UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

(87)

ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE LAS ESPUMAS DE URETANO DE ALTA RESILIENCIA Y LAS CONVENCIONALES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A

VICTOR AGUILAR LOYOLA

10

MEXICO, D. F. 1976

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CLAS. Tesis
ADQ. 1976
FECHA
PROC. MIC 173

JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE SEGUN EL TEMA:

PRESIDENTE:	PROF. JULIO TERAN ZAVALETA
VOCAL:	PROF. ANTONIO REYES CHUMACERO
SECRETARIO:	PROF. FERNANDO ITURBE HERMANN
1er. SUPLENTE:	PROF. JOSE MARIA GARCIA SAIZ
2do SUPLENTE:	PROFRA. MARGARITA GONZALEZ TERAN

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA

COMPAÑIA INDUSTRIAL EL PALMAR S. A.

SUSTENTANTE

VICTOR AGUILAR LOYOLA

ASESOR DEL TEMA

QUIM. JULIO TERAN ZAVALETA

Dedico ésta tesis con cariño y gratitud a las dos personas que más han influido en mi vida, y a quienes debo todo lo que soy: A mi madre Sra. Leonor Loyola de Aguilar, y a mi hijo Víctor Hugo Aguilar Batista.

INDICE

INTRODUCCION pág. 1

1.1 Objetivos de la tesis 1

1.2 Descripción del trabajo 2

1.3 Generalidades 3

1.4 Secuencia histórica 4

1.5 Aplicaciones 5

1.6 Aparición de las espumas de alta resiliencia 8

QUIMICA BASICA DE LOS POLIURETANOS 11

2.1 Materias primas 11

2.2 Reacciones básicas en la formación de un poliuretano 25

2.3 Catálisis de las reacciones de poliuretano 31

2.4 Obtención de los principales materiales que se usan en la fabricación de espumas de poliuretano: Poliol y TDI 38

DIFERENCIAS EN PROCESOS, FORMULACIONES Y CARACTERISTICAS 51

3.1 Espumas tradicionales 51

3.2 Espumas de alta resiliencia 74

ANALISIS COMPARATIVO DE COSTOS DE PRODUCCION ENTRE LAS ESPUMAS TRADICIONALES MOLDEADAS Y LAS DE ALTA RESILIENCIA 101

4.1 Analisis comparativo de costos de materias primas 101

4.2 Analisis comparativo de costos de operación 103

4.3 Conclusiones 109

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1 OBJETIVOS DE LA TESIS

Esta tesis tiene dos objetivos principales: El primero, demostrar mediante una comparación técnico-económica las ventajas en ambos terrenos de la espuma de alta resiliencia sobre la espuma convencional curada en caliente, específicamente como acojinamiento para la industria automotriz y en segundo lugar hacer una recopilacion informativa sobre los fundamentos químicos y las técnicas básicas de producción de las espumas flexibles de uretano con especial enfasis en las moldeadas.

El trabajo por lo tanto está dirigido hacia dos tipos de lectores básicamente; al industrial fabricante de espuma que duda en introducirse a la producción de espuma de alta resiliencia por temor a una respuesta negativa del mercado en vista de que el producto representa una mayor inversión inicial comparado con los materiales de acojinamiento actualmente en uso, y a los industriales automotrices que no utilizan el producto por no estar plenamente convencidos de su bondad técnica y de su economía.

En concreto, si esta tesis puede contribuir en algo a romper el círculo vicioso que se ha establecido entre los fabricantes potenciales y los consumidores potenciales de espuma de alta resiliencia: "No produzco porque no me la piden; no la pido porque no la producen" habrá cumplido su propósito.

Lateralmente se dirige la tesis a quien tenga interés en conocer o recordar los principios en que está basada la fabricación de espumas flexibles de uretano.

1.2 DESCRIPCION DEL TRABAJO

El trabajo consiste básicamente en tres etapas, que a continuación se resumen brevemente:

En la primera, que es la mas corta, se hace un poco de historia acerca del desarrollo y crecimiento de la industria de los poliuretanos explicando principalmente los factores que condujeron a la aparicion de las espumas de alta resiliencia.

En la segunda etapa que es la mas extensa, se tratan dos aspectos que aunque están íntimamente relacionados difieren en contenido; en el capítulo II se ven los principios químicos en que están basados los sistemas de fabricación de poliuretanos, con especial énfasis en las reacciones químicas que juegan un papel primordial en dichos sistemas; y en el capitulo III, se ven las técnicas específicas de fabricación y control de calidad de las espumas; es decir la aplicación práctica de los principios enunciados en el capítulo II. En ésta parte en la que de hecho se describe la tecnología de las espumas flexibles, se realiza la comparación a nivel técnico entre las espumas de alta resiliencia y las convencionales.

Por último, en la etapa final, muy breve también se hace una comparación de los costos de producción de las espumas de alta resiliencia y las convencionales, tomando como base de la comparación dos lineas de producción de capacidad equivalente.

1.3 GENERALIDADES

Una de las ramas de la industria de los plásticos que mayor auge tecnologico ha tenido en los últimos tiempos es la de las espumas de poliuretano, que han venido desplazando paulatinamente del mercado mundial, por razones de precio y comfort a materiales que tradicionalmente han sido usados como acojinamientos, aislantes térmicos y acústicos, materiales de construcción, etc. Es en verdad enorme el número de aplicaciones actuales y potenciales, que las espumas de poliuretano tienen, debido a su gran versatilidad y a sus magnificas características, además, siendo la tecnología de los poliuretanos relativamente nueva, se encuentra en una etapa de pleno desarrollo, por lo que continuamente se ponen en práctica nuevos procesos y se instalan nuevos equipos que bajan los costos de producción, haciendo a las espumas de poliuretano cada vez mas competitivas con los pocos materiales que aún las aventajan en precio en algunas aplicaciones.

Las espumas de poliuretano se pueden definir en forma general como un producto celular expandido, formado por la interacción de compuestos polihidroxilados, agua e isocianatos. Posteriormente veremos que a pesar de que los poliuretanos se pueden definir en una forma tan completa y sencilla, su química y tecnología son en verdad complicadas.

En la actualidad, las espumas de poliuretano pueden hacerse dependiendo del proceso y las materias primas, flexibles, semirigidas o rigidas, pueden tener densidades muy distintas y prácticamente se les puede dar la dureza que se desee. Asimismo se pueden controlar propiedades tales como la resistencia a la tensión o al desgarre, y además se pueden elaborar espumas que son prácticamente indeformables aún después de un uso prolongado,

sin embargo, todo ésto ha sido el fruto de una larga serie de investigaciones y trabajos realizados por las principales compañías productoras de poliuretanos asi como de sus proveedores quienes manufacturan las materias primas de la industria.

1.4 SECUENCIA HISTORICA

Estas investigaciones tendientes a aplicar en forma comercial las espumas de poliuretano, las inició el profesor Otto Bayer en Alemania durante el año de 1937, pero sin embargo, la historia de los poliuretanos data del año 1849 cuando Wurtz sintetizó isocianatos alifáticos y estudió sus reacciones con alcoholes y aminas; éstas reacciones son hoy en día de verdadera importancia comercial. En los años siguientes, éstas y otras reacciones fueron investigadas intensamente y muchos otros isocianatos fueron sintetizados. El descubrimiento del profesor Bayer produjo materiales con propiedades que los hacían de inetés en los plásticos y fibras, especialmente como sustitutos de cuerdas y cerdas de cepillos. Estos primeros poliuretanos fueron lanzados al mercado bajo la marca de fábrica Igamid U para el plástico y Perlón U para las fibras.

Posteriormente, durante la segunda guerra mundial, cuando las resinas y fibras naturales estaban escasas en Alemania se amplió la investigación en el campo de los poliuretanos, pero los logros de éstos trabajos no fueron reconocidos por los Estados Unidos sinó hasta que los informes científicos alemanes estuvieron disponibles después de la guerra.

En el año de 1952 fueron introducidos en los Estados Unidos sistemas para la elaboración de espumas flexibles basados en poliésteres, que producían en la espuma características de alta dureza y baja densidad, sin embargo, éstas espumas, aunque eran a-

propiadas y económicas para algunas aplicaciones, eran demasiado costosas para otras, por lo que la investigación, ésta vez en los Estados Unidos, se orientó hacia la búsqueda de materias primas más económicas. En 1957 se empezaron a producir espumas de poliuretano derivadas de poliéteres, los cuales son a su vez compuestos derivados del óxido de propileno y de etileno. Las espumas poliéter fabricadas por el proceso de prepolímero, ofrecían características mejoradas de acojinamiento y otras ventajas técnicas y económicas que prácticamente eliminaron el uso de las espumas plexibles de poliéster en casi todas sus aplicaciones.

Finalmente, en el año de 1958, se dió un paso fundamental en la tecnología de los poliuretanos, cuando se empezó a utilizar en Estados Unidos el proceso de fabricación de espuma poliéter en un solo paso, usando catalizadores orgánicos de estaño y polisiloxanos como agentes estabilizadores. Esto último abrió las puertas a una corriente de mejoras tecnologicas que hicieron posible para los fabricantes de espumas, desarrollar una serie de poliéteres polifuncionales con los cuales pueden fabricarse productos moldeados o al corte que cubran especificaciones predeterminadas.

1.5 APLICACIONES

Las espumas de poliuretano surgieron como un sustituto de la espuma de látex y de algunos otros materiales naturales que se empleaban como acojinamientos (borra, algodón, guata, cerdas, resortes etc.). Es indudable que la espuma de látex es un material excelente para aplicaciones de acojinamiento pero tiene ciertas características que la obligaron a perder terreno ante los poliuretanos. En primer lugar el precio del látex, como el de la mayoría de las materias primas naturales fluctúa demasiado en lapsos muy cortos, mientras que los precios de las materias

primas sintéticas son mas estables en forma general. La segunda desventaja importante de la espuma de látex con respecto a los poliuretanos es la densidad, ya que generalmente ésta es mayor de 80 kg/m^3 en el caso de la espuma de látex, mientras que en los poliuretanos puede ser de 14 a 35 kg/m^3 en las espumas tradicionales y de 30 a 60 kg/m^3 en las de alta resiliencia. Esto desde luego afecta considerablemente los precios, ya que las mismas características de indentación o capacidad de carga que se logran con una espuma de látex de 85 kg/m^3 se puede lograr con una espuma de poliuretano de 17 kg/m^3 que tiene 5 veces menos material por unidad de volumen. Es indudable que el resto de las características, resistencia a la tensión, al desgarre, y a la deformación, son muy superiores en la espuma de látex, pero a final de cuentas el mercado se inclina mas por el precio que por otros factores de calidad.

La causa de la enorme diferencia en densidades de ambos materiales estriba en los procesos de fabricación. Mientras que la espuma de látex se espuma mecánicamente el poliuretano se expande químicamente por reacción entre el isocianato y el agua pudiéndose controlar en el segundo caso el espesor de las paredes de las celdas por medio de la concentración de agua en la reaccion.

Es natural que si las espumas de poliuretano surgieron como sustituto de las espumas de látex, sus primeras aplicaciones hayan sido en la industria de los acojinamientos, especialmente en muebles. Durante la primera etapa comercial de las espumas de poliuretano, la densidad y la indentacion eran las características mas importantes y apreciadas por el mercado mientras que otras caracteristicas no eran consideradas muy importantes ni existian especificaciones, sin embargo, cuando la industria au-

tomotriz comenzó a hacer uso de las espumas de poliuretano como acojinamientos, surgieron las primeras especificaciones para las características secundarias, lo que dió por resultado a su vez una gran proliferación de distintas variedades de materias primas, especialmente polioles que satisfacieron las nuevas especificaciones. El ingreso al mercado automotriz y del transporte también provocó una división bien definida en cuanto a los procesos de fabricación de espumas, es decir, se empezaron a instalar las primeras lineas de producción de poliuretanos moldeados que a diferencia de los producidos en blocks, no tienen que ser cortados y acabados posteriormente. El mercado automotriz, dadas las formas y diseños de sus piezas propició que las espumas moldeadas tuvieran un gran impulso, y las hizo costeables, ya que la gran desventaja de la espuma moldeada es el mayor costo del equipo y además la producción en peso a igualdad de tiempos de fabricación es mucho menor. Estos factores habían impedido antes el nacimiento de una verdadera tecnología para las espumas moldeadas, pero una vez que se inició progresó notablemente. En poco tiempo la industria automotriz empezó a usar más y más espumas de poliuretano, desde un promedio de 4 kg por automóvil que fué el consumo inicial hasta 20 kg por automóvil que es el promedio actual para coches fabricados en los Estados Unidos.

No toda la espuma que se usa en los automóviles es flexible, sinó que la tecnología de los uretanos hizo que se desarrollara una serie de productos con muy diferentes características aprovechables en el interior de los autos. Se desarrollaron por ejemplo, espumas rígidas para los tableros, espumas con piel integral que evitan el forrado de las piezas con plásticos vinílicos o telas, espumas semi-rígidas que se usan como relleno de adita-

mentos de seguridad, en la actualidad se empieza a usar una espuma rígida de alta dureza, capaz de soportar un golpe a una velocidad de 30 km/hora sin sufrir deformaciones, para la elaboración de defensas de automóvil. Todas estas variedades de espuma y otras más que se investigaron y se pusieron en práctica con el afán de satisfacer las demandas del mercado automotriz, pronto encontraron otros mercados dadas sus magníficas características. Las espumas rígidas con buena estabilidad dimensional se empezaron a usar en la industria de la construcción como paneles, plafones, divisiones de oficinas etc. ya sea solas o combinadas con otros materiales como lámina, papel, yeso, madera etc.. En la industria mueblera fueron muy aceptadas para la fabricación de conchas o corazones de sillones de oficina. En la industria del vestido se usan espumas flexibles "laminadas a la flama" que se pegan por fusión a las telas para darles cuerpo; por último algunas espumas rígidas encuentran aplicación en la fabricación de suelas y plataformas para zapatos. Por otro lado la tecnologia de los elastómeros y microcelulares es un capitulo aparte tan extenso o más que el de las espumas de poliuretano. Es decir, la expansión de la industria de los poliuretanos es un hecho y es casi seguro que seguirá siendo una de las más rápidas y seguras dentro de los plásticos.

1.6 APARICION DE LAS ESPUMAS DE ALTA RESILIENCIA

A pesar de todo lo explicado anteriormente, las espumas de poliuretano seguían siendo combinadas con otros materiales en la fabricación de asientos automotrices, especialmente con resortes y yute hasta hace muy poco tiempo. Sin embargo, desde hace tres o cuatro años, las principales firmas productoras de automóviles en los Estados Unidos, empezaron a introducir en sus autos asien-

tos con un contenido de espuma mucho mayor que sustituyen por completo a los resortes y otros materiales, éstos asientos y respaldos además proporcionan una sensación de confort mayor a la de otros tipos de asientos por lo que fueron ampliamente aceptados en la industria automotriz.

Estos asientos y respaldos pueden ser hechos con espumas tradicionales de alta densidad, o bién, la modalidad que fué mas aceptada, pueden ser elaborados con espumas de alta resiliencia moldeadas preferentemente. Es dificil definir si las espumas de alta resiliencia aparecieron por la necesidad de satisfacer la demanda de asientos automotrices integrales, o si estos aparecieron como resultado de la disponibilidad de las espumas de alta resiliencia, pero el hecho es que se complementan perfectamente. Las espumas de alta resiliencia han sido también llamadas espumas curadas en frio, pero esto ha fomentado una serie de confusiones, ya que las espumas de alta resiliencia pueden ser curadas en frío, pero no necesariamente, de hecho existen muchas plantas en el mundo que fabrican sus espumas de alta resiliencia curandolas en caliente, inclusive a temperaturas superiores a las de los hornos de curado tradicionales para las espumas normales.

Las primeras investigaciones en América sobre las espumas de poliuretano de alta resiliencia, las inició la compañia Union Carbide en 1968 en su laboratorio de polímeros; en poco menos de un año fueron desarrollados varios compuestos completamente nuevos, como los polioles llamados "graft" o poliméricos que imparten caracteristicas muy especiales a las espumas, tambien se desarrollaron otros polioles, que aunque no son poliméricos tambien son especiales y permiten que la espuma sea curada con su propia generación de calor; además se introdujo una serie de estabilizadores especiales de muy buenas propiedades, y en cuanto a cata-

lizadores se desarrollaron sistemas catalíticos basados en una combinación de aminas, secundarias y terciarias y compuestos orgánicos de estaño, específicamente se introdujo el dibutil-dilaurato de estaño en lugar del octoato de estaño ya que el primero ofrecía un mejor control de la reacción. Todos éstos compuestos y las formulaciones basadas en ellos, conquistaron en menos de un año gran parte del mercado automotriz americano. Esta rápida conversión provocó también una serie de modificaciones al equipo necesario para la producción de éstas espumas; modificaciones que fueron desde el diseño y la instalación de nuevas bombas capaces de trabajar con polioles de mayor viscosidad hasta la instalación de lineas de producción completamente automatizadas controladas por computadora que evitan variaciones en la temperatura, gastos y presiones de los componentes, abren y cierran los moldes automáticamente y llevan una velocidad superior a 6 m/min, lo que permite producciones hasta de 8000 piezas por día y permite también una gran normalización en las operaciones y en las formulaciones.

En la actualidad, las espumas de alta resiliencia empiezan a conquistar también el mercado mueblero, sobre todo en Europa. Por otro lado, tanto en América como en Europa la aparición de las espumas de alta resiliencia ha acelerado la desaparición de las espumas de látex ya que sus características no son muy diferentes y en cuanto a precio lleva ventaja la espuma de uretano.

CAPITULO II

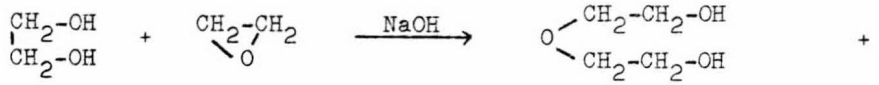
QUIMICA BASICA DE LOS POLIURETANOS

2.1 MATERIAS PRIMAS

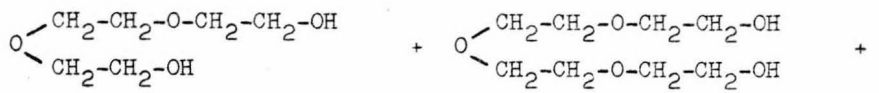
En éste capítulo trataremos de enumerar las reacciones mas importantes que se llevan a cabo en un sistema de preparación de poliuretanos, empezando por una ligera explicación acerca de las principales materias primas que se usan en la elaboración de espumas de poliuretano.

