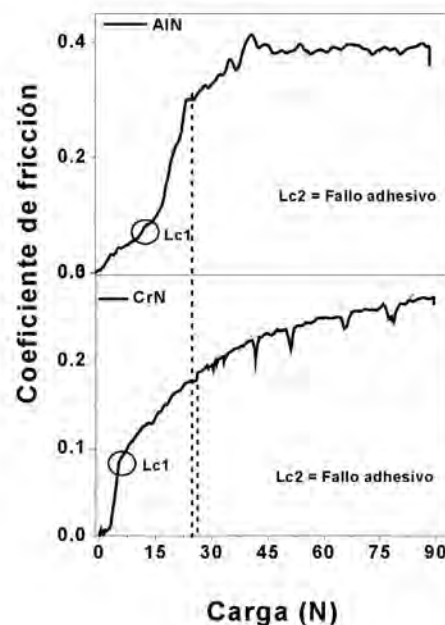
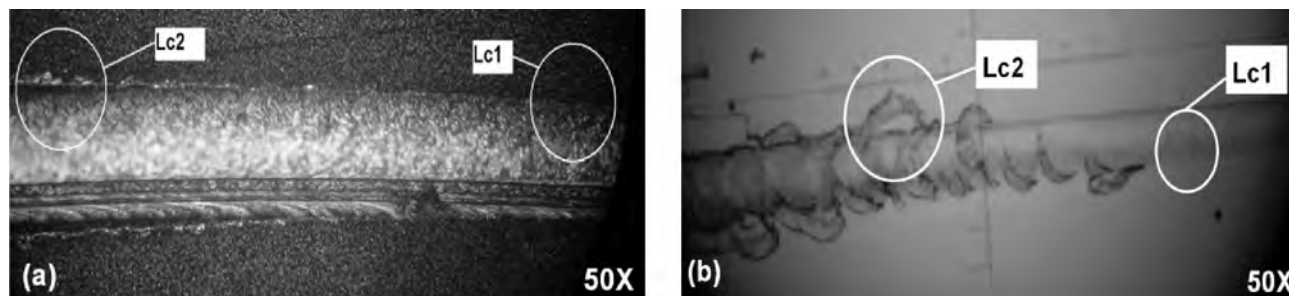


Figura 6. Coeficiente de fricción en función de la carga aplicada para los recubrimientos de AlN y CrN.



**Figura 7.** Imágenes de microscopía óptica donde se muestran el daño cohesivo (Lc1) y el daño adhesivo (Lc2) para recubrimientos depositados sobre acero Aisi D3, a) AlN, b) CrN.

A partir de las imágenes de microscopía óptica, se realizó una valoración cualitativa de la huella de rayado en los recubrimientos de AlN y CrN (figura 7, partes a y b). En ese sentido se analizó la huella dejada por el indentador del *scratch test*. El análisis de las huellas de rayado para los recubrimientos permite estimar en forma cualitativa el daño del recubrimiento en la zona de la falla cohesiva (Lc1) y adhesiva (Lc2) y, a su vez, determinar cuantitativamente la carga máxima que soporta el recubrimiento antes de delaminarse por completo del sustrato [23].

## CONCLUSIONES

Se depositaron recubrimientos duros tipo monocapas de Al-N y Cr-N sobre sustratos de silicio y acero Aisi D3, lográndose determinar mediante XRD la fase hexagonal w-AlN, y de la fase cúbica del CrN y mediante FTIR los enlaces característicos en estos dos materiales.

Se estableció que el coeficiente de fricción disminuyó hasta en un 19% para la película de CrN comparada con la película de AlN, debido a la alta rugosidad mostrada por el recubrimiento de AlN respecto de la mostrada por el recubrimiento de CrN según los resultados de AFM. Una mayor rugosidad permite generar mayor cantidad de partículas en la etapa de asentamiento de la prueba de desgaste, aumentando así el coeficiente de fricción.

En la tabla 1 se presentan algunos de los valores característicos obtenidos en este estudio.

Los valores de carga crítica en las zonas de la falla cohesiva (Lc1) y adhesiva (Lc2) se utilizaron como indicativo indirecto del grado de adherencia en ambos recubrimientos con el sustrato de acero Aisi D3. Los resultados indicaron que la carga crítica para el CrN fue