2.1a) POLIOLES O POLIETERES

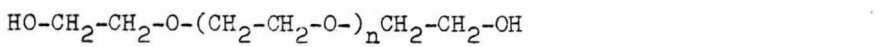
Los polioles son resinas polihidroxiladas que se obtienen generalmente por adición de óxido de propileno o de etileno a alcoholes polihídricos formando aductos cuya funcionalidad puede variar desde 3 cuando se emplea glicerina como base, hasta 8 si se usa sacarosa. Existen también aductos de óxido de propileno con diaminas, triaminas y otras estructuras orgánicas. Para la obtención de características de retardancia a la flama, se han desarrollado polioles que contienen ya sea fósforo, halógenos o combinaciones entre ellos. La razón por la cual existen tantos tipos de polioles, es que el poliol determina en una formulación bien balanceada 4 de las características finales de la espuma y el 80 % de una quinta, como son la resistencia a la tensión, la resistencia al desgarre, la elongación y la resiliencia así como una gran parte de las características finales de indentación o capacidad de carga. Además en lo que se refiere a espumas rígidas, el tipo de poliol determina una característica muy importante, la estabilidad dimensional o sea la indeformabilidad de la espuma. Una reacción típica para la obtención de un poliol es la que se ilustra a continuación:



Etilén glicol — Oxido de etileno — Dietilen glicol



Trietilenglicol — Tetraetilenglicol



Polietilenglicol

Con objeto de ilustrar las características típicas de algunos polioles comerciales se presenta la siguiente tabla:

TABLA # 1

i) Polioles convencionales basados en glicerina y óxido de propileno, para la producción de espumas flexibles.

No. de hidroxilos promedio	58.0
Agua % máximo	0.04
Fósforo % en peso	0.0
Número ácido	0.5
Viscosidad a 25 °C	515 Cps
Color, Gardner	4
Peso específico 25 °C	1.08
Peso molecular promedio	3000

ii) Polioles poliméricos basados en acrilo nitrilo, usados en la elaboración de espumas flexibles de alta resiliencia.

No. de hidroxilos promedio	28.0
Agua % máximo	0.05
Fósforo % peso	0.0
pH aparente	8.2
Viscosidad a 25 °C	2800 Cps

Peso especifico a 25 °C	1.03
Peso molecular promedio	3500

iii) Polioles basados en fósforo, que se usan mezclados con otros polioles para impartir características de auto extinción a la flama, tanto en espumas flexibles como rígidas.

No. de hidroxilos promedio	410.0
Agua % máximo	0.1
Fósforo % peso	5.6
Número ácido	0.5
Viscosidad a 25 °C	1600 Cps
Color Gardner	6
Peso específico a 25 °C	1.148
Peso molecular promedio	800

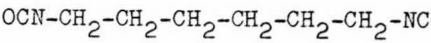
iv) Polioles basados en pentaeritritol, usados en la elaboración de espumas rígidas con buenas características de estabilidad dimensional.

No. de hidroxilos promedio	560
Agua % máximo	0.1
Fósforo % peso	0.0
Número ácido	25
Viscosidad a 25 °C	2500 Cps
Color Gardner	12
Peso específico a 25 °C	1.18
Peso molecular promedio	400

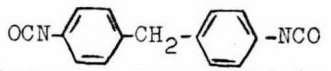
2.1b) ISOCIANATOS

Existe una gran variedad de isocianatos orgánicos que teóricamente son capaces de dar productos de poliuretano al reaccionar con alcoholes o ésteres, sin embargo, los isocianatos comunmente usados en la manufactura de poliuretanos son unos cuan-

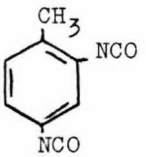
tos, los mas importantes son: El hexametilén di-isocianato (HDI), el difenil metano 4, 4' di-isocianato (MDI) y el toluen di-isocianato (TDI)



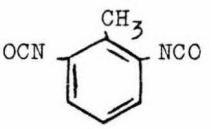
Hexa-metilén di-isocianato (HDI)



Difenil metano 4, 4' di-isocianato (MDI)



Isómero 2, 4



Isómero 2, 6

Toluén di-isocianato (TDI)

El hexametilén di-isocianato (HDI) fué uno de los primeros isocianatos usados para hacer poliuretanos, pero ahora se emplea solo en forma limitada en aplicaciones especiales, ya que tiene la ventaja sobre los isocianatos aromáticos de que los productos que se hacen con él no se decolcran con la luz y el aire.

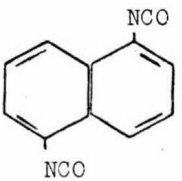
El toluén di-isocianato es el que se utiliza en mayores cantidades (aproximadamente se consumen 200 000 toneladas anuales en el mundo) principalmente en espumas flexibles. El TDI casi siempre se usa en forma de una mezcla de isómeros, el 2, 4 y el 2, 6 en una proporción de 80 % y 20 % en peso, pero en algunos casos también se emplea la relación de isómeros 65/35 para aplicaciones especiales. Una variedad de TDI crudo que contiene subproductos de fosgenación también se usa en la producción de espumas rígidas.

El difenil metano 4, 4' di-isocianato (MDI) se usa normal-

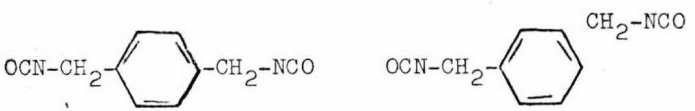
mente mezclado con un 10 % de su isómero 2, 4 en la manufactura de elastómeros, sin embargo la mayor cantidad de MDI consumido se usa en espumas rígidas en forma de una mezcla compleja con otros poli-isocianatos.

Además de éstos isocianatos bien conocidos, existen otros que aunque son usados en una escala mucho menor, también se emplean en ciertas ocasiones. Estos isocianatos son: El naftilén 1, 5 di-isocianato (NDI), el para y el meta xililen di-isocianato (XDI) y el diciclohexilmetano di-isocianato (PICM).

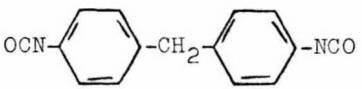
Las fórmulas químicas de éstos tres isocianatos se muestran a continuación:



Naftilén 1, 5 di-isocianato (NDI)



Para y meta xililén di-isocianatos (XDI)



Diciclo hexilmetano di-isocianato (PICM)

El naftilén 1, 5 di-isocianato se vende exclusivamente para hacer elastómeros, y los otros dos isocianatos han adquirido importancia comercial recientemente en el sector de los poliuretanos que no se decoloran, especialmente lacas y recubrimientos de uretano.

Todos éstos isocianatos se obtienen por la reacción de las correspondientes aminas con fosgeno.

En términos generales se puede decir, que los isocianatos armáticos son mas populares que los de cadena lineal debido a su mayor reactividad, tal como lo muestra la siguiente tabla que está basada en la reacción de varios isocianatos con el acetato de metilcelosolve a una temperatura constante:

TABLA # 2

Isocianato	Constantes de velocidad de reacción	
	k_1	k_2
Fenil isocianato	10.2	-
o-nitrofenil isocianato	42.4	-
Naftilén 1, 5 di-isocianato (NDI)	6.1	-
Difenil metano 4, 4' di-isocianato (MDI)	16.0	8.6
Toluén 2, 4 di-isocianato	42.5	1.6
Toluén 2, 6 di-isocianato	5.0	2.0
Diciclo hexilmetano di-isocianato (PICM)	0.3	-
Hexametilén di-isocianato (HDI)	0.2	-
p-xilén di-isocianato (XDI)	3.0	-

Esta tabla además muestra que el isocianato mas reactivo es el TDI 2, 4 (213 veces mas reactivo que el HDI). Es curioso notar que el o-nitrofenil isocianato es 4 veces mas reactivo que el fenil isocianato por la simple introducción de un grupo nitroso en posición orto, el cual activa la reactividad del grupo isocianato.

Una hoja de especificaciones de un TDI 80/20 comercial se muestra a continuación:

Especificaciones:	
Acidez total (como HCl)	0.002 - 0.004 %
Cloruros hidrolizables	0.005 - 0.008 %
Cloro total	0.20 % máximo
Relación de isómeros:	
Toluén di-isocianato 2, 4	80.0 ± 2 %
Toluén di-isocianato 2, 6	20.0 ± 2 %
Color APHA	15 máximo
Propiedades físicas	
Peso molecular	174.163
Estado físico	líquido claro incoloro
Color	agua claro
Olor	característico, penetrante
Higroscopicidad	reacciona con el agua con evolución de CO_2
Sensibilidad a la luz	la radiación UV causa amarillamiento
Punto de ebullición a 760 mm de Hg	251 °C
Punto de inflamación (Flash point) (C. O. C.)	132 °C
Calor latente de evaporación	144.9 BTU/Lb
Peso específico	1.22 ± 0.01
Densidad de vapor (aire=1)	6.0
Presión de vapor a 20 °C	0.01 mm de Hg
Viscosidad a 50 °C	1.45 Cps
Indice de refracción	1.566 ± 0.001
Calor específico	0.375 BTU/Lb°F

2.1c) AGENTES TENSOACTIVOS

Los agentes tensoactivos o surfactantes han sido tan importantes como los catalizadores de estaño en el desarrollo del proceso de un solo paso. Los surfactantes que se usan primordialmen-

te en la fabricación de espuma de poliuretano flexible son los copolímeros de polioxialquileno alquilsilicón. El propósito principal de la presencia de los surfactantes en una formulación es bajar la tensión superficial de la mezcla reaccionante y dar resiliencia a la pared de la celda. Las celdas elásticas evitan el colapso de la espuma durante su formación y continúan proporcionando estabilidad a la celda hasta que el proceso de polimerización esté lo suficientemente avanzado para que la espuma se sostenga por si sola. En forma general, se puede decir que si no se usa un surfactante siliconado, la espuma se colapsará.

Otro papel importante del surfactante es controlar el tamaño de la celda. El silicón estimula la formación de celdas finas y uniformes. Cada sistema de poliol tiene un nivel mínimo de silicón debajo del cual pueden producirse celdas grandes, desgarres y/o el colapso de la espuma. La cantidad normal de silicón que debe usarse en una formulación varía de 0.7 a 1.8 partes por cada 100 partes de poliol, de acuerdo con la cantidad de agua y agente soplante auxiliar que se use. Normalmente las espumas formadas con un poliol de peso molecular cercano a 3500, requieren mas silicón que un poliol de mayor peso molecular. La concentración del silicón no afecta las propiedades físicas de la espuma, siempre y cuando se mantengan los niveles de silicón dentro de los límites razonables.

La mayoría de los surfactantes son estables en agua o en una mezcla de agua y aminas, por lo que pueden ser usados aún después de varios días de preparados en esa forma.

Las propiedades físicas típicas de un silicón son:

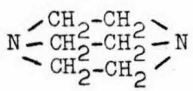
Estado	líquido
Viscosidad a 25 °C	1200 ctsk
Color Gardner	<1

Viscosidad en una solución acuosa (40 % de surfactante en agua a 25 °C)	30 Cps
Peso especifico a 25 °C	1.03

2.1d) CATALIZADORES

Los catalizadores mas comunmente usados para las reacciones de los isocianatos son catalizadores básicos, ya sea bases inorgánicas como el hidróxido o el acetato de sodio, o mas comunmente aminas terciarias y materiales que generan aminas terciarias. El efecto catalítico de éstos compuestos está en función de su basicidad, sin embargo en el caso de las aminas terciarias hay otro factor importante que es la accesibilidad del átomo de nitrógeno. El efecto de éste factor puede apreciarse en la siguiente tabla donde los primeros 4 casos demuestran como se reduce el poder catalítico al esconder el átomo de nitrógeno. El último renglón muestra a la trietiléndiamina en la que los átomos de nitrógeno están muy accesibles, con la consecuencia de que, a pesar de ser una base muy débil, la trietiléndiamina es un catalizador poderoso.

TABLA # 3

Catalizador	Poder básico PKa	Actividad relativa para una reacción de isocianato y alcohol.
$N(CH_3)_3$	9.9	2.2
$N\text{-}C_2H_5\text{-}(CH_3)_2$	10.2	1.6
$N\text{-}CH_3\text{-}(C_2H_5)_2$	10.4	1.0
$N\text{-}(C_2H_5)_3$	10.8	0.9
	8.2	3.3

Otros catalizadores para la reacción de isocianatos con átomos activos de hidrógeno son ciertos compuestos metálicos. Se ha sabido durante mucho tiempo que algunos compuestos metálicos orgánicos, tales como el acetil-acetonato de fierro, catalizan la reacción de los isocianatos con compuestos hidroxilados, pero no fué sinó hasta la década de los cincuentas que se descubrió la excepcional actividad de los compuestos de estaño. Entre dichos compuestos los mas notables son el dibutil-dilaurato de estaño y el octoato de estaño que son ahora los mas conocidos en la industria de los uretanos. Los compuestos organo estanosos no solo son catalizadores excepcionalmente activos para las reacciones de los isocianatos, sinó que además tienen 2 ventajas sobre los catalizadores básicos, son menos volátiles y por lo tanto permanecen en el sitio de la reacción aún a altas temperaturas y promueven las reacciones con los grupos hidroxilo del poliol en mayor proporción que con el agua, lo cual es una ventaja cuando ésta propiedad se usa concientemente. El efecto catalítico de varias aminas terciarias y un compuesto de estaño se muestra a continuación:

TABLA # 4

Reacciones catalizadas del fenil isocianato

Catalizador	Concentración del catalizador	Butanol	Agua	Difenilurea
Ninguno	--	1.0	1.1	2.2
N-metil morfolina	0.025 M	40.0	25.0	10.0
Trietil amina	0.025 M	86.0	47.0	4.0
N,N,N',N' tetra metil 1,3 diamino butano	0.025 M	260.0	100.0	12.0
Trietilen diamina	0.025 M	1200.0	380.0	90.0
Dibutil diacetato de estaño	0.00025 M	5600.0	980.0	120.0

Los materiales que se usan como catalizadores no solo son aceleradores para las reacciones sinó que se deben usar para incrementar selectivamente la velocidad de una reacción más que la de la otra. Acerca de ésto se puede decir que la volatilidad de una amina terciaria que es generalmente un fuerte catalizador puede no lograr un buen curado de la espuma porque se evapora antes de que se alcance la etapa de alta temperatura. En tales casos, un catalizador metálico no volátil como el octoato estanoso ofrece ventajas. La siguiente tabla muestra los resultados de éste efecto y la selectividad de los catalizadores. En la tabla aparecen las velocidades relativas de reacción del fenil isocianato con agua y n-butanol.

TABLA # 5

Catalizador	Velocidad con butanol / Velocidad con agua
Ninguno	0.9
N-metil morfolina	1.6
Trietil amina	1.8
N,N,N',N', tetrametil 1,3 diamino butano	2.6
Trietilen diamina	3.2
Dibutil diacetato de estaño	5.7

El dibutil diacetato de estaño no solo es un catalizador mas efectivo para la formación de uretano, urea y biuret que cualquiera de las aminas terciarias, sinó que además cataliza la reacción del isocianato con el alcohol mas que la reacción con el agua. El dabco (trietilen diamina) tiene un efecto similar en éste sistema. También es importante notar que mientras todas las aminas terciarias son agentes catalizadores para la polimerización del isocianato, lo cual es de suma importancia en la formación de un uretano, los compuestos de estaño no son buenos catalizadores pa-

ra ésta reacción.

2.1e) AGENTES SOPLANTES

Existen 2 tipos principales de agentes soplantes en una formulación de espuma de poliuretano; el natural y los auxiliares. El agente soplante es un compuesto que directa o indirectamente provoca que la mezcla reaccionante se levante o espume formando una estructura celular que posteriormente será definitiva. El agente soplante principal y en muchos casos el único que se utiliza es el agua. El agua tiene dos propósitos en una formulación: uno es producir bióxido de carbono que forma las celdas del producto y el otro consiste en darle dureza al producto por el mecanismo que se verá mas adelante, por lo tanto la concentración de agua en la formulación es un factor importante en la determinación de la densidad y la capacidad de carga de la espuma. En forma general se puede decir que a mayor cantidad de agua en la formulación, mas baja será la densidad de la espuma, aunque ésto tiene un límite, ya que una cantidad excesiva de agua puede causar que la espuma se incendie ya que la reacción entre el isocianato y el agua es sumamente exotérmica.

Se dice que el agua efectúa un soplado indirecto, ya que la elevación de la espuma no se debe a la expansión del agua al evaporarse, lo cual sería un soplado directo, sinó que reacciona con el isocianato formando CO_2 a alta temperatura que es el causante del levantamiento de la espuma. Por otro lado también se usan agentes soplantes directos que levantan la espuma por la expansión que sufren al evaporarse, éstos agentes son llamados auxiliares porque casi nunca se usan solos en una formulación sinó en combinación con el agua. Estos agentes que son fluorocarbonos o cloruro de metileno se usan con el propósito adicional de dar mayor

suavidad a la espuma y no solo para controlar la densidad. El agente soplante es introducido en la cabeza mezcladora junto con otros componentes, y es vaporizado por el calor producido durante la reacción. A medida que la concentración de éste agente soplante aumenta, la temperatura máxima en el pan será disminuida (cerca de 1 ^{o}C por parte de fluorocarbón o cloruro de metileno). Como resultado de ésto, la velocidad de reacción disminuirá, el tiempo de ascención será mas largo, y la espuma necesitará mayor tiempo para gelarse, por lo tanto, las formulaciones que contienen soplantes auxiliares son difíciles de procesar. Esto que al nivel del mar es un problema relativamente fácil de resolver, es a la altura de la Ciudad de México un problema muy grave que puede causar inclusive el colapso de la espuma. La razón es que siendo la reacción de formación de la espuma de por si fría a la altura de la ciudad de México, al enfriarse aún mas por la presencia de agentes soplantes auxiliares, se vuelve tan lenta y el tiempo de gelado tan largo que cualquier movimiento brusco en el transportador de la máquina productora causa que la espuma se colapse perdiéndose por completo la estructura celular y convirtiéndose en una masa amorfa y continua de una densidad 10 o 20 veces mayor a la pretendida. Por otro lado cuando se usan agentes soplantes auxiliares, la concentración del catalizador de estaño debera ser aumentado para asi mantener la estabilidad de la espuma. Por cada 10 partes de fluorocarbón que se usen, el catalizador de estaño habrá de aumentarse en 0.05 partes. En el caso de usar cloruro de metileno, habrá de aumentarse 0.1 partes del catalizador de estáño por cada 4 partes de cloruro de metileno. También es necesario aumentar las partes del silicón o surfactante a medida que se aumenten las partes del agente soplante en un 10 % por cada 2 partes de fluorocarbón.

También debe decirse que la mayoría de las propiedades físicas de la espuma son afectadas cuando se usan agentes soplantes auxiliares. Disminuyen la resistencia a la tensión, la elongación y la resistencia al desgarre, pero la propiedad que mas afectan es la deformación permanente debido a la baja temperatura de reacción. Por último puede decirse que la densidad disminuye a razón de 0.64 kg/m^3 por cada parte de fluorocarbón que se use en la formulación.

Además de los compuestos que se han descrito brevemente, los cuales son básicos en una formulación de espuma de poliuretano, existe toda una serie de compuestos adicionales que se usan con el objeto de impartir determinadas características a la espuma que se vá a producir. Desde luego, las espumas que se hacen con la adición de éstos compuestos, son espumas especiales que tienen usos específicos y su producción no es muy grande. Entre éstos productos podemos mencionar a los polioles derivados del pentaeritritol y de la sacarosa, que son polioles de alta funcionalidad y reactividad, por lo que se usan para mejorar la capacidad de carga de las espumas y acelerar las reacciones, combinados en una proporción del 2 al 6 % con polioles convencionales. Existen además algunos compuestos que tienen la finalidad específica de provocar uniones cruzadas que dan una mayor rigidez a la espuma y aumentan por lo tanto la capacidad de carga de la misma. Un ejemplo típico de éstos compuestos es la 4,4' metilén bis 2 cloroanilina. Otro tipo de compuestos muy usados son los retardantes a la flama que se emplean para elaborar espuma para colchones y otras aplicaciones especiales. Estos compuestos contienen fósforo y en ocasiones se añaden a la formulación como componentes adicionales aunque en otros casos vienen ya mezclados con el poliol.

También se pueden mencionar , por último, algunos isocianatos especiales como el TDI 65/35 que se usa con polioles cuyo rango de catalizador de estaño es muy estrecho debido a su alta reactividad.

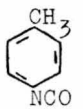
2.2 REACCIONES BASICAS EN LA FORMACION DE UN POLIURETANO

La química de los poliuretanos está basada en las reacciones de los isocianatos, las cuales pueden ser divididas en dos categorías: a) Las reacciones de los isocianatos con compuestos que tienen hidrógenos activos para dar productos de adición. b) La polimerización de los isocianatos.

2.2a) REACCIONES DE ADICION

i) La primera reacción de importancia es la que se produce entre el poliol y el isocianato para dar por resultado el polímero de uretano que forma la estructura celular de la espuma:

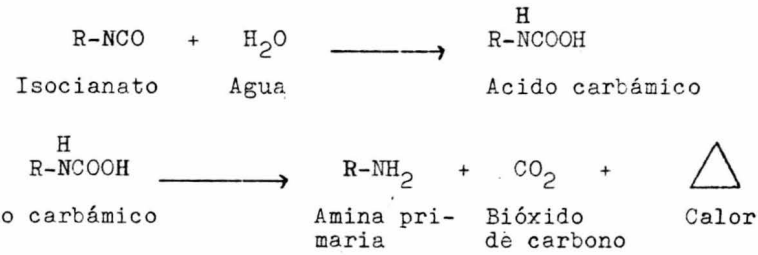
$$\underset{\text{Isocianato}}{R\text{-}NCO} + \underset{\text{Poliol}}{R'OH} \longrightarrow \underset{\text{Uretano}}{R\text{-}\overset{H}{N}COOR'}$$

Donde: R=  para el toluén di-isocianato

y R'= $-\underset{CH_3}{CH}-CH_2-O-(-CH_2-\underset{CH_3}{CH}-O-)_n-CH_2-\underset{CH_3}{CHOH}$ para un poliol lineal.

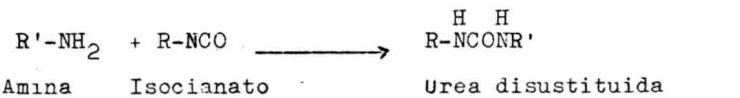
Como puede observarse tanto el isocianato como el poliol son difuncionales en éste caso, por lo que la reacción continúa por ambos lados de la molécula, dando lugar así al polímero de uretano. Esta reacción como la mayoría de las reacciones del sistema es exotérmica, aunque no genera tanto calor como la reacción siguiente:

ii) La segunda reacción es la que se obtiene entre el isocianato y el agua:



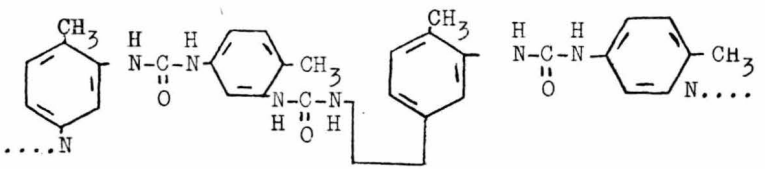
El contacto entre el isocianato y el agua a la temperatura inicial de los componentes produce un compuesto llamado ácido carbámico el cual en realidad casi no existe en ningún momento ya que se descompone de inmediato a temperaturas superiores a los 25 °C produciendo una amina primaria, bióxido de carbono y una gran cantidad de calor. Los otros derivados que se obtienen de ésta reaccion, son de una importancia vital en la formacion de la espuma: la amina que se obtiene, reaccionará después con mas isocianato para formar ureas de cadena larga que darán resistencia y capacidad de carga a la espuma; el bióxido de carbono es el agente soplante que efectúa el levantamiento de la espuma y por lo tanto es el factor que controla la densidad de la misma; y el calor que se genera en la reaccion aumenta la temperatura hasta los niveles necesarios para que todas las reacciones tengan una velocidad de reacción adecuada y permita un curado rápido de la espuma.

iii) La tercera reacción es una derivación de la segunda, y es la que se produce entre la amina obtenida en la segunda reacción y el isocianato.



En donde R y R' son iguales que en la reacción i).

Debido a la doble funcionalidad de los isocianatos las ureas que se obtienen son de una cadena muy larga, lo que produce una gran firmeza en la espuma. La estructura real de éstas ureas es así:



De ésta estructura se derivan sus caracteristicas de dureza y estabilidad dimensional.

iv) Las anteriores son las que podrían considerarse reacciones primarias en la formación de un poliuretano, sin embargo, además de éstas los isocianatos reaccionan de manera análoga con los grupos que contienen hidrógeno activo, los cuales están presentes en todos los productos de las reacciones primarias mencionadas.

La primera de las dos reacciones de adición secundarias, es la que se produce entre una molécula de poliuretano ya formada y el isocianato libre que esté presente aún, para dar paso a la formación de un compuesto llamado alofenato:

Isocianato Poliuretano Alofenato

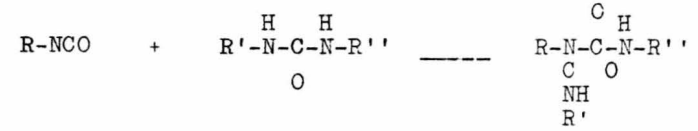
En donde R y R' son iguales que en la reacción i)

y R'' = $-\underset{CH_3}{CH}-CH_2-O-(-CH_2-\underset{CH_3}{CH}-O-)_n-CH_2-\underset{CH_3}{CH}-OH$ para un poliol lineal

Como puede observarse una molécula de éste compuesto puede

seguir reaccionando con mas moléculas de poliuretano, produciendo una verdadera red cristalina.

v) La otra reacción secundaria de importancia es la que se obtiene al poner en contacto una molecula de urea producida de acuerdo a la reaccion iii) y una molécula de isocianato libre, produciéndose el compuesto llamado biuret.



Isocianato Urea Biuret

En donde R, R' y R'' son iguales que en la reacción i).

Como puede verse la estructura del biuret es muy similar a la del alofenato, con la única diferencia de que mientras el alofenato tiene un radical correspondiente al poliol por cada 3 radicales, el biuret solo tiene radicales isocianato. Al igual que el alofenato, el biuret puede seguir reaccionando con las ureas formadas produciendo numerosas uniones cruzadas que dan firmeza a la espuma.

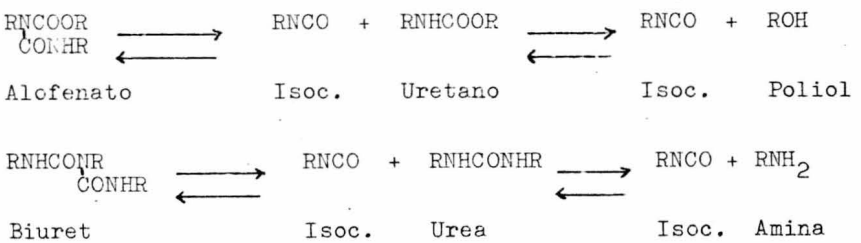
Estas dos últimas reacciones, ocurren sin embargo con mucha mayor dificultad que las reacciones primarias, pero su importancia no debe de ser subestimada, ya que la formación de alofenatos y biurets es la responsable de la presencia de la mayoría de las uniones cruzadas las cuales tienen un importante efecto en las propiedades de los poliuretanos. Estas dos reacciones normalmente no se realizan a temperaturas inferiores a los 150 °C, por lo cual es conveniente formular con la intención de que la temperatura promedio de las reacciones alcanze altas temperaturas si se desea obtener una espuma con bastante capacidad de carga.

Antes de pasar a las reacciones de polimerización de los

isocianatos es conveniente analizar la afinidad de los isocianatos hacia ciertos compuestos para realizar reacciones de adición, tal como se muestra a continuación en orden decreciente de afinidad: NH_2 alifática > NH_2 aromática > OH primarios > agua > OH secundarios > OH terciarios > OH fenólicos > COOH y RNHCONHR > RNHCOOR

Esta escala muestra que los compuestos mas reactivos con los isocianatos son las aminas primarias, con los compuestos hidroxilados y el agua despues, y finalmente los productos de las reacciones primarias tales como ureas y uretanos. Tal como puede observarse el último lugar en la escala corresponde a los uretanos ya formados por lo que se deriva que es mas fácilmente presentable la reacción para formar biurets que la reacción para formar alofenatos.

En cuanto a la estabilidad de los productos de reacciones de adición se puede añadir lo siguiente: Todas las reacciones de adición de los isocianatos, primarias y secundarias son reversibles, excluyendo desde luego la reacción con el agua que en realidad es una condensación mas que una adición. La estabilidad de los productos de reacción puede resumirse a continuación



Se puede asegurar que los productos de reacción de los isocianatos con las ureas y los uretanos, o sea los biurets y los alofenatos, se disocian mas rápida y fácilmente que los uretanos y las ureas.

2.2b) REACCIONES DE POLIMERIZACION

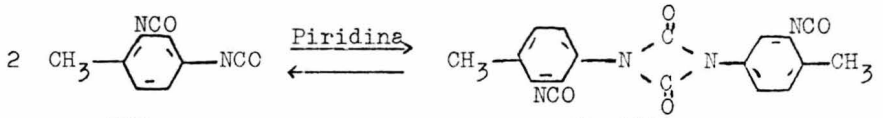
vi) Dimerización

vii) Trimerización

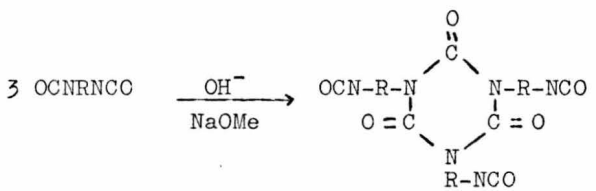
viii) Polimerización lineal

ix) Condensación

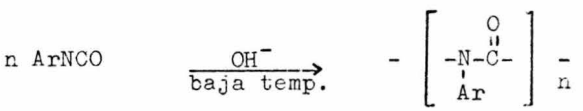
El segundo tipo de reacciones del isocianato es el de las reacciones de polimerización, las cuales también son de bastante importancia, ya que influyen en la formación de uniones cruzadas y ramificaciones durante el proceso de curado de las espumas de poliuretano. Existen tres tipos principales de polimerización del isocianato:



TDI Uretidiona



Di-isocianato Isocianurato



Isocianato aromático

Polímero lineal de alto peso molecular

El primer tipo de polimerización es una simple dimerización que forma anillos de uretidiona. Estos anillos son también difuncionales como el di-isocianato original, y como la dimerización es reversible pueden romperse formando dos moléculas del monómero.

El segundo tipo es la trimerización de los isocianatos produciendo anillos de isocianurato. Estos anillos triméricos a diferencia de los diméricos son excepcionalmente estables. Por ésta razón son de gran importancia, inclusive, en base a la trimerización se obtienen polímeros de isocianurato que se usan como isocianatos multifuncionales.

El tercer tipo de polimerización, que produce la formación de poliamidas lineales parecidas al nylon, se produce solo a bajas temperaturas y con catalizadores especiales. Es una reacción de interés, pero no tiene importancia práctica.

También se puede mencionar una última reacción de los isocianatos que usualmente no es considerada una polimerización, aunque si lo es, solo que del tipo de condensación, ya que provoca la formación de carbodi-imidas con eliminación de CO_2.

$$\underset{\text{Isoc.}}{RNCO} + \underset{\text{Isoc.}}{RNCO} \rightleftharpoons \underset{\text{Carbodi-imida}}{RN=C=NR} + \underset{\text{Bióxido de carbono}}{CO_2}$$

$$n\ \underset{\text{Di-isoc.}}{OCNRNCO} + n\ \underset{\text{Di-isoc.}}{OCNRNCO} \rightleftharpoons \underset{\text{Polímero de carbodi-imida}}{OCNR-\left[-N=C=NR-\right]_{2n}-NCO} + (2n-1)\ CO_2$$

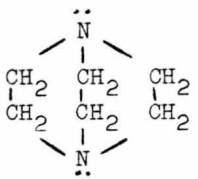
Normalmente ésta es una reacción de degradación de los isocianatos que ocurre a altas temperaturas, aunque se pueden usar algunos catalizadores especiales para inducir la formación de carbodi-imidas sin usar calor. Esta reacción tampoco tiene ninguna importancia práctica.

2.3 CATALISIS DE LAS REACCIONES DE POLIURETANOS

Los catalizadores que se emplean mas comunmente en la fabricación de espumas de poliuretano, son de 3 tipos: a) Bases inorgánicas u orgánicas, b) Compuestos amínicos y c) Compuestos or-

ganometálicos. Estos catalizadores tienen diferentes rangos de operación en el proceso de espumado, y además son semi-selectivos, es decir catalizan preferentemente alguna de las 2 reacciones principales del sistema. En forma comercial solo se usan los dos últimos tipos de catalizadores, las aminas y los compuestos organometálicos.

Dentro del grupo de catalizadores amínicos, se puede decir que aquellas aminas que tienen mayor basicidad tienen también un mayor poder catalítico, excepto en los casos en que existan interferencias. Por ésta misma razón, a pesar de que la trietilén diamina (1,4 diazo 2,2,2 biciclo octano) no es básica, es un poderoso catalizador ya que no tiene ningún impedimento estérico en su estructura.



Trietilen diamina

Los catalizadores organometálicos fueron introducidos debido a que aunque las aminas tienen actividad catalítica para la reacción entre el isocianato y los grupos hidroxilo, ninguno de los catalizadores originalmente usados tenía suficiente poder como para una producción comercial satisfactoria de espuma por el proceso de un solo paso. En vista de ésta situación se intensificó la investigación en cuanto a la catálisis de reacciones, encontrándose que numerosos compuestos metálicos y especialmente organometálicos son poderosos catalizadores para los procesos de elaboración de espumas. A continuación se muestra el efecto de ciertos compuestos de estaño, comparado con algunos otros catalizadores.

TABLA # 6

Catálisis de la reacción entre el fenil isocianato y el metanol en eter dibutílico:

Catalizador	% molar de catalizador usado	Actividad relativa a una concentración ponderada de 1 % molar
Ninguno	0	1
Trietil-amina	1.0	11
Naftenato de cobalto	0.93	23
Hidróxido de bencil trimetil-amonio	0.47	60
Cloruro estanoso	0.70	68
Tetra n butil estaño	1.01	82
Cloruro estánico	0.30	99
Acetato de tri, n butil estaño	0.1	500
Tricloruro de n butil estaño	0.2	830
Hidróxido de trimetil estaño	0.041	1800
Diclcruro de dimetil estaño	0.020	2100
Dibutil dilaurato de estaño	0.0094	37100

Algo que es digno de mencionarse es el efecto sinergético o sinergístico de los catalizadores, es decir que el poder catalítico de dos compuestos en la misma formulación no es igual a la suma de los poderes catalíticos individuales sinó que aumenta muchas veces. Esto se puede observar en el cuadro que se presenta a continuación; ésta situación es fundamental para lograr una buena formulación y desde luego ayuda a encontrar el punto óptimo de la catálisis sin demasiadas dificultades.