**Tabla 1**  
Propiedades observadas en recubrimientos de CrN y AlN

Propiedades	CrN	
<b>AlN</b>		
Coefficiente de fricción	0,42	
	0,35	
Estructura /Orientación privilegiada	Cúbica / 200	w-AlN / 002
Grosor de la película	4,1 $\mu\text{m}$	1,8 $\mu\text{m}$
Tamaño de grano	39 $\pm$ 4 nm	74 $\pm$ 4 nm
Rugosidad	39 $\pm$ 2 nm	56 $\pm$ 4 nm

de 1,5 veces mayor que para el AlN, mostrando nuevamente su superioridad, como recubrimiento, frente al AlN. Esta conclusión se confirmó mediante el análisis de las huellas de desgaste por microscopía óptica. Los anteriores resultados demuestran que ambos tipos de recubrimiento son apropiados para aplicaciones industriales, como los moldes de inyección, ya que permiten incrementar la vida útil de aceros de uso industrial, como el acero Aisi D3, con los cuales se fabrica este tipo de elementos. En las condiciones de deposición utilizadas en nuestro estudio el recubrimiento más apto sería el CrN, debido al alto desempeño mecánico mostrado.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo contó con el apoyo del Centro de Excelencia en Nuevos Materiales - CENM, con el contrato RC-043-2005 suscrito con Colciencias.

## REFERENCIAS

- [1] Berg, Gunter et al. (1996). *Surface and Coatings Technology*, 86-87, 184-191.
- [2] Hones, P. et al. (1998). *Thin Solid Films*, 332, 240-246.
- [3] M. Pakala & R.Y. Lin (1996). *Surface and Coatings Technology*, 81, 233-239.
- [4] Figueroa, U. et al. (2005). *Surface and Coatings Technology*, 200, 1768-1776.
- [5] Mohri, S. et al. (2008). *Diamond and Related Materials*, 17, 1796-1799.
- [6] Chu, A.K. et al. (2003). *Thin Solid Films*, 429, 1-4.
- [7] Han, Z. et al. (2003). *Surface and Coatings Technology*, 162, 189-193.
- [8] Wei, G. et al. (2001). *Thin Solid Films*, 398-399, 460-464.
- [9] Lu, F.-H. & Chen, H.-Y. (2001). *Thin Solid Films*, 398-399, 368-373.
- [10] Chen, H.-Y. & Lu, F.-H. (2006). *Thin Solid Films*, 515, 2179-2184.
- [11] Zhang, J.X. et al. (2005). *Surface and Coatings Technology*, 198, 68-73.
- [12] Antsiferov, V.N. et al. (2002). *Vibrational Spectroscopy*, 30, 169-173.
- [13] Li, L. et al. (2003). *Journal of Crystal Growth*, 258, 268-271.
- [14] Shukla, G. & Khare, A. (2008). *Applied Surface Science*, 255, 2057-2062.
- [15] Suzuki, T. et al. (2002). *Thin Solid Films*, 407, 118-121.
- [16] Brundle, C. Richard, Evans, Jr., Charles A. & Wilson-Butterworth-Heinemann, Shaun. *Encyclopedia of Materials Characterization*.
- [17] Marco, D.A. et al. (1998). *J. Mater. Chem.*, 8, 1875-1880.
- [18] Polcar, T. et al. (2007). *Surface and Coatings Technology*, 201, 5228-5235.
- [19] Rigney, D.A. (2000). *Wear*, 245, 1.
- [20] Archard, J.F. (1953). *Journal of Applied Physics*, 24, 981-988.
- [21] Lee, J.H. et al. (2000). *Surface and Coatings Technology*, 133-134, 220-226.
- [22] Figueroa, U. et al. (2005). *Surface and Coatings Technology*, 200, 1768-1776.
- [23] Aldrich-Smith, G. et al. (2005). *Surface and Coating Technology*, 197, 336-344.

# Aplicación de las técnicas *Computer Aided Design*, *Fused Deposition Modeling* y *Precision Casting* para fabricación de exoprótesis

ALEJANDRO ECHAVARRÍA\*, ENRIQUE MONSALVE, JORGE RAMÍREZ, JAIME GIRALDO, ZORAIDA OSORIO

Grupo de Investigación en Rehabilitación Física (Giref), Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia.

\* aechave@udea.edu.co

Artículo recibido: 06/10/2008  
Evaluación: 07/10/2008  
Aprobado: 24/10/2008

## Resumen

En el presente artículo se ilustra la fabricación de una pieza para prótesis monocéntrica de rodilla empleando diseño asistido por computador (CAD), la técnica del prototipado rápido y la fundición de precisión a la cera perdida. Previo diseño de las piezas articulares de la prótesis usando *software* CAD, utilizamos el método de los elementos finitos (FEM) para simular los esfuerzos generados en la pieza en condiciones de marcha normal, garantizando que con las dimensiones dadas estos esfuerzos están dentro del rango de seguridad. Con los diseños en CAD y diseñando los alimentadores de la pieza, se simularon los procesos de solidificación y vaciado de proceso de fundición mediante los programas *Solidcast* y *Solidflow*. Luego se construyó un modelo en *Acrylonitril-Butadien-Stiren* (ABS) utilizando un equipo de prototipado rápido *Fused Deposition Modeling* (FDM). La pieza final fundida se vació en aleación Al-7Si por la técnica *Precision Casting* del modelo perdido. Se encontró que la insuflación de nitrógeno es el mejor método de desgasificación del aluminio, con temperatura del molde entre 100 y 150 °C y del metal fundido de 650 °C, dando como resultado una pieza libre de poros. Después de realizar pruebas mecánicas del material obtenido, se hizo una nueva fundición adicionando magnesio y someténdola a un tratamiento térmico, con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas del material.