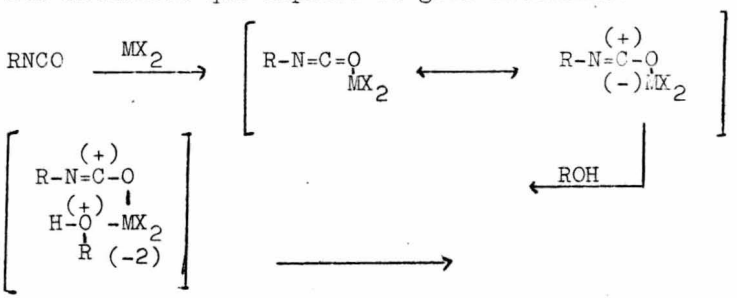
TABLA # 7

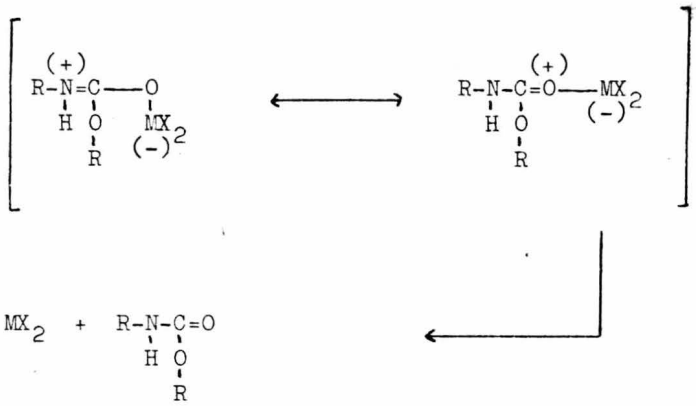
Efecto sinergético de la catálisis de la reacción entre el fenil-isocianato y el butanol.

Catalizador	Concentración % molar	k x 10^4 lt/mol seg.
Ninguno	0	0.37
Trietil amina	0.88	2.4
Diacetato de dibutil estaño	0.00105	20.0
Trietil amina + Diacetato de dibutil estaño	0.99 + 0.00098	88.0

En un estudio en el que un gran número de compuestos metálicos fueron probados en cuanto a su actividad catalítica para la reacción de isocianatos e hidroxilos, se encontró el siguiente orden descendente de actividad catalítica para ésta reacción: Compuestos de bismuto, plomo, estaño, trietilen diamina, bases fuertes, titanio, fierro, antimonio, uranio, cadmio, cobalto, torio, aluminio, mercurio, zinc, níquel, trialquil aminas, cerio, molibdeno, vanadio, cobre, manganeso, zirconio y trialquilfosfinas, los compuestos de arsénico, boro, calcio y bario no mostraron ninguna actividad catalítica.

Se ha propuesto un mecanismo de reacción para los catalizadores metálicos que explica su gran actividad:





Este mecanismo de coordinación, que propone que el grupo hidroxilo entra sobre el metal cerca del nitrógeno del grupo isocianato, explica la gran actividad catalítica de los metales. El órden de formación de los complejos podría ser el inverso, formándose primero el hidroxi-complejo y el de isocianato después. Esta formación de complejos de los metales, tanto con el isocianato como con el alcohol, parece ser la razón por la cual el efecto catalítico de los metales es mucho mayor para la reacción de los hidroxilos y los isocianatos que para la reacción del isocianato con el agua.

A pesar de que factores tales como la temperatura, la estructura del isocianato y la del compuesto con hidrógenos activos permiten controlar las reacciones del isocianato bastante bién, el tipo de catalizador dá un control mucho mas efectivo y mas preciso sobre las reacciones; de hecho el efecto catalítico puede ser tan potente que en muchos casos casi anula la influencia de otros factores como los antes citados e inclusive el medio de la reacción. Por ésta razón, en muchos usos comerciales de los isocianatos se incluyen ya los catalizadores necesarios para obtener el control deseado de la reacción. Las reactividades relativas de varios ca-

talizadores con algunos compuestos que contienen hidrógenos activos se muestran a continuación:

TABLA # 8

Efecto de varios catalizadores sobre las reactividades relativas del fenil isocianato con compuestos que poseen hidrógenos activos:

Catalizador	Reactividad relativa con: 1,butanol	Agua	Difenilurea
Ninguno	1.0	1.1	2.2
N,metil morfolina	40.0	25.0	10.0
Trietil amina	86.0	47.0	4.0
Tetrametil 1,4 butanodiamina	260.0	100.0	12.0
Trietilen diamina	1200.0	380.0	90.0
Tributil acetato de estaño	80000.0	14000.0	8000.0
Dibutil diacetato de estaño	600000.0	100000.0	12000.0

Estas determinaciones fueron realizadas en dioxano a 70 °C y con una concentración molar de catalizador del 10 %.

Por otro lado, el efecto de varios catalizadores sobre tres tipos de reacciones comercialmente importantes fué analizado y reportado. El tiempo de espumado de un sistema de prepolímero fué usado como guía para medir la velocidad de reacción entre el isocianato y el agua.

El tiempo de curado y el de gelado se observaron para determinar la velocidad de formación de compuestos producidos por reacciones secundarias como alofenatos, biurets, trimerización del isocianato etc.

TABLA # 9

Actividad Catalítica Relativa

Catalizador	Tiempo de espumado (seg)	Tiempo de secado (min)	Tiempo de gelado (días)
Trietil amina	255	76	7.5
Di etil ciclohexil amina	315	90	12.0
Di metil etanol amina	570	105	27.0
Metil morfolina	930	245	30.0
Naftenato de cobalto	3600	35	0.67

Se puede añadir que en vista de que las bases y muchos metales pesados solubles son poderosos catalizadores, y en cambio los ácidos son generalmente catalizadores débiles o nulos, se pueden utilizar a menudo dichos ácidos para estabilizar sistemas de poliuretanos. En realidad lo que hace el ácido es neutralizar una base o desactivar un metal que pueda estar en el sistema. Mientras que los ácidos inorgánicos simples, como el ácido clorhídrico, son usualmente los mejores agentes neutralizantes de los catalizadores básicos, los catalizadores metálicos, son normalmente neutralizados mejor por compuestos ácidos que también puedan funcionar como agentes quelatantes, tal como el ácido cítrico.

En base a una selección adecuada de temperatura y catalizador se puede orientar una reacción en la dirección adecuada. Por ejemplo, en la preparación de polímeros lineales, se deben escoger reactivos difuncionales y una baja temperatura para que no se vean favorecidas las reacciones de formación de biuret, alofenatos o trimerizaciones y asímismo usar un catalizador que promueva solamente la reacción de extensión de cadena. Además, si está presente un catalizador básico que active la formación de alofenatos, biuret o trímeros, la base deberá ser neutralizada y la reacción

entre los hidroxilos y el isocianato puede ser catalizada con un organometálico. Cuando se deseé un polímero cruzado, se puede obtener usando un reactivo trifuncional y catalizando solo la reacción entre isocianatos e hidroxilos, de éste modo se obtienen uniones cruzadas que tienen una mayor estabilidad térmica que una unión cruzada de biuret o alofenato.

2.4 OBTENCION DE LOS PRINCIPALES MATERIALES QUE SE USAN EN LA FABRICACION DE ESPUMAS DE POLIURETANO: POLIOL Y TDI

2.4a) OBTENCION DE ISOCIANATOS

Los isocianatos comunmente usados en la manufactura de poliuretanos, son generalmente obtenidos por fosgenación de las aminas correspondientes. A pesar de que se han descrito muchos métodos para realizar ésta reacción, el método usado en la práctica comprende esencialmente la reacción de las aminas con el fosgeno en un solvente inerte tal como el o-dicloro benceno o el mono cloro benceno a una temperatura de 25 a 100 °C (la etapa en frío), seguida de una posterior fosgenación a una mayor temperatura de 150 a 160 °C (la etapa en caliente).

La química del proceso de fosgenación frecuentemente se describe en forma incorrecta así:

Etapa en frío: $R\text{-}NH_2 + COCl_2 \longrightarrow R\text{-}NH.COCl + HCl$

Etapa en caliente: $R\text{-}NH.COCl \longrightarrow RNCO + HCl$

Se dice que en la etapa en frío, la amina es convertida en cloruro de carbamilo y que la etapa en caliente sirve solo para descomponer éste material en HCl y el isocianato. Sin embargo, un estudio de la química de la fosgenación ha demostrado claramente que las reacciones que ocurren son las siguientes:

Etapa en frío:

$$R\text{-}NH_2 + COCl_2 \longrightarrow RNH.COCl + HCl$$

$$R\text{-}NH_2 + HCl \longrightarrow R\text{-}NH_2.HCl$$

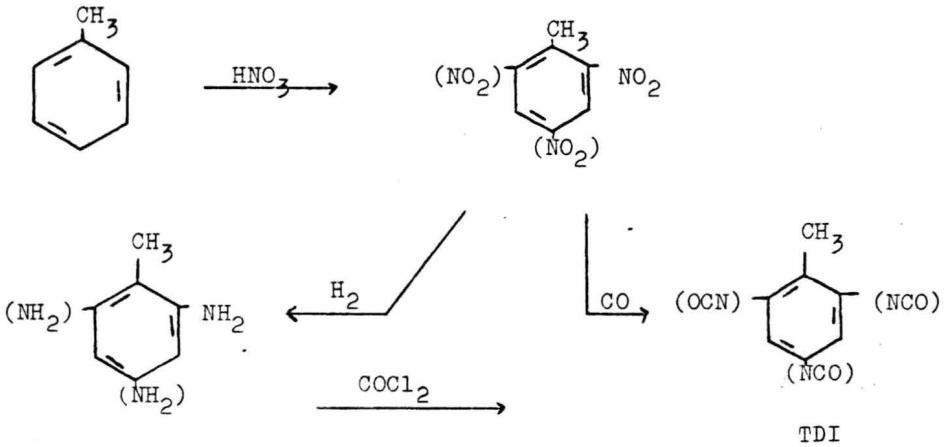
$$R\text{-}NH_2 + RNH.COCl \longrightarrow R\text{-}NH_2.HCl + RNCO$$

Etapa en caliente:

$$R\text{-}NH_2.HCl + COCl_2 \longrightarrow RNCO + 3HCl$$

El cloruro de carbamilo reacciona con la amina produciendo isocianato y el clorhidrato de amina. La característica principal de la etapa en frío, es precisamente la formación de grandes cantidades del clorhidrato de la amina, el cual en la etapa en caliente reacciona con el fosgeno, dando como resultado la producción de isocianato y de ácido clorhídrico. Existen desde luego algunas reacciones secundarias, en especial la formación de ureas disustituidas que reducen la conversión de las reacciones principales directa e indirectamente.

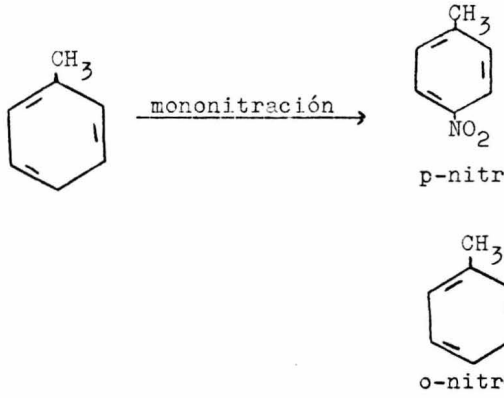
El incremente tenido en los últimos años en la producción de isocianatos ha estimulado a varios investigadores a encontrar procesos alternativos para la obtención de isocianatos, que sean mas baratos que el actual y que no presenten la dificultad de manejar fosgeno ni se obtengan tan grandes cantidades de subproducto (HCl). Uno de éstos procesos descritos recientemente hace uso de la reacción directa de nitrocompuestos con monóxido de carbono, en lugar de la conversión normal del monóxido de carbono a su derivado mas reactivo, el fosgeno y la consecuente producción de HVl. Este nuevo tipo de proceso está apenas en una incipiente etapa de desarrollo. A continuación se presenta una comparación entre el proceso actual y el propuesto recientemente para la obtención de isocianato.



Diamino toluenos

TDI

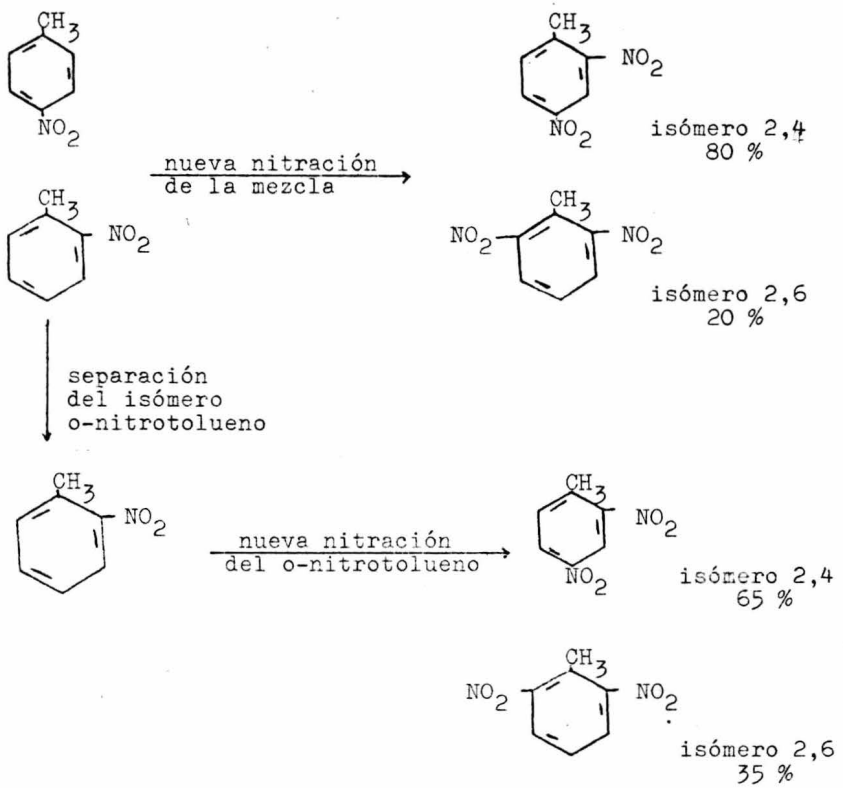
Para concluir con el tema de obtención de isocianatos se describe a continuación la forma en que se obtienen los dos tipos de isocianatos mas usados en la industria de los poliuretanos, el TDI 80/20 y el TDI 65/35.



p-nitrotolueno

o-nitrotolueno

mezcla de isómeros orto y para del nitrotolueno en una determinada proporción

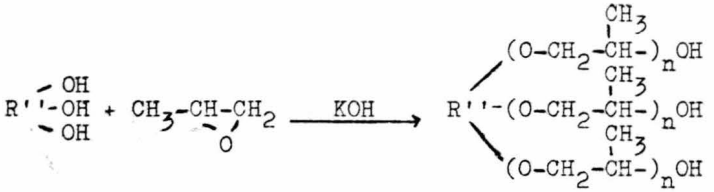


2.4b) OBTENCION DE POLIOLES

Los polioles mas frecuentemente usados son polímeros del óxido de propileno, usando un glicol como iniciador cuando se requieren polioles lineales y un alcohol de mayor funcionalidad como la glicerina o el pentaeritritol cuando se requieren polioles ramificados. Esto se ilustra a continuación:

$$HOCH_2\text{-}\underset{CH_3}{CH}\text{-}OH + CH_3\text{-}\underset{O}{CH}\text{-}CH_2 \xrightarrow{KOH} HO\text{-}\underset{CH_3}{CH}\text{-}CH_2O(CH_2\text{-}\underset{CH_3}{CH}\text{-}O\text{-})_n CH_2\text{-}\underset{CH_3}{CH}\text{-}OH$$

Isopropilen glicol — Oxido de propileno — Poliol lineal

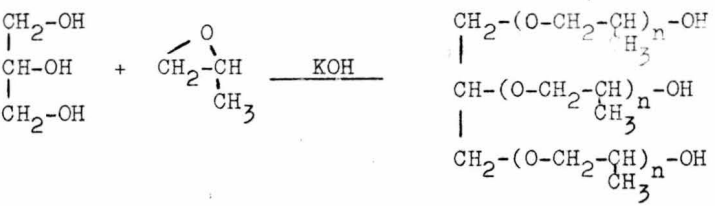


Triol Oxido de propileno Poliol ramificado

Existen en realidad 5 principales tipos de polioles, que son:

1) Dioles de polioxipropileno, los cuales se hacen polimerizando óxido de propileno, usando un diol monomérico como iniciador.
2) Trioles de polioxipropileno, basados en un triol iniciador
3) Trioles de óxido de propileno a los que se les hace reaccionar por medio de una copolimerización en bloques con óxido de etileno para incrementar la proporción de grupos hidroxilo primarios terminales
4) Polioles en los que se usan mezclas de óxido de etileno y de óxido de propileno sin controlar la copolimerización
5) Polioles en los que se usan mezclas de los alcoholes iniciadores.

El peso molecular de los polioles está controlado por medio de la proporción de óxido usado con respecto al alcohol iniciador. El poliol mas usado comercialmente es el triol de poli-oxipropileno con un peso molecular de 3000 aproximadamente y que está basado en la glicerina.



Este poliol tiene aproximadamente 95 % de hidroxilos secundarios terminales y 5 % de hidroxilos primarios que son mas reac-

tivos porque tienen menos impedimentos estéricos. Sustituyendo el óxido de propileno de la reacción inicial con óxido de etileno en la etapa final de la polimerización, el 66 % de los hidroxilos secundarios es reemplazado por hidroxilos primarios.

El procedimiento de obtención de éstos polioles consiste en una polimerización que se realiza en ausencia de oxígeno y bajo condiciones bien controladas de presión y temperatura; se debe tener un cuidado muy especial para evitar reacciones laterales no deseadas que provocan el reemplazo de de los grupos hidroxilo terminales por grupos olefínicos que no reaccionan con los isocianatos y por lo tanto evitan la polimerización de las moléculas de uretano. La etapa de polimerización del óxido debe ser catalizada con hidróxido de potasio, el cual una vez terminada ésta etapa, se debe neutralizar y eliminar por precipitación en forma de sal insoluble, o bien se trata con un agente adsorbente adecuado. Normalmente se adiciona un antioxidante en ésta etapa, antes de deshidratar el producto a vacío.

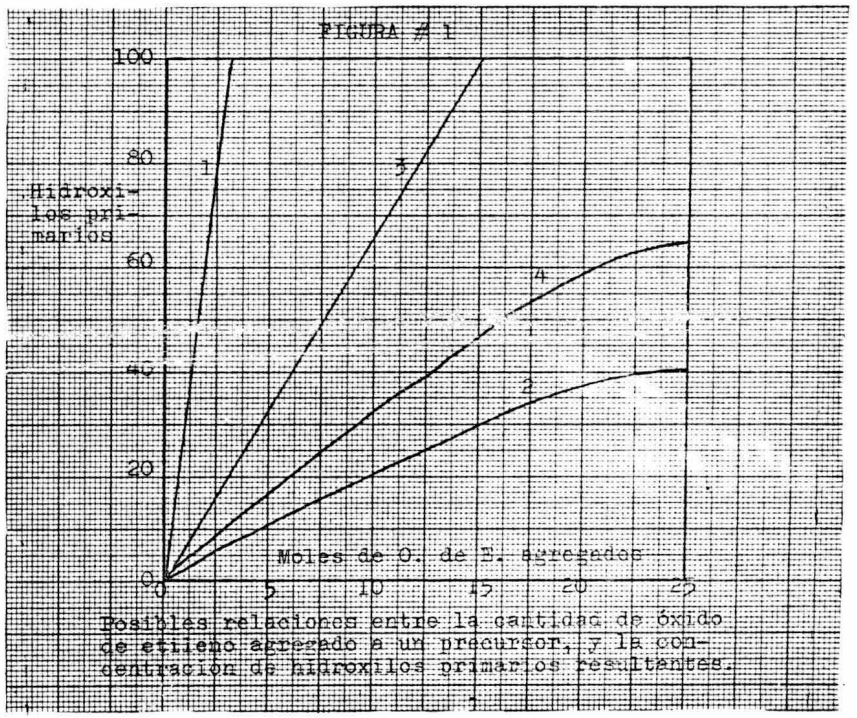
Los polioles que se usan en la fabricación de espumas de alta resiliencia, son muy diferentes a los polioles convencionales; básicamente su diferencia consiste en la proporción de hidroxilos primarios que tienen, la cual a diferencia de los polioles convencionales es mucho mayor; ésta mayor proporción de hidroxilos primarios se logra a base de adicionar óxido de etileno a las cadenas ya formadas de óxido de propileno polimerizado. Estos polioles son llamados "graft" o poliméricos, aunque ninguno de los dos nombres es correcto, ya que no son copolímeros graft, y poliméricos, pues todos los polioles lo son.

Estos polioles tienen una reactividad muy elevada que permite desmoldar las piezas fabricadas con ellos en 5 o 10 minutos. En

éste tipo de polioles sería deseable tener 100 % de hidroxilos primarios, pero ésto no es posible por razones que se explicarán a continuación, la máxima proporción de hidroxilos primarios con respecto a secundarios que se ha logrado es del 64 % y 36 % respectivamente. Si se lograra obtener un poliol con mayor proporción de hidroxilos primarios, se podría hacer con él una espuma que curaría en 2 o 3 minutos y que prácticamente no necesitaría catálisis, lo cual a su vez implicaría una notable reducción de costos en materias primas y en equipo de proceso. Las razones por las cuales hasta el momento no es posible obtener polioles poliméricos con proporción de hidroxilos primarios superior a 64 % y una somera explicación sobre el proceso de obtención de éstos polioles se describe a continuación:

Existen varias alternativas en la adición de óxido de etileno a un poliol convencional de óxido de propileno, el cual es denominado el precursor. Si la adición de óxido de etileno fuera simple y directa, es decir una molécula de óxido de etileno por cada grupo hidroxilo terminal secundario, se observaría una transición uniforme de 0 a 100 % en contenido de hidroxilos primarios, ya que se habría agregado un equivalente molar de óxido de etileno por cada mol de grupos hidroxilos secundarios, ésto se ilustra en la figura # 1, curva # 1. Por lo tanto, un poliol con 100 % de hidroxilos primarios, resultaría de la adición de tres moles de óxido de etileno a un triol precursor. Sin embargo ésto no sucede ya que intervienen varios factores, como la composición del precursor y su configuración, lo cual determina impedimentos estéricos, la mayor reactividad relativa de los hidroxilos primarios una vez generados, las reacciones competitivas que se producen en el sistema reaccionante, y las condiciones de la reacción. La relación entre el óxido de etileno adicionado y el contenido de hidroxilos

primarios resultante, dependerá de cualquiera de éstos factores que controle la reacción. Si la reactividad relativa de los hidroxilos primarios es muy alta, se podría esperar la producción de cadenas lineales largas de óxido de etileno, y un lento incremento en el contenido de hidroxilos primarios terminales conforme se agrega óxido de etileno, ésto se ilustra en la curva # 2 de la misma figura. Si las reactividades relativas fueran similares, y las reacciones laterales competitivas fueran mínimas, se observaría un rápido incremento en el contenido de hidroxilos primarios, el cual finalmente alcanzaría el 100 % (curva # 3 de la misma figura). Una situación intermedia, tal como la que se muestra en la curva # 4 resultaría si las reacciones competitivas fueran importantes en el sistema reaccionante.



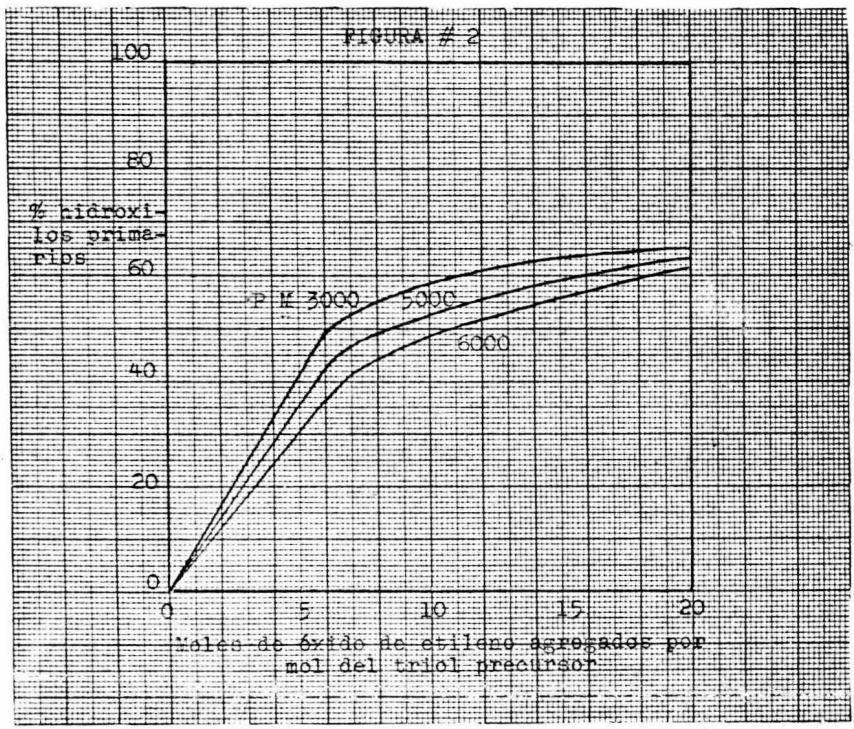
Posibles relaciones entre la cantidad de óxido de etileno agregado a un precursor, y la concentración de hidroxilos primarios resultantes.

Para determinar el efecto de los factores 1, 2 y 3 en la estructura del poliol, se realizó un estudio consistente en la preparación de una serie de polioles que variaba en la composición del precursor y la cantidad de óxido de etileno agregado. Los polioles fueron preparados bajo condiciones controladas (temperatura, presión, adición de óxido de etileno y tipo y cantidad de catalizador) y el balance de materiales fué cuidadosamente seguido. Los datos que se obtuvieron son específicos para las condiciones usadas, pero son indicativos de lo que sucedería en forma general para otras condiciones. Se seleccionaron precursores de 3000, 5000 y 6000 en peso molecular, y los datos que se obtuvieron se presentan en la tabla a continuación:

TABLA # 10

Precursor	Moles de óxido de etileno agregado	% de hidroxilos primarios	No de hidroxilos	Peso molecular promedio
3000	0	>3	55.8	2200
3000	3.9	38	53.8	2470
3000	6.3	51	52.4	2670
3000	10.4	62	52.2	2630
5000	0	>3	33.7	3320
5000	9	49	33.5	3340
5000	11.9	55	31.5	3260
5000	13.7	60	31.2	3440
6000	0	>3	29.2	3615
6000	4	33	30.5	3210
6000	9.8	48	31.0	3520
6000	13.4	56	29.7	3470
6000	18.9	64	29.2	3400

Una representación gráfica de la relación entre el óxido de etileno adicionado y el contenido de hidroxilos primarios, la cual se muestra en la siguiente figura, indica que la ruta que sigue la adición de óxido de etileno es muy similar a la de la curva # 4 en la figura # 1.



El análisis de la tabla # 10 y de la figura # 2 muestra que el contenido de hidroxilos primarios se incrementó rápidamente hasta que se habían añadido mas o menos 6 moles de óxido de etileno. La velocidad de incremento de hidroxilos primarios fué afectada por el peso molecular del precursor, haciendo que la adición a los precursores de alto peso molecular fuera menos eficiente. En vista de que la adición de la misma cantidad de óxido de etile-

no a un diol y a un triol del mismo número de hidroxilos produce mas grupos hidroxilos primarios en el diol, y como la verdadera funcionalidad del precursor decrece cuando el peso molecular es mayor, se podría esperar lo contrario. El resultado que se observ indica por lo tanto, que existen impedimentos estéricos muy importantes durante las etapas iniciales de la adición de óxido de etileno. Cuando se añadieron mas de 6 moles de óxido de etileno, el incremento en hidroxilos primarios por mol de óxido de etileno agregado se volvió mas lento, luego lineal y finalmente ya no depe dió del peso molecular. Este resultado indica que la reactividad relativa mayor de los hidroxilos primarios se vuelve dominante cuando su concentración se acerca al 50 % y que las reacciones laterales se vuelven mas competitivas. Es significativo que el pu to de inflexión en la eficiencia ocurre aproximadamente al mismo nivel de óxido de etileno agregado independientemente del peso molecular y no a la misma concentración de hidroxilos primarios. Esto indica definitivamente que los factores estéricos y/o la formación de subproductos son dominantes y determinan el punto de inflexión.

2.4c) INFLUENCIA DEL POLIOL Y DEL ISOCIANATO EN LAS CARACTERISTICAS DE LA ESPUMA

En la producción de espumas, un determinado defecto es atribuible a varias causas y una causa puede provocar varios defectos en la calidad de la espuma por lo que no existe una correlación exacta entre las características de la espuma y sus factores controlantes; sin embargo en forma general se puede hablar de las principales características de la espuma y su relación con las diferentes materias primas que intervienen en su fabricación, considerando por un momento que no afectan a la calidad de la espuma los factores mecánicos y físicos externos.

La indentación depende primordialmente del contenido de isocianato en la formulación, ya que si éste componente se encuentra en exceso con respecto a los hidroxilos y al agua disponibles en la formulación, provocará otras reacciones que producen ureas, biurets y alofenatos los cuales forman multitud de uniones cruzadas que imparten rigidez a la estructura celular aumentando su capacidad de carga aparente o inicial. Es obvio que éste exceso de isocianato aunque mejora la capacidad de carga de la espuma, afecta considerablemente las otras características, especialmente la resistencia a la tensión, elongación y desgarre ya que los grupos ureicos incrustados rompen la homogeneidad de la estructura celular debilitándola considerablemente.

La densidad depende principalmente de la cantidad de agua en la formulación y de la presión barométrica, ya que el agua produce estequiométricamente una determinada cantidad de bióxido de carbono a una alta temperatura, el cual al escapar produce la elevación de la espuma, ocasionalmente se usa un agente soplante auxiliar que modifica la densidad de la espuma. Un exceso de agua, además de modificar la densidad, también afecta a la capacidad de carga al promover y catalizar, en función del calor que genera, reacciones secundarias que producen uniones cruzadas.

La resistencia a la elongación, tensión y desgarre dependen básicamente del tipo de poliol que se use en la formulación y en el adecuado balanceo de la cantidad de agua e isocianato en la formulación. Cuando éstos dos últimos componentes están en una concentración tal que el agua solo reaccione con una cantidad determinada de isocianato para producir CO_2, sin producir reacciones secundarias, y el resto del isocianato reaccione con los grupos hidroxilo libres del poliol sin que quede exceso, entonces la re-

sistencia a la tensión elongación y desgarre, dependen solo de las características del poliol. La resistencia a la elongación está en relación directa a la longitud de la cadena del poliol, por lo que si se usa un poliol de peso molecular elevado y número de hidroxilos reducido se obtendrá una espuma con excelente resistencia a la elongación. La resistencia a la tensión y al desgarre, dependen del espesor de pared de las celdas, y éste a su vez depende de la densidad de la espuma y del tipo de poliol en la misma relación que la característica anterior.

Por último, la deformación permanente depende de la adecuada proporción entre el poliol y el isocianato, ya que un exceso del primero, causará que la reacción sea incompleta dejando poliol sin reaccionar, el cual posteriormente debido a su resinosidad actuará como adhesivo en la estructura celular; por otro lado, un exceso de isocianato hace que la espuma sea muy quebradiza haciéndola poco resistente a cualquier tipo de esfuerzo por lo que la deformación permanente se vé afectada en forma negativa cuando hay un exceso de isocianato.

CAPITULO III

DIFERENCIAS EN PROCESOS, FORMULACIONES Y CARACTERISTICAS.

En éste capítulo haremos una comparación que comprenda las formulaciones, los procesos y las características de las espumas de poliuretano convencionales y las espumas de alta resiliencia, para lo cual analizaremos primeramente la tecnología de las espumas tradicionales.

3.1 ESPUMAS TRADICIONALES

3.1a) FORMULACIONES

Las formulaciones de espumas convencionales, normalmente contienen los siguientes componentes: Un poliol, un isocianato, un agente soplante, un catalizador de estaño, un catalizador amínico y un agente tensoactivo ya que esos son los componentes mínimos necesarios en cualquier sistema de poliuretanos. Las espumas de alta resiliencia también contienen éstos compuestos, lo único que varía son sus proporciones y la naturaleza química de algunos de ellos.

Existen miles de formulaciones balanceadas que producen espumas de poliuretano de determinadas características, pero en realidad todas son solamente variaciones de las proporciones de los componentes que las forman. La razón por la cual se varía la concentración de uno o varios de los componentes es la importancia relativa de las características, es decir, existen formulaciones que producen espumas de una excelente capacidad de carga aunque el resto de las características no sean tan buenas, o viceversa, lo cual se logra normalmente haciendo ajustes en las concentraciones de los componentes. Por ejemplo, se ilustra a continuación una formulación típica para espuma producida en bloques y las características

obtenidas:

Formulación # 1

Poliol de P. M. = 3000 (basado en O. de Prop.)	100.000 partes
Silicón (surfactante)	1.000 "
N etil morfolina	0.400 "
Trietilendiamina (dabco)	0.050 "
Octoato estanoso	0.450 "
Agua	3.300 "
TDI 80/20 (Indice=104)	42.500 "

Características de la espuma

Densidad	Lb/ft^3	1.8 ($28\ kg/m^3$)
Resistencia a la tensión	PSI	19.9
Elongación	%	258
Resistencia al desgarre	Lb/in	3.3
Resiliencia	%	48.5
Deformación permanente	90% def.	3.6 %
Indentación		
25 % deflexión	$Lb/50\ in^2$	36.2
65 % deflexión	"	59.9

Esta formulación muestra excelentes valores de elongación, tensión y desgarre, ya que como regla general, se puede considerar que un valor de elongación superior a 175 % es muy bueno, un valor de tensión superior a 12 lb/in^2 es también muy bueno y un desgarre superior a 2.5 lb/in es excelente, sin embargo, la indentación de ésta espuma no es muy alta, ya que en cuanto a ésta característica un valor superior a 43 lbs al 25 % de deflexión es indicativo de una gran capacidad de carga de la espuma.

Veamos ahora una formulación diseñada para obtener altos valores de indentación:

Formulación # 2

Poliol de P. M. = 3000 (óxido de prop.)		85.000 partes
Quadrol		15.000 "
Agua		2.300 "
Silicón		1.500 "
N,N' dimetil piperazina		0.900 "
TDI 80/20 (Indice=100)		47.500 "

Características de la espuma

Densidad	Lb/ft^3	2.3 (37 kg/m^3)
Resistencia a la tensión	PSI	18.7
Elongación	%	65
Resistencia al desgarre	Lb/in	0.93
Deformación permanente	90 % def.	33.9 %
Indentación:		
25 % deflexión	$Lb/50\ in^2$	47
65 % deflexión	"	94

Como puede observarse con ésta formulación se obtiene una espuma cuyas características de indentación son magníficas, aunque el resto de las propiedades no lo sea tanto. Puede verse que los valores de elongación, desgarre y deformación permanente están muy por debajo de los valores obtenidos con la primera formulación, especialmente el último de ellos.

Las formulaciones para espuma moldeada tradicional no difieren mucho de las anteriores, en realidad la única diferencia básica es la reactividad del poliol, que es menor para la espuma moldeada con objeto de retardar el gelado y permitir que la espuma llene perfectamente todo el molde antes de gelar. A continuación se muestra una formulación típica para espuma moldeada tradicional:

Formulación # 3

Poliol de P. M.=3500 (gelado lento)	100.000 partes
Agua	3.500 "
Octoato estanoso	0.150 "
Silicón	1.200 "
Trietilén diamina	0.100 "
Ftalato de dioctilo	2.000 "
Trimetil-butil diamina	0.080 "
TDI 80/20 (Indice=104)	44.500 "

Características de la espuma

Densidad	Lb/ft^3	2.15 ($34\ kg/m^3$)
Resistencia a la tensión	Lb/in^2	14.4
Elongación	%	215
Resistencia al desgarre	Lb/in	1.14
Resiliencia	%	43.5
Deformación Permanente		
50 % deflexión	%	6.34
90 % deflexión	%	18.15
Indentación		
25 % deflexión	$Lb/50\ in^2$	33
65 % deflexión	"	70
Retorno 25 %	%	63
Factor sag	—	2.12
Fatiga (40000 ciclos)		
ILD 25 %	$Lb/50\ in^2$	18
Def. Perm.		
50 % def.	%	32.8
90 % def.	%	92.3

Aquí se puede ver, en primer lugar, que la densidad es mu-

cho mayor que la que podría esperarse en base al contenido de agua de la formulación, sin embargo es un resultado lógico para espuma moldeada ya que las condiciones del espumado cambian y deja de ser la reacción un espumado libre. En otras palabras, cuando se inicia la reacción, la espuma crece verticalmente en una etapa que puede considerarse como espumado libre, pero cuando alcanza la parte superior del molde, las celdas comienzan a comprimirse impulsadas por un lado por la generación de CO_2 y detenidas por el otro por las paredes del molde causando un aumento en la densidad de la espuma resultante.