**Palabras claves:** prototipado rápido, diseño asistido por computador (CAD), elementos finitos, fundición de precisión, prótesis monocéntrica de rodilla, aleación A356, aleación A357, tratamiento térmico, biomecánica.

## Abstract

The article illustrates the manufacture process for monocentric knee prosthesis using *Computer Aided Design* (CAD), *Fused Deposition Modeling* and *Precision Casting*. To assess the viability of a new knee prosthesis, first of all, design the pieces using CAD softwares, and then using the finite elements method (FEM), evaluate the stress levels in the piece in normal running conditions, this method shows if the stress levels are in the range of security. With the CAD designs, a model with ABS was built, using fast prototyping equipment; this model will be use in the casting was lost process, it's important to oversize the pieces to compensate contraction effects, and give values of over-machining thickness. The final piece was cast in an Al-7Si alloy (ASTM A356), the goal of this investigation is search and standardize a secure method allows make high quality prosthesis.

**Keywords:** rapid prototyping, computer aided design, finite elements, precision casting, knee monocentric prostheses, A356 alloy, A357 alloy, thermal treatment, biomechanics.

## INTRODUCCIÓN

En Colombia ocurre cada año un número importante de accidentes de tránsito y hechos de violencia, en especial los asociados a eventos con minas antipersonales (MAP), que lamentablemente generan una población representativa de niños, jóvenes y adultos en edad laboral activa amputados en alguna de sus extremidades inferiores. Estos dos fenómenos generan una población que, sumada a la de amputados por enfermedades, requiere dispositivos para su movilización, entre los cuales el más representativo es la prótesis externa o exoprótesis.

Se conoce como prótesis a los dispositivos mecánicos, electrónicos o electromecánicos que suplen la función de un miembro ausente, o parte de él. Pueden clasificarse en dos grandes tipos: endoprótesis y exoprótesis. Las primeras se implantan mediante cirugía, se anclan al hueso y sirven para sustituir una articulación que ha sido deteriorada por artrosis, artritis, traumatismo u otras enfermedades. Las exoprótesis, por otro lado, sirven para sustituir un miembro amputado.

En la actualidad, la industria y la investigación biomédica han progresado considerablemente, gracias al aumento de desarrollos tecnológicos, orientados a optimizar el proceso de diseño y manufactura de piezas utilizadas en medicina. Se desea presentar una metodología que se está usando ampliamente en la producción de prótesis, como el modelado por medio del método de prototipado rápido.

Esta es una técnica muy poderosa, ya que nos brinda una gran variedad de oportunidades a la hora de aprovechar metodologías de diseño como la ingeniería inversa y generación de piezas, entre otras, para crear nuevos productos que se acomoden a las necesidades de la sociedad actual.

Básicamente, las técnicas de prototipado rápido tienen como objetivo conseguir de manera rápida y exacta una réplica tridimensional de los diseños que se han generado mediante aplicaciones CAD en 3D.

Estos modelos físicos pueden ser únicamente estéticos y útiles en consecuencia para estudio de formas y estudio de la aceptación por el mercado potencial al que van dirigidos, o pueden cumplir con buena parte de los requerimientos mecánicos que tendría la pieza definitiva, ofreciendo en este caso la posibilidad de realizar pruebas funcionales e incluso de homologación antes de que existan los moldes preliminares.

La mayor o menor similitud que pudiera existir entre el modelo definitivo y el obtenido mediante las técnicas de prototipado rápido dependerá básicamente del sistema utilizado para su generación y de limitaciones dimensionales, de complejidad y de posprocesos aplicados.

Las ventajas que ofrece la utilización sistemática de esta tecnología dentro del proceso global del lanzamiento de un nuevo producto abarcan a casi todos los departamentos que, directa o indirectamente, están involucrados en él.

Adicional al proceso de diseño con herramientas CAD y modelado por medio de prototipado rápido, se usó el método de fundición de precisión al molde perdido, mediante el cual se optimizó el material que se va a emplear en la manufactura final del conjunto articular, implementando técnicas de fundición como adición de elementos que mejoren el tamaño y límite de grano, y sometimiento a tratamientos térmicos que aumentan las propiedades mecánicas del material.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se construyó un modelo en *Acrilonitril-Butadien-Stiren* (ABS), utilizando la técnica de *Fused Deposition Modeling* (FDM) a partir de un diseño CAD de prótesis monocéntrica de rodilla para amputados transfemorales, usando el *software Solid-Edge* (figura 1). Con este diseño se realizó un análisis de las fuerzas que actúan en la pieza y la distribución de esfuerzos que se producen en condiciones de marcha normal por medio de la técnica de elementos finitos utilizando el *software Algor*. Esto se tradujo en una pieza geoméricamente modificada, estéticamente mejorada y que representa un menor desgaste energético por parte del usuario, debido a la disminución de peso obtenida después de hacer una reducción en el peso del conjunto articular.

Se utilizaron los programas *Solidcast* y *Solidflow* para simular los procesos de vaciado, flujo del metal fundido y solidificación de la pieza diseñada. Se realizó un proceso de iteración usando varias dimensiones de alimentador (como altura y diámetro) y diferentes condiciones de vaciado (temperatura del molde y del metal fundido).

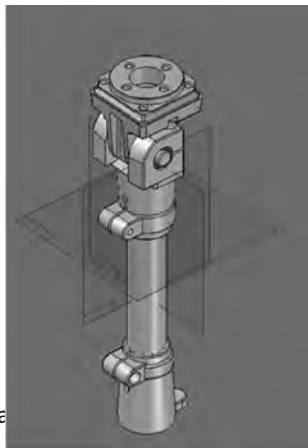


Figura 1. Pieza modelada en Solid-Edge.

La pieza final fundida se vació en una aleación Al-7Si por la técnica del modelo perdido, utilizando una combinación de cáscara cerámica y molde grueso. Finalmente, se determinaron los valores de contracción netos para compararlos con los valores reportados por la bibliografía y tomarlos en cuenta en nuevas piezas fabricadas por este proceso.

Se obtuvo una primera pieza articular; luego se tomó el metal fundido restante y se vació en una lingotera con el fin de tornearse una probeta que cumpla con los estándares de la norma ASTM A 370 - 07a, la cual se llevó a ensayo mecánico en una máquina universal. Los resultados conseguidos sirvieron de referencia para realizar una nueva fundición, en la cual se implementó el dopaje con Mg y tratamiento térmico, lo cual mejoró la resistencia mecánica de la aleación de aluminio.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis mecánico de la pieza

Se realizó el análisis mecánico de la pieza empleando el *software* Algor.

Se encontró que la pieza soporta las solicitaciones aplicadas durante la marcha, tomando como referencia a un individuo de 90 kg, en el momento de apoyar el talón, en el cual la fuerza reactiva es de 2,2 veces el peso corporal [1], lo cual equivale a 1.940 N.

El máximo esfuerzo se localizó en el eje articular, mostrando un buen desempeño en cuanto a la absorción de esfuerzos en el rango elástico (figura 2).



Figura 2. Máximo local de concentración de esfuerzos en Algor.

### Rediseño de la pieza

Para efectuar el rediseño de la pieza utilizando herramientas CAD, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

#### Eliminación de agujeros

Dado que la pieza superior requería un acople con el *socket*, se tomó en cuenta que cuando el aluminio se contrae, los agujeros para la tornillería que unen las piezas no coinciden; se fundió como bloque y los agujeros para la tornillería se realizaron después de fundir.

#### Angostamiento del eje de flexoextensión

El eje de flexoextensión no se eliminó; se redujo su diámetro 3 mm, para rectificarlo después de fundir.

#### Extrusión de caras de maquinado

Ya que las superficies de piezas obtenidas por fundición no son muy regulares, las caras laterales de la articulación que se encuentran en fricción durante la marcha se maquinaron de modo que se disminuyan los efectos tribológicos. Para compensar el material retirado por maquinado en estas dos superficies, se adicionaron 2 mm más de material en cada cara.

#### Escalado para compensar la contracción del aluminio

Para los diseños en CAD se debe considerar la contracción del material de fundición. Para tener en cuenta esta

contracción se realizó un escalado de las piezas de un 7% [2], contracción reportada por la bibliografía para el aluminio. Esto se hizo directamente desde *Solid-Edge*, realizando una copia de la pieza que se escala en un factor de 0,07.

#### Diseño del alimentador cimero

Los alimentadores son un volumen de material adicional a la pieza de interés que se va a fundir, los cuales sirven para que los rechupes y porosidades que se producen por el efecto de la contracción líquido-sólido del metal se formen en ellos y no en la pieza de interés, lo cual permite obtener piezas estructuralmente “sanas”, esto es, con un índice de integridad superior al 99%.