También puede observarse que el resto de los resultados son indicativos de una espuma intermedia, es decir que todas sus propiedades son regulares sin destacar ninguna. Cabe hacer una explicación, sin embargo, acerca del bajo valor obtenido para la resistencia al desgarre. Esto es mas o menos común en la mayoría de las espumas moldeadas y se debe a que en éstas espumas el gelado no es uniforme ni los esfuerzos están bien repartidos, lo que ocasiona que se formen estratificaciones en la espuma que representan zonas muy débiles a cualquier tipo de esfuerzo; la no hermeticidad de los moldes es otro factor muy importante que ocasiona las mencionadas estratificaciones y otros defectos que redundan en una pobre resistencia al desgarre.

3.1b) PRUEBAS FISICAS QUE SE REALIZAN A LA ESPUMA FLEXIBLE

Antes de revisar los procesos que se usan para la fabricación de espumas de poliuretano, es conveniente dar una somera explicación acerca de las pruebas físicas que se realizan en la espuma flexible y de los resultados que se obtienen.

Existen varios métodos que describen las pruebas físicas, por ejemplo en Europa se usan los métodos ingleses descritos en los "British Standards" números BS.3379:1961, BS.3667, partes

1 y 2 de 1963 y partes 3 a 10 de 1966, así como el número BS. 4021:1966. En América se usa mucho más el método D-1564-71 de ASTM. Este método fué desarrollado y estudiado por el Comité de Espumas Flexibles de la División de Plásticos Celulares de la Sociedad de la Industria de los Plásticos (SPI), y luego fué publicado como un método tentativo por la Sociedad Americana para Pruebas de Materiales (ASTM) en 1958. Fué revisado como método tentativo en 1964 y publicado como método general en 1969 para ser finalmente vuelto a publicar en 1971 con algunos cambios referentes a las pruebas de fatiga. Las principales pruebas que cubre éste método son las siguientes:

a) DENSIDAD

Existen dos tipos de densidad que pueden ser medidas en la espuma de poliuretano, la densidad total de una pieza, que incluye la piel y todas las superficies moldeadas, y la densidad de la espuma sin piel. Se puede usar cualquier tamaño de muestra para hacer la medición y se reporta el resultado en libras por pié cúbico o en su equivalente métrico de kilogramos por metro cúbico.

b) RESISTENCIA A LA TENSION Y A LA ELONGACION

Estas dos características se miden solo en espumas que no tengan piel ni defectos como burbujas, estratificaciones o áreas colapsadas. El espesor de la probeta se mide cuidadosamente y el resultado de la prueba de tensión se reporta en libras por pulgada cuadrada. Para éstas dos pruebas se usa normalmente la misma probeta y se hacen al mismo tiempo. La probeta consiste en un trozo de espuma en forma de hueso de aproximadamente 15 cms. de longitud y media pulgada cuadrada de sección en el centro. La probeta se sujeta a unas tenazas conectadas a un dinamómetro y se jala la espuma a una velocidad fija de 20 pulgadas por minuto hasta

que se rompa. En éste punto se observa la fuerza empleada en el dinamómetro y ésta lectura sirve para el reporte de tensión; al mismo tiempo se observa la elongación sufrida por la probeta hasta reventarse y se relaciona con la longitud original, reportándose el resultado en forma de porcentaje para la prueba de elongación.

c) RESISTENCIA AL DESGARRE

La prueba de resistencia al desgarre mide la fuerza en libras requerida para propagar un desgarramiento practicado en una probeta de espuma de 1 pulgada de espesor. La velocidad a la que se mueve el dinamómetro empleado es de 5 pulgadas por minuto y la lectura máxima es la que se reporta en lb/in.

d) PRUEBA DE INDENTACION

La prueba de indentación consiste en medir la fuerza necesaria para producir una deflexión en la espuma que se expresa como un porcentaje de el espesor original. Las deflexiones que mas comunmente se miden son al 25 %, al 50 % y al 65 %. La prueba consiste en deflexionar uniformemente en una area de 50 in^2 una probeta de espuma de 4 pulgadas de espesor a una velocidad constante e ir midiendo la fuerza requerida para lograr dicha deflexión en un dinamómetro. Las unidades en que se reportan los resultados de ésta prueba son lbs/50 in^2. La relación entre la fuerza necesaria para lograr una deflexión al 65 % y la necesaria para 25 % se llama "factor sag". Cuando después de haber hecho las mediciones al 25 y al 65 % se vuelve a hacer al 25 %, se usa el término "porcentaje de recuperación" que expresa el grado de recuperación que posee la espuma a las respectivas deformaciones, relacionando la segunda lectura con la primera.

e) DEFORMACION PERMANENTE

Esta prueba consiste en deflexionar una probeta de espuma

ya sea al 50 o al 90 % de su espesor original, durante 22 horas a una temperatura de 70 °C, midiendo posteriormente el nuevo espesor y relacionándolo con el original. Esta prueba se puede hacer con o sin piel, e inclusive para partes automotrices es necesario hacer la prueba con piel. Los resultados se expresan en porcentajes.

f) FLUJO DE AIRE

Esta prueba mide la facilidad con la que circula el aire a través de la estructura celular de la espuma, midiendo por lo tanto el grado de comunicación de las celdas. La prueba consiste en medir el flujo de aire que se requiere para mantener una diferencial de presión de 0.5 pulgadas de agua. El resultado se reporta en pies cúbicos por minuto y se usa como guía para ajustar la catálisis y la cantidad de surfactante en la formulación.

g) ENVEJECIMIENTO HUMEDO.

Esta prueba consiste en someter una muestra de espuma a una atmósfera saturada de humedad a 120 °C durante 5 horas, midiéndose posteriormente el porcentaje de cambio en las características de indentación y deformación permanente.

h) PRUEBAS DE FATIGA.

Las pruebas de fatiga tienen como objetivos determinar la calidad de la espuma desde 3 puntos de vista:

a) Pérdida en espesor

b) Pérdida en capacidad de carga

c) Modificaciones estructurales.

Esta es una de las pruebas mas severas a las que se somete la espuma y tiene dos modalidades, la prueba de fatiga estática y la prueba de fatiga dinámica. La fatiga estática consiste en deflexionar una muestra de espuma al 75 % de su espesor durante 17

horas a 23 °C, midiendo antes y después la capacidad de carga o indentación de la espuma y comparando los valores obtenidos. La prueba de fatiga dinámica consiste en someter a la probeta de espuma a 40 000 ciclos de deflexión por medio de un cilindro metálico de 18 pulgadas de longitud y 3 pulgadas de diámetro colocado a un ángulo de 15 ° con respecto a la probeta, y que ejerce una carga de 30 libras sobre la muestra. La velocidad con que actúa éste cilindro metálico es de 28 ciclos por minuto, por lo que la prueba dura aproximadamente 23.5 horas. Antes y después de la prueba de fatiga dinámica se miden los valores de indentación y deformación permanente y se relacionan entre sí reportándose la diferencia en forma de porcentaje.

i) PRUEBAS DE FLAMABILIDAD

Se usan varias pruebas para determinar la flamabilidad de las espumas flexibles. La prueba descrita en el método D 1692-68 de ASTM se especifica en varios estados de la Union Americana, ésta prueba consiste en someter a la flama una muestra de espuma soportada horizontalmente midiendo el tiempo en que se queman 5 pulgadas de espuma o en que se extingue la flama. En los laboratorios de General Motors, se hace una prueba similar soportando la muestra en forma vertical y encendiéndola con un cerillo, si la flama se extingue antes de quemar 6 pulgadas de espuma, ésta se considera aceptable. Por último también se usa en Chrysler la prueba del cigarrillo que consiste en dejar un cigarro encendido sobre la superficie de la espuma hasta que se extinga, midiéndo luego el area quemada; si ésta es inferior al doble del area ocupada por el cigarro, la espuma se considera aceptable.

j) DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES TERMICAS DE LA ESPUMA:

En vista de que la espuma de poliuretano es un excelente ais-

lante térmico, sobre todo para bajas temperaturas, es muy necesario conocer el coeficiente de conductividad térmica de las espumas, éste coeficiente en la industria de las espumas es llamado "factor K" y el método está descrito en el código ASTM bajo el método C177-63 (1968).

También se acostumbra determinar el coeficiente de expansión térmica de la espuma, sobre todo cuando se usa en la industria de la construcción. La prueba consiste en medir el cambio en longitud de una muestra de espuma entre -30 °C y 30 °C.

Además de éstas 10 pruebas existen otras como la porosidad, la friabilidad, el efecto de la humedad en las características de la espuma etc. que en realidad solo son apéndices de las anteriores y que solo se usan en espumas para aplicaciones muy especiales.

Finalmente se presenta un cuadro en el que se incluyen todos los métodos de prueba de las espumas de poliuretano.

TABLA # 11

DESIGNACION ASTM	COMITE ASTM	TITULO
D-1621-64	D-20	Método de prueba para la resistencia a la compresión de los plásticos celulares.
D-1622-63	D-20	Método de prueba para la densidad aparente de los plásticos celulares.
D-1623-64	D-20	Método de prueba para las propiedades de tensión de los plásticos celulares
D-1673-61(1967)	D-9	Método de prueba para la constante dieléctrica y el factor de disipación de los plásticos celulares expandidos usados como aislantes eléctricos.
D-1692-68	D-20	Método de prueba para la flamabilidad de los plásticos y las espumas.
D-2326-70	D-20	Conductividad térmica de los plásticos celulares por medio de un termopar.

D-2237-70	D-20	Método de prueba para las propiedades de velocidad de expansión de las espumas de poliuretano.
D-1638-70	D-20	Método de prueba para las materias primas de los uretanos (isocianato)
D-2849-69	D-20	Método de prueba para las materias primas de los poliuretanos (poliol)
D-1786-66	D-20	Especificaciones para el toluén diisocianato y el polioxipropilén glicol.

3.1c) PROCESOS Y EQUIPO PARA ESPUMA TRADICIONAL MOLDEADA.

A) EQUIPO PARA ESPUMAR.

Para la transformación de las materias primas en espuma de poliuretano, existen diferentes instalaciones llamadas "máquina" simplemente. La misión específica de éstas máquinas es la de dosificar los componentes líquidos en la proporción deseada e independientemente de la presión, mezclar homogeneamente las cantidades dosificadas en un cabezal y transferir después ésta mezcla al exterior, ya sea sobre un transportador o sobre un molde. Las máquinas disponibles en el mercado, permiten dosificar independientemente desde 2 hasta 8 componentes. En las máquinas de solo 2 componentes es necesario mezclar previamente todos los componentes, excepto el isocianato con el poliol y hacer reaccionar éstos dos componentes en la cabeza, mientras que una máquina capaz de manejar mas componentes puede introducirlos a la cabeza directamente.

Se distinguen fundamentalmente entre los sistemas de mezclado, la mezcla con agitador mecánico y la mezcla por inyección a contracorriente a alta presión. En ambos casos se llevan los materiales desde recipientes de presión hasta las bombas dosificadoras desde las cuales se mandan a la cabeza. En el caso de máquinas con agitador, se llevan los componentes a una cámara donde se mezclan

con un mecanismo de husillo o de espigas que pueden tener accionamiento hidráulico, neumático o eléctrico. El tamaño de la cámara de mezcla es proporcional al caudal y vá normalmente desde 50 hasta 1000 cm^3. Cuando el funcionamiento es intermitente, se tiene que limpiar la cámara o cabeza con un solvente de lavado, normalmente cloruro de metileno o tricloro-fluorometano, y secar con aire antes del siguiente disparo. Como equipo de dosificación para éstas máquinas con agitador, se utilizan preferentemente bombas de engranes y en algunas ocasiones bombas de pistones.

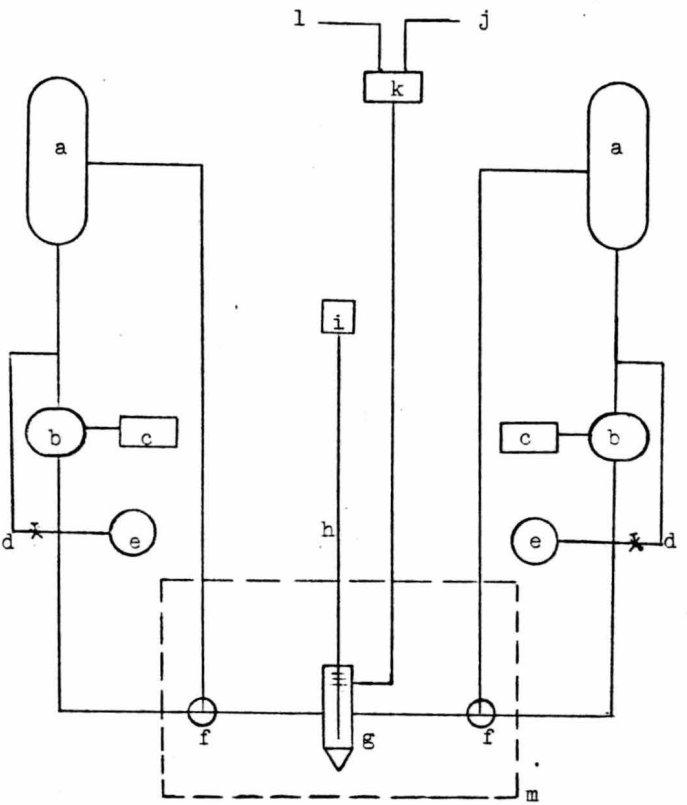
El funcionamiento de éste tipo de instalaciones se muestra en la figura # 3, en la que se ilustra un sistema rudimentario de dos componentes.

En éste sistema, los dos componentes procedentes de los depósitos a), se hacen circular en un circuito cerrado por medio de las bombas de engranes b). Accionando simultaneamente las dos válvulas de recirculación f) del cabezal de mezcla m), se llevan a la cabeza mezcladora g). La relación de mezcla exigida por la formulación se puede regular por medio de los variadores de velocidad c). La cantidad de material necesario para la fabricación de una pieza moldeada, se determina por medio del tiempo en que las válvulas de recirculación están abiertas y de la capacidad de impulsión de las bombas de dosificación.

En cambio, en un sistema con inyección a contracorriente, los componentes se ponen en contacto por medio de pulverizadores en la cabeza mezcladora donde los componentes se proyectan uno contra el otro, de tal manera que se puede prescindir de un agitador mecánico. La presión necesaria para la pulverización se obtiene generalmente por medio de bombas de dosificación de pistones de relación variable y marcha rápida. La figura # 4 representa el funcionamiento de una instalación de éste tipo.

FIGURA # 3

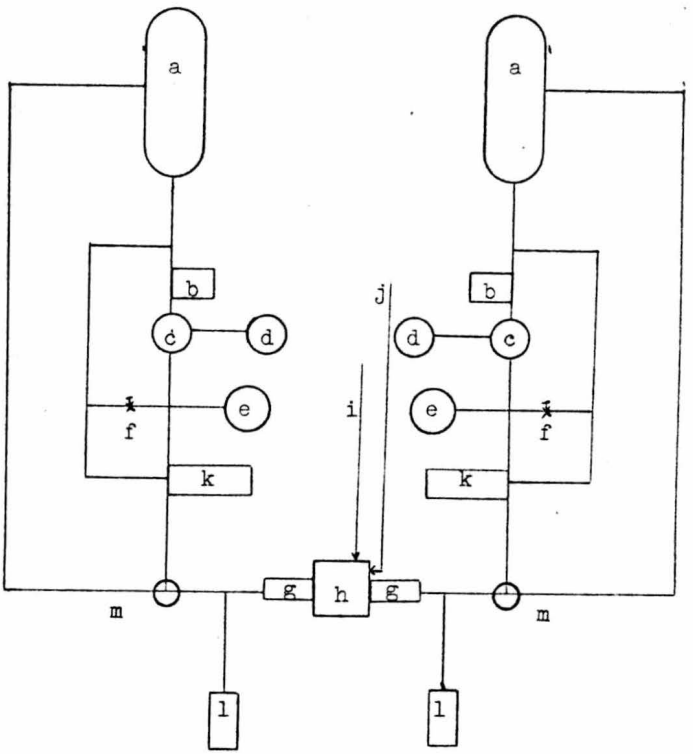
SISTEMA DOSIFICADOR CON CAMARA DE AGITACION MECANICA



a) Recipientes, b) Bombas de engranes, c) Reguladores de velocidad, d) Válvulas de seguridad, e) Manómetros, f) Válvulas de recirculación, g) Cabeza mezcladora, h) Flecha motriz del agitador, i) Motor del agitador, j) Aire a presión, k) Válvula, l) Solvente, m) Cabezal de mezcla.

FIGURA # 4

SISTEMA DOSIFICADOR CON CAMARA DE ATOMIZACION



a) Recipientes, b) Filtros, c) Bombas de pistones, d) Motores de las bombas, e) Manómetros, f) Válvulas de seguridad, g) Toberas de inyección, h) Cabeza mezcladora, i) Aire de mando, j) Aire de soplado, k) Válvulas de mando, l) Pistón de acumulación, m) Válvulas de recirculación.

En éste sistema, al accionar las válvulas k) acopladas, se llevan los componentes en forma intermitente al cabezal de mezcla. Como pulverizadores se utilizan toberas sometidas a la acción de un resorte que se abren y cierran en función de la presión. Por otro lado, las unidades de dosificación de cualquier

tipo de sistema en una máquina productora de espuma de poliuretano debe de cumplir con las siguientes condiciones:

1.- Independencia del flujo con la presión de impulsión, o sea un rendimiento volumétrico de la bomba, elevado y constante con respecto a la presión.