Ubicación del alimentador cimero en la pieza, según el criterio del método de los círculos

El alimentador cimero debe tener un tiempo de solidificación mayor que el de la pieza, permitiendo que a medida que el metal se solidifica en la pieza de interés, el metal aún líquido en el alimentador fluya hacia la pieza, evitando la aparición de espacios vacíos en la pieza. El método de los círculos consiste en realizar cortes coronales, sagitales u horizontales para encontrar cuál es el círculo con mayor diámetro inscrito en la pieza (buscando que estos círculos coincidan con esferas volumétricas contenidas *in situ*). El lugar donde se encuentre este círculo indica el espacio con mayor volumen [3]. Ya que la eficiencia en la transferencia de calor depende del área de contacto con el molde, la colada que se encuentre en esta zona será la que tenga mayor volumen y menor área de contacto con el molde, por lo cual será la última en solidificar; esto implica que el alimentador debe ubicarse cerca de esta zona, con el fin de suministrar metal fundido hasta el momento en que se solidifique todo el material.

#### Cálculo del volumen según el factor de forma

El volumen de la mazarota se calcula después de haber escalado la pieza, ya que los cálculos deben hacerse para el volumen del metal líquido. Se recurrió a las gráficas del *ASM Handbook* [4], donde se relaciona el volumen relativo del alimentador cimero (*riser/casting*) con el factor de forma de la pieza (*length+width/thickness*).

Según el factor de forma encontrado para la pieza ( $V/A = 4,5$ ), se encuentra que el volumen del alimentador debe ser del 70% del volumen total de la pieza. Para efectos prácticos, se sobredimensionó hasta un 75% del volumen de la pieza. Esto para conservar la integridad y evitar que el rechupe la alcance.

#### Diseño geométrico

Para hacer el diseño, se debe tener en cuenta que el volumen de éste (tomando como forma geométrica un cilindro) depende del diámetro y de la altura, para lo cual se trabajó con  $h = 1,5 D$  ( $h$ =altura,  $D$ =diámetro), para asegurar que el rechupe en la parte superior del alimentador esté alejado de la pieza, lo cual se garantiza siempre que  $h > D$  [5]. Para la relación descrita se obtienen  $h = 5,138$  cm y  $D = 3,42$  cm.

#### Sistema de colada

Ya que la geometría de la pieza que se va a vaciar no es compleja, se empleó la mazarota como conducto de vaciado.

#### Simulaciones en Flow-Cast y Solid-Cast

Para realizar la simulación de vaciado y solidificación de la fundición en *Flow-Cast* y *Solid-Cast*, es importante tener en cuenta lo siguiente:

- Material: tipo de aleación, temperatura inicial (temperatura óptima de vaciado), tiempo de vaciado.
- Molde: temperatura inicial (precalentado), coeficiente HT (para moldes metálicos), criterio de Niyama.
- Sistema de colada:
  - El molde debe estar lleno antes de la primera solidificación (tiempo de vaciado).
  - El flujo en el molde no debe ser turbulento (a mayor área, menor velocidad).
  - Llenado uniforme de la pieza (no es recomendado el vaciado por el alimentador, ya que éste debe ser lo último que se solidifique).

Para la primera simulación se utilizaron las siguientes variables:

- Material: aluminio
- Temperatura: 750 °C.

- Alimentador: volumen: 81 cm<sup>3</sup>, H=D=4,7 cm.
- Prioridad: pieza=1, alimentador=2 (la pieza y el alimentador se deben diseñar aparte).
- Malla=4.000.000 nodos.
- Temperatura de molde: 550 °C.

En los resultados obtenidos por la simulación se puede observar cómo la solidificación no es la esperada, puesto que no se da direccionalmente en sentido hacia el alimentador, y debido a la alta temperatura del molde, vemos cómo se solidifica más rápidamente el alimentador que está expuesto al ambiente, formando el rechupe en la pieza.

### Proceso de llenado

En la figura 3 se puede observar cómo se produce el llenado del molde y el cambio en la temperatura a través del tiempo en el conjunto pieza + alimentador. Las líneas negras que se observan en la figura son las líneas de flujo.

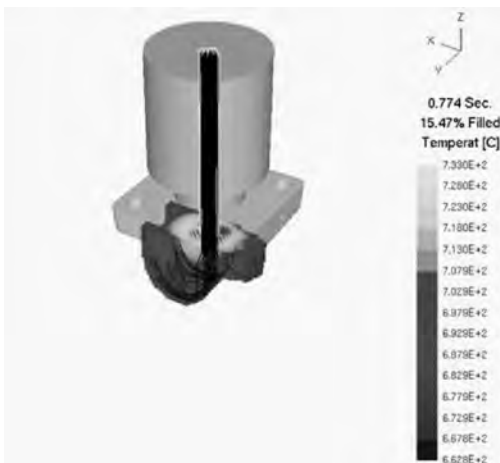


Figura 3. Nivel de llenado del molde a 0,774 s (15,47%).