2.- Para un sistema de mezclado por pulverización, la obtención de una presión entre 250 y 350 Lb/in^2 para la mezcla de los componentes.

3.- Posibilidad de transporte de medios viscosos con una presión de succión reducida.

4.- Suficiente exactitud de dosificación y reproducibilidad de las cantidades impulsadas.

5.- Pulsación mínima del flujo.

6.- Compatibilidad absoluta de los materiales de la bomba con los componentes de la espuma.

Las bombas que mejor cumplen éstas seis condiciones son precisamente las de engranes y las de pistón axial, razón por la cual son las mas usadas.

En cuanto al sistema de mezcla, éste debe de cumplir fundamentalmente las siguientes condiciones:

1.- Mezcla totalmente homogenea de los componentes independientemente de las relaciones de mezcla y de la viscosidad.

2.- Comienzo y final exactamente simultáneos de la dosificación de materiales a la cabeza.

3.- Funcionamiento sin pérdidas con servicio intermitente.

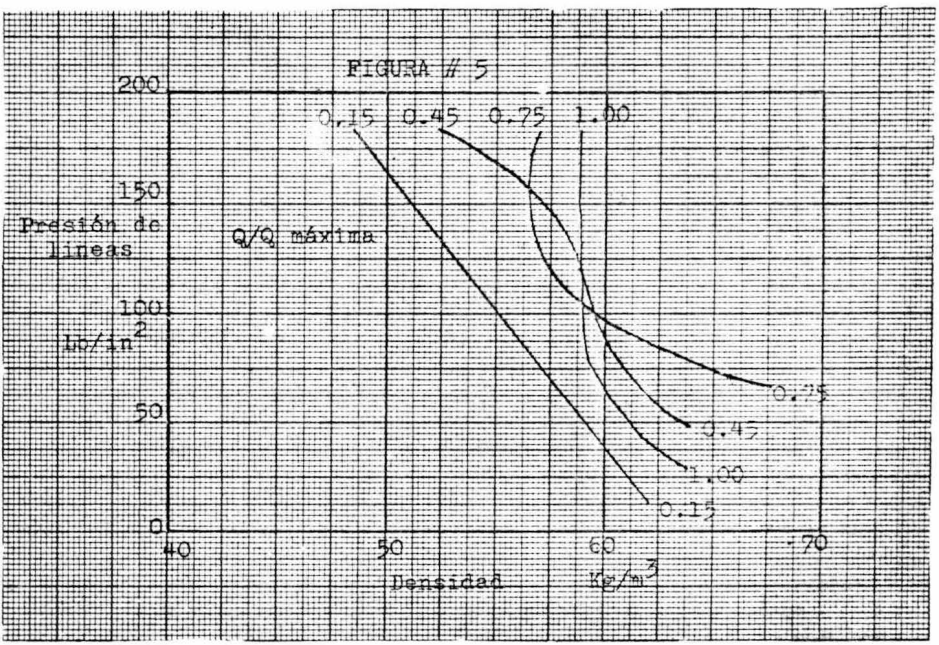
4.- Fácil conexión al molde cuando el espumado es por inyección

5.- Mínimo peso posible.

6.- Mantenimiento reducido y gran duración.

Cuando la mezcla es por inyección a contra-corriente, las

principales variables que influyen en el grado de mezclado, son la presión de impulsión y la presión en la cámara de mezcla, las cuales determinan indirectamente la calidad de la espuma por medio de las modificaciones en la densidad que producen. Esto se vé claramente en la figura # 5 a continuación.



Aquí, en donde se ha graficado sobre el eje de las abcisas la densidad del material obtenido, sobre el eje de las ordenadas, la presión en las lineas, y como parámetros diferentes flujos a la cabeza, se vé que al aumentar el caudal, y por lo tanto la presión en la cabeza mezcladora, aumenta también la densidad del material obtenido, es decir que disminuye la eficiencia del mezclado en general. Por ésta razón se debe de utilizar en todos los sistemas y especialmente en los de alta presión una cabeza que

se adapte a los flujos, por lo que es necesario contar con una cabeza de diámetro variable o bién, con varias cabezas que se puedan reemplazar fácilmente.

De hecho una máquina de espumado de poliuretanos está construida básicamente de la unidad dosificadora y la mezcladora, aunque por regla general la calidad óptima de los productos terminados, se logra a base de aditamentos especiales y sofisticaciones a las máquinas de espumar. Algunos de tales aditamentos que en la actualidad ya se están volviendo necesarios para obtener espumas de calidad competitiva son:

a) SISTEMAS AUTOMATICOS DE CONTROL DE TEMPERATURA:

Estos sistemas son necesarios para mantener la temperatura de los componentes dentro de límites razonables que permiten espumar continuamente sin variaciones excesivas de la reactividad del sistema. El tipo mas usado de control de temperatura consiste en un sistema de cambiadores de calor de coraza y tubos por don de circula el componente en cuestión y agua a contracorriente, el componente pasa generalmente por afuera de los tubos impulsado por la propia bomba dosificadora, la cual recircula continuamente el material hasta su tanque de almacenamiento donde gradualmente se vá alcanzando la temperatura fijada previamente. Por dentro de los tubos circula agua caliente o fría, impulsada por sendas bombas que también recirculan el agua hasta dos tanques colocados en los que se llama unidad de calentamiento y enfriamiento. El paso de agua caliente o fría por los tubos está controlado por 4 válvulas de solenoide que operan automáticamente abriendo dos y cerrando dos simultáneamente, reguladas por un control de temperatura que recibe una señal de un bulbo sensor colocado a la salida del cambiador de calor. El agua fría que re-

torna de los cambiadores pasa por un juego de resistencias eléctricas donde es calentada nuevamente y enviada luego al tanque de agua caliente. El agua caliente que regresa, pasa por otro cambiador de calor por donde circula un líquido enfriador como tricloro-fluorometano o cloruro de metileno que absorbe el calor del agua y ésta posteriormente se deposita en el tanque de agua fría El calor absorbido por el congelante se disipa posteriormente en un radiador completándose así el ciclo.

b) PROGRAMADORES DEL TIEMPO DE DISPARO:

En vista de que la cantidad de materiales que se depositan en el molde tienen un volúmen mucho menor que el que finalmente tendrá la pieza que se obtenga, es necesario tener un perfecto control sobre el tiempo de disparo de la máquina para evitar grandes desperdicios.

Normalmente se utilizan dispositivos automáticos que fijan el tiempo de disparo y de operación de las bombas, aunque últimamente se están utilizando programadores de sistema binario operados electronicamente capaces de programar hasta 500 tiempos de disparo diferentes con exactitud de décimas de segundo y con posibilidad de repetición del mismo tiempo de disparo, tantas veces como sea necesario. Estos programadores también controlan la operación de un juego de válvulas de solenoide que introducen solvente y aire para la limpieza de la cabeza.

c) SISTEMAS DE AGITACION INDEPENDIENTES:

Para mantener la homogeneidad de las mezclas de los componentes, previas a la mezcla final de reacción en la cabeza, es necesario contar con sistemas de agitación en cada tanque. El sistema mas usado es el de agitadores neumáticos de aspas grandes que giran a una velocidad muy lenta, del órden de 30 RPM.

d) SISTEMAS INDEPENDIENTES DE INYECCION A LA CABEZA:

En las máquinas antiguas todas las válvulas de recirculación estaban operadas por el mismo sistema neumático, lo cual implicaba que si la máquina era de seis componentes, siempre debería de trabajarse con seis componentes aunque para alguna formulación bastara con solo cinco componentes, haciendo que la máquina perdiera versatilidad. En las máquinas modernas, las válvulas de inyección a la cabeza se operan independientemente por lo que es posible manejar dos o tres formulaciones diferentes simultáneamente. Por ésta razón, en la actualidad es conveniente tener una máquina del mayor número de componentes posible y trabajarla con 4, 5 o 6 componentes según la necesidad.

B) EQUIPO ADICIONAL.

Indudablemente la parte mas importante del sistema de espumado es la máquina, pero es necesario contar con ciertos equipos adicionales para dicha fabricación, tales como transportadores, hornos de curado, túnel o sistema equivalente de enfriamiento y moldes. Sobre cada uno de éstos equipos y de su influencia e importancia en la producción de espumas se puede hablar mucho, pero a continuación se dá solo una somera explicación de cada uno de ellos.

a) TRANSPORTADORES

Los transportadores que se usan en una linea de moldeado son generalmente elípticos con una gran excentricidad para ahorrar espacio. Normalmente su longitud total varía de 30 a 100 m. La longitud está determinada por la velocidad a la que se desea llevar la linea y el tiempo disponible para cada operación. Durante un ciclo completo, es decir el tiempo que tarda un molde para pasar dos veces por el mismo punto del transportador, se deben realizar

las operaciones de vaciado en el molde, cerrado del mismo, curado de la pieza, desmoldado, limpieza, aplicación de desmoldante, enfriado del molde y colocación de insertos metálicos, por lo que el transportador debe ser suficientemente largo para permitir que se realicen todas éstas operaciones en tiempos razonables. Por regla general, los transportadores son de tablillas que se mueven a una velocidad constante por medio de un motor y un reductor de velocidad en las secciones rectas de la elipse, y son de rodillos de gravedad en las curvas de la misma, donde los moldes son movidos manualmente para transferirlos de una sección recta a la otra. En algunas lineas mas rudimentarias, todo el transportador es de rodillos con los consiguientes problemas de baja productividad que ésto implica, y en las lineas mas modernas, todo el transportador es motorizado, inclusive las curvas. Existen variaciones en cuanto al diseño de los transportadores, habiendo algunos que son movidos por una cadena colocada en la parte inferior del transportador o en la parte lateral interna; ésta cadena tiene una velocidad susceptible de variación y vá conectada por medio de extensiones a los moldes directamente o bién a unos carros que transportan a los moldes. Actualmente se empiezan a utilizar transportadores muy sofisticados que tienen velocidad variable por secciones, lo que evita muchos problemas de operación causados por la velocidad fija del transportador. En éste nuevo tipo de transportador, aunque el tiempo de un ciclo es el mismo al de un transportador convencional de la misma longitud, se puede acelerar la velocidad en las secciones donde se realizan operaciones sobradas de tiempo, y disminuir en donde sea necesario, lográndose un mejor balance de las operaciones y de los tiempos necesarios para realizarlas.

b) HORNO DE CURADO

El horno de curado se emplea para acelerar la polimerización de los poliuretanos moldeados y reducir el tiempo que normalmente tardaría la espuma en quedar manejable. Este tiempo se reduce de 20 horas a 15 minutos usando un horno de curado, lo cual permite desmoldar la pieza inmediatamente después del horno acelerando la producción. Los hornos mas comunmente usados para el curado de las piezas de poliuretano son estructuras rectangulares que cubren al transportador en una longitud equivalente al 30 o 60 % de su longitud total, son metálicos y tienen generalmente una capa de fibra de vidrio o de asbesto de 5 a 10 cm de espesor entre las paredes. Funcionan con quemadores de gas, que puede ser gas natural o gas L. P., aunque ocasionalmente se han usado hornos de microondas. Nunca se usan hornos de diesel y gasolina porque los humos que producen son perjudiciales para la calidad de la espuma. Normalmente un horno común de gas natural consume 500 000 BTU/hr por cada 15 metros de longitud, para mantener una temperatura de 150 °C que es la mas usada para el proceso de curado. Algunos hornos tienen un segundo piso donde corre otro transportador llevando las piezas después de desmoldadas para asegurar una perfecta polimerización, éstos segundos hornos se llaman de post-curado; poco usados en la fabricación de espuma tradicional.

c) TUNEL DE ENFRIADO.

El tunel de enfriado tiene como función primordial restituir a los moldes una temperatura adecuada para ser llenados. Normalmente los moldes de espuma tradicional llegan al tunel de enfriado con una temperatura de 110 a 120 °C, y deben salir del mismo con una temperatura de 35 a 50 °C de acuerdo a la formulación. En realidad no se permite un rango de 15 °C en la temperatura a

la salida, sinó que ese es el rango en que normalmente operan los sistemas existentes. Para lograr ésta reducción en la temperatura se usan enfriadores que utilizan alguno de éstos dos sistemas:

i) El molde llega abierto a la primera sección del túnel donde es bañado sobre toda su superficie tanto interna como externa, con agua atomizada por espreas colocadas arriba, abajo y a los lados del molde hasta que éste alcanza una temperatura de 25 °C aproximadamente, luego el molde pasa por unos ductos por donde sale aire seco y caliente para eliminar el agua espreada y alcanzar la temperatura requerida de 35-50 °C.

ii) El molde llega abierto al túnel, y durante todo su trayecto recibe aire seco frío por todos sus lados hasta alcanzar la temperatura deseada. El aire es inyectado por medio de ventiladores y ductos que llegan por arriba y abajo a los moldes. Con éste sistema opera el 80 % de las lineas de producción de poliuretanos moldeados convencionales.

d) MOLDES.

En teoría se pueden utilizar moldes hechos prácticamente de cualquier material como fierro, aluminio, zinc, fibra de vidrio, resinas epóxicas, silicón etc., pero en realidad en una instalación industrial solo se usan dos tipos de moldes, los moldes forjados de aluminio y los moldes fundidos del mismo material. Los moldes forjados son los mas comunes aunque por su naturaleza se deforman fácilmente con el uso produciendo piezas fuera de especificaciones dimensionales. Por otro lado, el ajuste deficiente entre la tapa y la base de los moldes forjados provoca escapes de espuma que ocasionan graves defectos a la misma como estratificaciones que afectan la deformación permanente y huecos grandes en la estructura celular. Los moldes fundidos en cambio aseguran

una gran reproducibilidad en las dimensiones de las piezas y un cierre hermético entre tapa y fondo, pero su costo es muy elevado, 5 o 6 veces superior al de los moldes forjados, razón por la cual éstos últimos se usan mas.

C) ALGUNAS CARACTERISTICAS DE OPERACION.

Las características de operación de una linea de espuma de poliuretano moldeado son diferentes para cada linea, aunque todas en general deben estar diseñadas para cumplir con ciertos requisitos comunes. Las operaciones que necesariamente se deben realizar en la linea son: vaciado, cerrado de moldes, curado, desmoldado, limpieza de moldes, aplicación de desmoldante, enfriado de moldes y aplicación de insertos metálicos. Para realizar éstas operaciones la linea se divide en estaciones. Las estaciones son tramos de la linea de una longitud determinada, que aunque son divisiones imaginarias, sirven para definir el tiempo que el molde debe de estar disponible para una determinada operación.

De acuerdo a éste sistema, las lineas normalmente están divididas como sigue: 2 estaciones para llenado, 2 estaciones para cerrar el molde, 12 estaciones para curado, 2 estaciones para desmoldar, 2 estaciones para limpieza de molde, 2 estaciones para aplicación de desmoldante, 6 estaciones para enfriar los moldes y 2 estaciones para colocación de insertos metálicos. Dependiendo del tamaño de los moldes se pueden colocar uno o dos moldes por estación, por lo que la capacidad de la linea no vá implícita en el número de estaciones y la velocidad. La longitud de una estación puede tener diferentes valores, pero es fija para una linea en particular. Si la longitud de una estación fuera de 2.5 m, que es un valor muy usado y la velocidad de la linea fuera de una estación por minuto, tendríamos para una linea como la descrita antes,

un tiempo total de ciclo igual a 30 minutos por tener 30 estaciones. La lomgitud total de la linea sería de 75 metros y su velocidad real de 2.5 m/min. Además tendría los siguientes tiempos disponibles para cada operación:

Vaciar en el molde:	2 minutos
Cerrar el molde:	2 minutos
Curar:	12 minutos
Desmoldar:	2 minutos
Limpieza:	2 minutos
Aplicación de desmoldante:	2 minutos
Enfriado:	6 minutos
Colocación de insertos:	2 minutos

Los cuales son razonables y generalmente usados en las lineas de producción de espuma de poliuretano.

Otras condiciones de operación sobresalientes de una linea son las siguientes: los moldes se deben acondicionar a 35-45 °C antes de ser llenados, la temperatura del horno de curado es normalmente de 150 a 200 °C, la temperatura en la interfase del molde y la pieza en el desmoldado debe ser de 95 a 115 °C, la temperatura de los moldes cuando se les aplica el desmoldante no deberá ser menor a 90 °C, la temperatura de los moldes al salir del túnel de enfriado no deberá ser mayor de 50 °C.

3.2 ESPUMAS DE ALTA RESILIENCIA.

3.2a) INTRODUCCION Y DESARROLLO DE LAS ESPUMAS DE ALTA RESILIENCIA

Durante muchos años, la espuma de látex fué considerada como el material de acojinamiento mas adecuado por sus excelentes características de histéresis y resiliencia. Sin embargo en 1966 la compañía Bayer de Alemania, introdujo una espuma de poliuretano con características similares a las de la espuma de látex, con el nom-

bre de "espuma de poliuretano curada en frío". El término"curada en frío" no ha sido nunca muy exacto, ya que aunque el desmoldado de las piezas hechas con éste sistema no requiere la aplicación de calor externo, el calor exotérmicamente generado durante la reacción es considerable y suficiente en la mayoría de los casos para curar el producto moldeado en 10 minutos aproximadamente. Este término"curado en frío" fué usado por Bayer para hacer explícita la facilidad de procesamiento de ésta espuma, es decir, la ausencia de horno de curado, la necesidad de transportadores menos complicados y la eliminación de un riguroso control de las temperaturas; ya que como Bayer es fabricante de materias primas para hacer espuma y no de espuma en sí, su interés principal al introducir éste sistema era expander su mercado de materias primas, logrando que las fábricas de muebles y de acojinamientos en general instalaran sus propias plantas de producción de espuma, visto que la inversión en éstas se reduciría notablemente con el nuevo sistema, y los ahorros en la compra de materiales de acojinamiento serían sustanciales.