### Proceso de solidificación

En la figura 4 se puede observar cómo se da la solidificación del conjunto pieza + alimentador.

Como se observa en cada una de las gráficas, el gradiente de temperatura se produce desde el centro de la pieza (el color azul es el metal líquido y el color gris es el metal en estado sólido), donde está más caliente el metal hacia las paredes que se encuentran en contacto

con el molde. Se obtuvo una solidificación radial en el interior de la pieza, lo cual predice la formación de defectos internos.



Figura 4. Solidificación para t=5,25 s.

La menor temperatura se presenta en la parte inferior de la pieza y la mayor temperatura en la parte superior, corroborando el comportamiento esperado por la técnica de los factores de forma para proveer la solidificación direccional, es decir, de abajo hacia arriba y de afuera hacia adentro, por lo que concluimos que el alimentador se encuentra en una buena posición y que debemos mejorar este proceso variando la temperatura.

### Iteración

Para corregir los defectos obtenidos en la primera fundición, se procedió a realizar una nueva simulación y fundición tomando en cuenta los siguientes parámetros:

- Temperatura: 650 °C.
- Alimentador: Volumen: 81 cm<sup>3</sup>, H=D=4,7 cm.
- Prioridad: Pieza = 1, alimentador = 2 (la pieza y el alimentador se deben diseñar aparte).
- Malla=4.000.000 de nodos.
- Temperatura de molde: 150 °C.

Con esto se obtuvo una solidificación direccional en sentido ascendente, desde la pieza hacia el alimentador. Este tipo de solidificación direccional hacia el alimentador garantiza que los defectos aparecerán en el alimentador y no en la pieza de interés.





**Figura 5.** Solidificación direccional.

**Conversión del archivo para prototipado rápido**

Para trabajar con la pieza diseñada se debe hacer una conversión del archivo de *Solid-Edge*, a un formato que sea reconocido por la máquina de prototipado rápido SST 1200. El archivo estándar del prototipado rápido es el .STL, el cual utiliza una malla de pequeños triángulos para definir la geometría del objeto. El número de triángulos lo puede definir el usuario o autodefinirlo el *software*, tomando en cuenta que para definir geometrías esféricas se debe emplear un mayor número de triángulos, lo que también se traduce en un mayor peso del archivo.

**Precision Casting, fabricación de la pieza**

En la fundición a la cera perdida, el modelo se fabrica en cera o plástico. En este caso se fabricó en ABS. Al modelo de ABS se adosó un alimentador de cera/parafina (50-50) a partir de un molde de silicona, con las dimensiones descritas en el diseño geométrico.

Luego, este modelo se lavó con jabón líquido neutro como surfactante y se recubrió con una primera capa de sílice coloidal (Ludox HS-20%)/cromita malla -325 con una viscosidad equivalente a un tiempo de vaciado en la Copa Ford No. 4 de 50 segundos [6]. Esta primera capa se arenó con zirconita malla 50/70. La segunda y la tercera capas se hicieron con una capa de menor viscosidad (20 segundos) y se arenaron con chamote malla 50/70. Se usó como respaldo un molde grueso con revestimiento KerrCast 2000.

El molde se desceró a 150 °C por dos horas y se calentó entre 850 - 900 °C por hora y media, luego de lo cual se dejó enfriar en el ambiente hasta alcanzar una temperatura entre 100 y 150 °C para su colado. El

aluminio fue vaciado en aleación Al-7Si (ASTM A356.0) en horno eléctrico de crisol, desgasificando con una pastilla de Degasser y posteriormente con nitrógeno UAP (99,999% de pureza) a 5 CFH (pies cúbicos por hora) por cinco minutos. El chequeo de la gasificación se hizo con la técnica de la presión reducida (1 torr) y el vaciado del metal se realizó a 750 °C inicialmente y luego a 650 °C.

En la figura 6 se observa un corte de la pieza final fundida, donde se muestra la sanidad estructural de las piezas vaciadas a 750 - 550 °C metal-molde y 650 - 150 °C metal-molde.



**Figura 6.** a) Pieza obtenida con defectos internos. b) Pieza obtenida sin defectos internos.

**Mejoramiento de las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio**

**Fundición 1.** Se fundió una aleación Al-2Si en horno eléctrico de crisol, en cantidad de 3 kg. El vaciado del metal se realizó a 700 °C en lingotera metálica.

**Composición química.** La aleación vaciada corresponde a un aluminio bajo silicio, del tipo Al-2Si, según se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1**  
Composición química de la aleación Al-2Si

Ai	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni
94,952	1,502	0,729	1,951	0,212	0,064	0,021	0,047
Zn	Ti	V	Pb	Sn	Ca	Zr	
0,472	0,015	0,003	0,024	0,003	0,000	0,005	

**Evaluación de las propiedades mecánicas.** Se utilizó la norma ASTM A 370-07 para ensayo de tracción. La probeta ensayada se muestra en la figura 7.

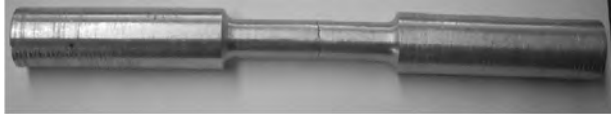


Figura 7. Probeta fallada en ensayo de tracción.

El análisis posterior a la prueba evidenció que la probeta no presentó encuellamiento, con fractura frágil y de aspecto plano, sin picos importantes que sobresalieran en su superficie; no hubo deformaciones hasta 12,5%. La dureza registrada por esta muestra es de 25 HB. Presentó los datos de 12,5 y 18,3 kgf/mm<sup>2</sup>.

**Microestructura**

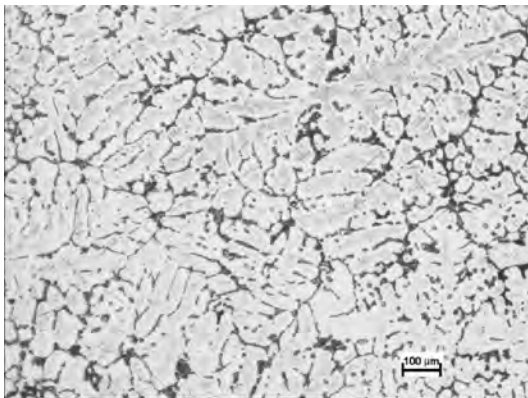


Figura 8. Metalografías de la aleación Al-2Si revelada con HF al 5%.

En la figura 8 se observan dendritas primarias de aluminio (blancas) con compuesto interdendrítico en una red continua de precipitados, a un zoom de 100X. Se encuentran también partículas ricas en hierro con gran presencia de porosidad, ubicados en las últimas zonas solidificadas.

Estos resultados concluyen que la aleación Al-2Si, por sus bajas propiedades mecánicas y deficiente sanidad estructural (poros con presencia de hierro), no cumple los requerimientos de diseño de la exoprótesis.

**Fundición 2.** Para mejorar las propiedades mecánicas, se propuso estudiar la aleación ASTM A357.0 [7]. Con este fin, se adicionan cantidades mayores de silicio (7%) y magnesio (0,6%). Adicionalmente, se efectúa un tratamiento térmico T6 (proceso de solución más envejecimiento). Estas aleaciones presentan la característica de retener en su matriz el magnesio (en forma de siliciuro de magnesio Mg<sub>2</sub>Si) después del tratamiento en la etapa de temple, el cual se encuentra disponible para la precipitación durante el proceso de envejecimiento.

Se fundió la aleación Al-Si-Mg en horno eléctrico de crisol. La aleación se desgasificó con nitrógeno UAP grado 5,0 (99,999% de pureza) a 5 cfh (pies cúbicos por hora) por cinco minutos. El grado de desgasificación se evaluó con la técnica de la presión reducida (1 torr). El vaciado del metal se realizó a 700 °C en lingotera metálica.

El proceso del tratamiento térmico T6 se observa en la figura 9.

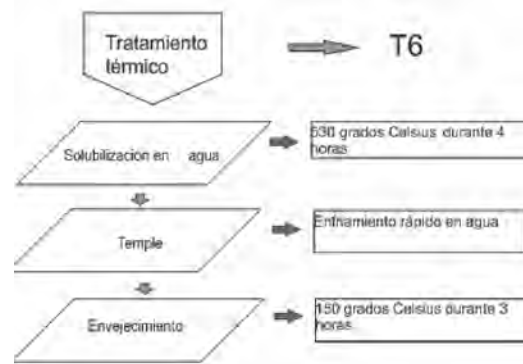


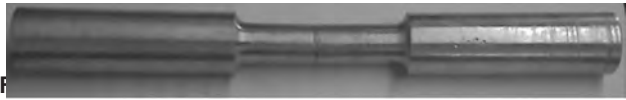
Figura 9. Proceso para realizar el tratamiento térmico T6.

**Composición química.** La segunda aleación vaciada corresponde a un ASTM A357.0 del tipo tipo Al-Si-Mg (tabla 2).

**Tabla 2**  
Composición química de la aleación Al-Si-Mg.

Ai	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni
92,871	6,098	0,201	0,089	0,017	0,662	0,010	0,023
Zn	Ti	V	Pb	Sn	Ca	Zr	
0,012	0,002	0	0,006	0,004	0,001	0,004	

**Evaluación de propiedades mecánicas.** Con las mismas especificaciones técnicas de la probeta anterior, se realizó una prueba de tracción a la nueva fundición.



ción Al-Si-Mg. No se observa cuello en el área de fractura.

Los datos obtenidos se muestran en la tabla 3, donde se comparan los dos materiales ensayados

**Tabla 3**

Propiedades mecánicas presentadas por los materiales Al-Si y Al-Si-Mg, al someterlas a prueba de tracción

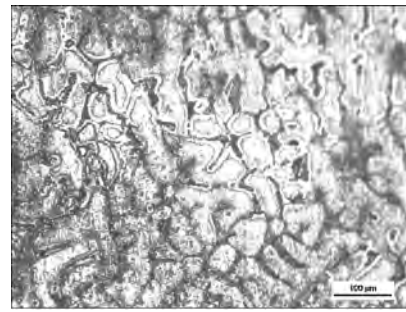
	Límite elástico (0,2%)(%fgf/mm <sup>2</sup> )	Fuerza máxima (kgf)	Resistencia a la rotura (kgf/mm <sup>2</sup> )	Resistencia máxima (kgf/mm <sup>2</sup> )
Al-Si	12,5	2170	18,1	18,3
Al-Si-Mg (con tratamiento térmico T6)	18,6	2810	23,3	23,3

Después de realizar el análisis de los resultados, se encontró que el aspecto de la fractura es de aspecto frágil y sin picos sobresalientes importantes. Registra un incremento considerable en los valores de límite elástico (cercano a 150%) y resistencia máxima (130%). La dureza se incrementó de 25 a 45 HB (180%), en comparación con la aleación Al-Si.

### Microestructura

Se observan dendritas primarias de aluminio (blancas), con compuesto interdendrítico del tipo Mg<sub>2</sub>Si y silicio metálico (gris plomo). No se observa porosidad en las regiones interdendríticas.

Estos resultados concluyen que la aleación Al-Si-Mg, por sus altas propiedades mecánicas y mejor sanidad estructural (sin poros de gasificación), cumple los requerimientos de diseño de la exoprótesis.



**Figura 11.** Metalografías de la aleación Al-Si-Mg revelada con HF al 5%.

### CONCLUSIONES

Por la técnica de prototipado rápido se pueden fabricar piezas de geometrías muy complejas, las cuales se generan desde cualquier *software* CAD.

Se demuestra que las piezas en ABS son una opción satisfactoria para realizar la técnica de fundición de precisión del modelo perdido.

Es importante hacer el escalado en CAD de la pieza para tener en cuenta la contracción del material y los sobreespesores de maquinado, y además, proveer un buen diseño alimentación y vaciado. En este caso, por la geometría simple de la pieza, se usaron las técnicas de los círculos inscritos y el método naval. Mediante la simulación con *Solidcast* y *Solidflow* se mostró que la mazarota, como sistema de colada, no genera flujos turbulentos y produce una pieza estructuralmente sana.

Se demuestra que los programas de simulación constituyen una buena base de partida para la producción de piezas resistentes mecánicamente y estructuralmente sanas. Con ello se economiza material, se evita que las piezas salgan deficientes y se ayuda a optimizar tiempo, material y costos a la hora de llevar un diseño de una pieza a su proceso de manufactura.

Se comprobó que la adición de Mg en las aleaciones de aluminio y el tratamiento térmico realizado aumentan las propiedades mecánicas de la aleación, observándose un aumento especialmente en la resistencia a la tracción y el límite elástico.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Andrés Torres, de la Escuela de Ingeniería de Antioquia, por su colaboración en las piezas de prototipado rápido.

### Agradecimientos

A Ricardo Aristizábal, del Taller de Fundición de la Universidad de Antioquia, por su asesoría con los programas de solidificación y vaciado.

A Luis Fernando Rueda, del Centro Metalmecánico del Sena, por su apoyo en la caracterización del material.

### REFERENCIAS

- [1] Nordin, Margareta & Frankel, Viktor. Biomecánica básica del sistema músculo-esquelético. *Biomecánica de la marcha*, 3ª ed.
- [2-5] American Society for Metals (1988). *ASM Handbook, Casting*, Vol. 15.
- [6] Echavarría, A. (1990). *Fundición de precisión a la cera perdida*. Universidad de Antioquia, Ceset.
- [7] American Society for Metals (1988). *ASM Handbook, Casting*, Vol. 15.