El sistema de espumado curado en frío de Bayer estaba basado en el uso de un poliol mas activo y de un peso molecular ligeramente mayor que el de los polioles usados en espumas convencionales, combinado con una mezcla de 60 partes de TDI 80/20 y 40 partes de MDI. La catálisis de éste sistema también era mas activa que la usada en formulaciones convencionales y era necesario usar grandes cantidades de aire para iniciar la nucleación y producir estabilidad dimensional, porque no era posible usar un tipo común de surfactante ya que se ocasionaba un gran encogimiento de las piezas. La espuma resultante de éste sistema, tenia una estructura molecular mas complicada y estable que la de la espuma tradicional, y ésto era la causa por la cual se obtenía una mejor resiliencia

del producto final.

Mas o menos al mismo tiempo, la compañia Du-Pont encontró que si se detenía el proceso de refinación del TDI 80/20 antes de la terminación del mismo, se obtenía un isocianato especial que contenía un determinado porcentaje de TDI y una cierta cantidad menor de isocianato polimérico, y que si éste material se hacía reaccionar con un poliol similar al usado por Bayer, se podia fabricar una espuma de alta resiliencia; sin embargo el uso de éste isocianato hacía necesaria la aplicación de calor externo al molde para obtener un buen curado de las piezas.

Durante el desarrollo de éstos acontecimientos otros fabricantes de materias primas impulsaron su investigación al respecto, hasta llegar al mismo punto que Bayer. Todo ésto sucedía en Europa, pero a principios de 1968 algunos fabricantes en los Estados Unidos comenzaron a mostrar interés en ésta tecnología. La compañía americana Witco desarrolló un poliol de mayor peso molecular que combinado con TDI 80/20 y usando una catálisis diferente, así como materiales entrecruzadores, producia una espuma resiliente con mejores propiedades que la producida con el TDI crudo de Du-Pont.

Algunos años después Bayer también desarrolló nuevos sistemas similares a los de Witco y así también lo hizo Union Carbide en los Estados Unidos. Al mismo tiempo se evaluaron diferentes catalizadores y se desarrollaron investigaciones sobre surfactantes que pudieran ser usados con éstos sistemas de espumado.

General Motors fué la primera de las compañías automotrices americanas que consideró seriamente el uso de espuma de alta resiliencia. Al probar inicialmente los materiales de Du-Pont y luego los de Bayer, encontraron que ambos fallaron rotundamente. Se observó que al someter la espuma a un período de servicio conti-

nuo superior a 36 horas bajo condiciones de clima húmedo, las piezas perdían su espesor original y sufrían fuertes deformaciones al grado de que el conductor de un vehículo terminaba viendo a través del volante y no por encima de éste. El problema se debía a la inestabilidad hidrolítica de la espuma, razón por la cual la espuma fué rechazada por General Motors. Por éste tiempo, Union Carbide produjo un poliol de alto peso molecular al que llamaron poliol polimérico, porque consistía en un poliol convencional al cual se le había agregado otro polímero, luego se encontró que usando éste nuevo poliol polimérico de Union Carbide combinado con TDI convencional y una pequeña proporción de isocianato polimérico, se podía producir una espuma mas estable a la hidrólisis. Este sistema fué enviado a General Motors para su evaluación, y finalmente Union Carbide pudo suministrar materiales que produjeran espuma que pasara las especificaciones de General Motors. Hasta hace muy poco tiempo, solo las espumas producidas usando las materias primas de Union Carbide eran capaces de pasar la especificación. Ahora otros fabricantes de materias primas han encontrado la manera de hacer polioles poliméricos similares a los de Union Carbide sin infringir las patentes de ésta compañía, y éstos polioles se venden ahora en los Estados Unidos compitiendo con los productos de Union Carbide. En la actualidad solo las espumas de alta resiliencia fabricadas con polioles poliméricos son capaces de pasar las especificaciones de General Motors. La decisión de General Motors de adoptar el uso de espuma de alta resiliencia fué influenciada por los requerimientos legales de el Código Federal Americano de Seguridad para Vehículos Automotrices, especificación No 302 que obliga a que la espuma que se use en un automóvil sea retardante a la flama y despida una mínima cantidad de humos tóxicos. En base a

los costos de fabricación, General Motors decidió que sería mas económico fabricar espuma de alta resiliencia que es retardante a la flama por naturaleza, que fabricar espuma convencional con aditivos que la hicieran autoextinguible. La ventaja económica de la fabricación de espumas de alta resiliencia, tiene su límite en una densidad de 48 kg/m^3, ya que arriba de ésta densidad sería mas económico hacer espuma convencional con aditivos.

3.2b) DESCRIPCION GENERAL DE LAS ESPUMAS DE ALTA RESILIENCIA.

En lo que a materias primas se refiere, una espuma de alta resiliencia difiere de una convencional principalmente en el tipo de poliol. En general, los polioles usados para espuma moldeada convencional, contienen cuando mucho una proporción de 20 % de hidroxilos primarios y 80 % de secundarios, mientras que los polioles altamente reactivos que se usan en las espumas de alta resiliencia tienen hasta un 65 % de hidroxilos primarios, y en vista de que la reactividad de los hidroxilos primarios hacia el isocianato, comparados con los secundarios es de 10 a 6, la utilización de polioles activos en las espumas de alta resiliencia elimina la necesidad de aplicar calor al molde para curar la pieza moldeada. Las formulaciones basadas en éste tipo de polioles rápidamente alcanzan un curado de la espuma suficiente para desmoldar en 5 a 10 minutos, y además al contrario de otros materiales que se usan para darle firmeza a la espuma, los polioles poliméricos reducen en lugar de aumentar la densidad de la espuma.

El factor sag de las espumas de alta resiliencia generalmente tiene valores entre 2.8 y 3.2, que son muy superiores a los valores de las espumas convencionales que rara vez son superiores a 2.0 para espumas equivalentes en firmeza y densidad. Es verdad que a las espumas convencionales se les puede agregar ciertos compuestos de carga como sulfato de bario o carbonato de calcio para

aumentar el factor sag, pero ésto trae como consecuencia una gran disminución en el resto de las propiedades.

Las espumas de alta resiliencia tienen muy bajos valores de histéresis, lo cual implica que recuperan muy rápidamente su forma original después de sometidas a una deformación, ésto es causado por dos diferencias básicas con las espumas convencionales, el cambio de estructura química debido al uso de polioles poliméricos, y al cambio de estructura física debido a la catálisis menos severa y a los surfactantes especiales de bajo peso molecular que se usan, los cuales producen celdas un poco mayores y de tamaño no uniforme en la espuma de alta resiliencia.

Las características de flamabilidad de la espuma de alta resiliencia son mucho mejores que las de la espuma convencional. La mayoría de las espumas de alta resiliencia son autoextinguibles de acuerdo al método ASTM D-1692 mientras que las convencionales no lo son de acuerdo a éste mismo método. El mecanismo por el cual la flamabilidad de la espuma de alta resiliencia es menor no está muy claro, pero se ha propuesto la siguiente explicación: Los polioles poliméricos que tienen un alto contenido de hidroxilos primarios forman grupos uretanos con uniones mas fuertes y mas resistentes a la degradación térmica que las uniones de los polioles convencionales, y además debido a los compuestos entrecruzadores que se utilizan en las formulaciones como son los isocianatos poliméricos se forman redes poliméricas mas estables en general.

Otra importante ventaja de las espumas de alta resiliencia es su resistencia a la fatiga, lo cual es una medida indirecta de la durabilidad. Esta resistencia a la fatiga es aún superior a la de la espuma de látex, lo que dá una idea de los excelentes valores que se obtienen con la espuma de alta resiliencia.

FACULTAD DE QUIMICA - U.N.A.M. - BIBLIOTECA - D.E.P.

A) COMPONENTES DE UNA ESPUMA DE ALTA RESILIENCIA Y SUS EFECTOS EN LA FORMULACION.

En general, la tecnología de las espumas de alta resiliencia y la de las convencionales, es muy similar en muchos aspectos, sin embargo hay algunas diferencias fundamentales.

La formulación y las propiedades de una espuma de alta resiliencia como las que se muestran a continuación, satisfacen muchas de las especificaciones de la industria. Esta formulación está basada en una mezcla de un poliol polimérico (30 %) y un poliol convencional (70%) para producir una espuma firme con una densidad mas o menos alta y una espuma un poco mas suave añadiendo un agente soplante auxiliar.

FORMULACION # 4

FORMULACION	ALTA DENSIDAD	BAJA DENSIDAD
Poliol Niax 32-33	70	70
Poliol Niax 31-28	30	30
Agua	2.7	2.7
Catalizador Niax A-1	0.03	0.05
Dabco 33LV	0.8	1.0
Silicón Y-6454	1.0	1.0
Agente soplanta Niax 11	-	7.0
Isoc. TDI 80/20, MDI (80/20)	33.3	33.3
PROPIEDADES DE LA ESPUMA OBTENIDA CON ESTA FORMULACION.		
Resiliencia	67 %	62 %
Densidad en el centro	42.5 Kg/M^3	32.0 Kg/M^3
ILD (Lbs/50 in^2)		
25 % deflexión	32.7	16.6
65 % deflexión	95.0	47.0
Retorno 25 % (%)	82.7	80.1
Factor sag	2.91	2.83

Deformación permanente		
75 % deflexión	11.4	14.6
90 % deflexión	10.1	No se hizo
Envejecimiento húmedo		
50 % deflexión	25.6	34.7
Fatiga 40 000 ciclos		
ILD 25 %	22.5	13.5
Deformación permanente		
75 % deflexión	14.85	20.3
90 % deflexión	20.2	41.8
Resistencia a la tensión (PSI)	24.8	20.3
Elongación (%)	191	160
Resistencia al desgarre (PI)	2.0	1.7
Flamabilidad (Método MVSS-302)	Aceptable	Aceptable

Todas las características de una buena espuma de alta resiliencia están presentes. El valor de 67 % de resiliencia y el factor sag de 2.91 en el primer caso, indican que la espuma es sumamente confortable. La baja flamabilidad es una propiedad importante, y lo mejor es que en la espuma de alta resiliencia ésto se obtiene con un sacrificio mínimo del resto de las características. Los valores de tensión, elongación y desgarre son muy buenos.

Estas propiedades se logran principalmente a base de las materias primas que se usan, de las cuales se dá a continuación una explicación, así como de su influencia en la espuma de alta resiliencia.

1.- POLIOLES

Se usan generalmente dos diferentes polioles, uno de los cuales es polimérico y el otro puede no serlo, la proporción del poliol polimérico controla la resiliencia y las características de tensión , elongación y desgarre, mientras que el otro poliol se usa normalmente para controlar la indentación y para disminuir el costo de la for-

mulación.

Las espumas de alta resiliencia fabricadas con polioles poliméricos, generalmente requieren de un rompimiento de celdas por deflexión despues de desmoldadas, para evitar encogimientos posteriores, sin embargo, se han desarrollado últimamente algunos polioles poliméricos, que producen espuma con celda abierta por lo que la operación de rompimiento de celdas queda eliminado.

2.- INDICE DE ISOCIANATO

El efecto del índice de isocianato sobre las propiedades físicas es similar al que se observa con las espumas convencionales curadas en caliente. Las caracteristicas en que mas influye el índice de isocianato son la firmeza, la deformación permanente, el desgarre, la elongación y la fatiga.

Se presenta en las siguientes figuras el efecto del índice de isocianato sobre la firmeza y sobre la deformación permanente en una formulación para espuma moldeada de alta resiliencia.

FIGURA # 6

EFECTO DEL INDICE DE ISOCIANATO SOBRE LA FIRMEZA

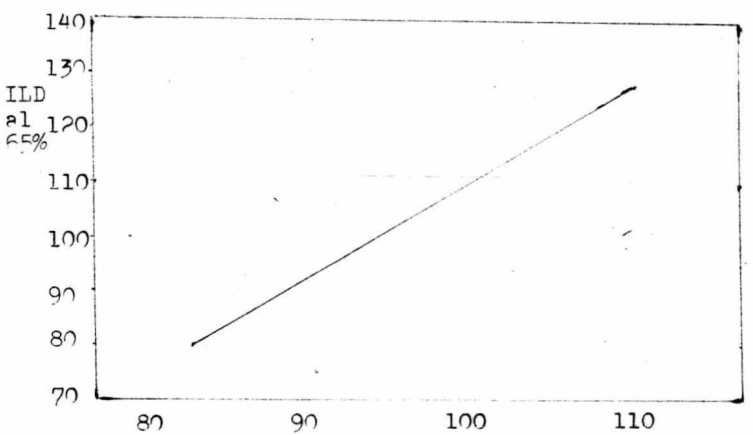
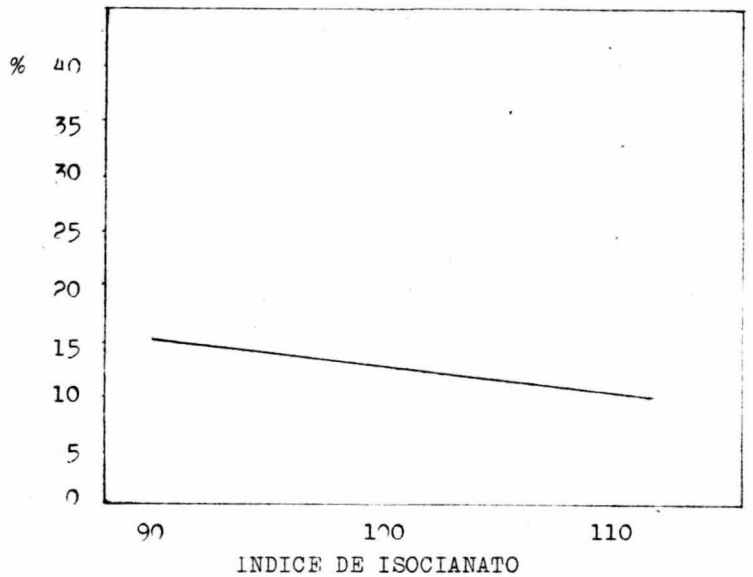


FIGURA # 7

EFECTO DEL INDICE DE ISOCIANATO SOBRE LA DEFORMACION PERMANENTE



La respuesta de la firmeza (ILD al 65 %) con las variaciones del índice es lineal, observándose que la indentación se incrementa un 39 % aproximadamente al aumentar el índice de 95 a 105. Los valores de deformación permanente disminuyen conforme aumenta el índice de isocianato, aparentemente la conversión de la reacción de formación de uretanos aumenta con un exceso de isocianato favoreciendo ésto a la deformación permanente.

3.- EFECTO DE UN AGENTE SOPLANTE AUXILIAR.

Los agentes soplantes auxiliares juegan un papel importante en cuanto a los resultados de las propiedades de la espuma de alta resiliencia. Se pueden obtener mediante su uso espumas con diferentes densidades y firmezas. La respuesta a ésta variable se muestra gráficamente en las siguientes figuras:

FIGURA # 8

EFECTO DE UN FLUOROCARBON EN LA DENSIDAD DE LAS ESPUMAS

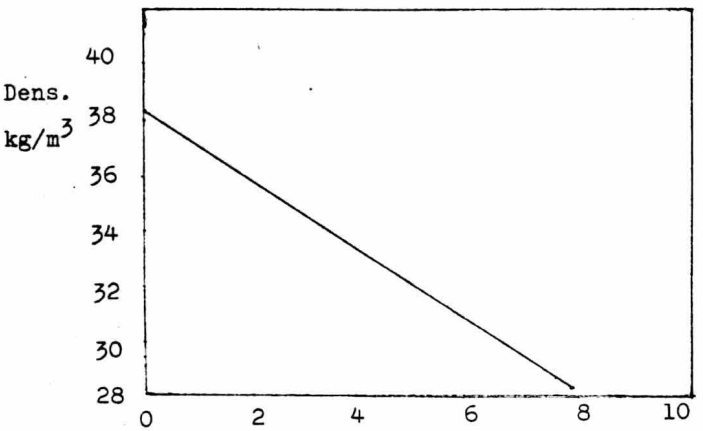


FIGURA # 9

EFECTO DE UN FLUOROCARBON SOBRE LA DEFORMACION DE LAS ESPUMAS

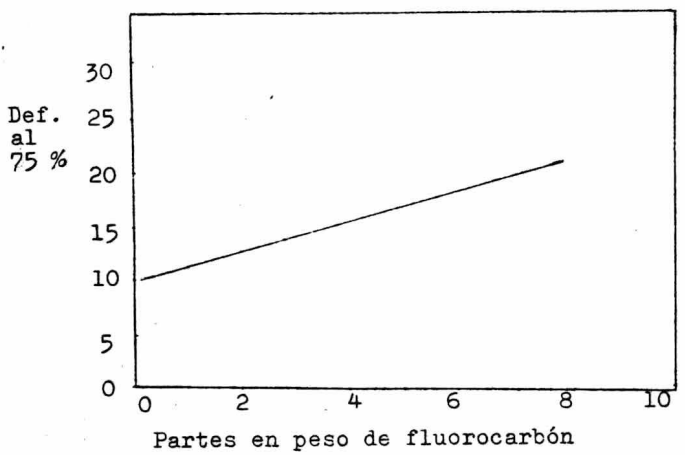
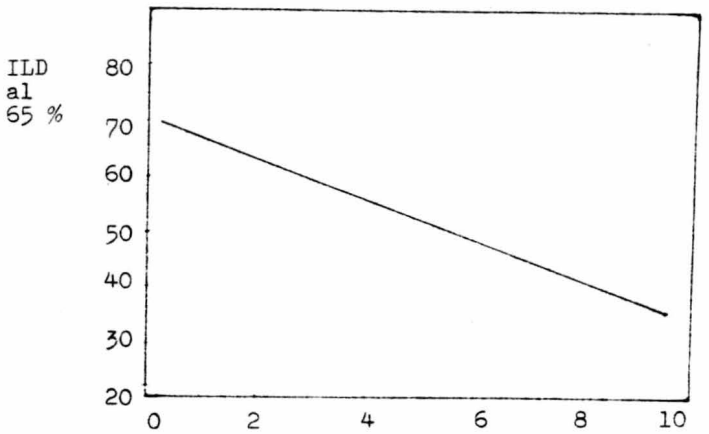


FIGURA # 10

EFECTO DE UN FLUOROCARBON SOBRE LA INDENTACION DE LAS ESPUMAS

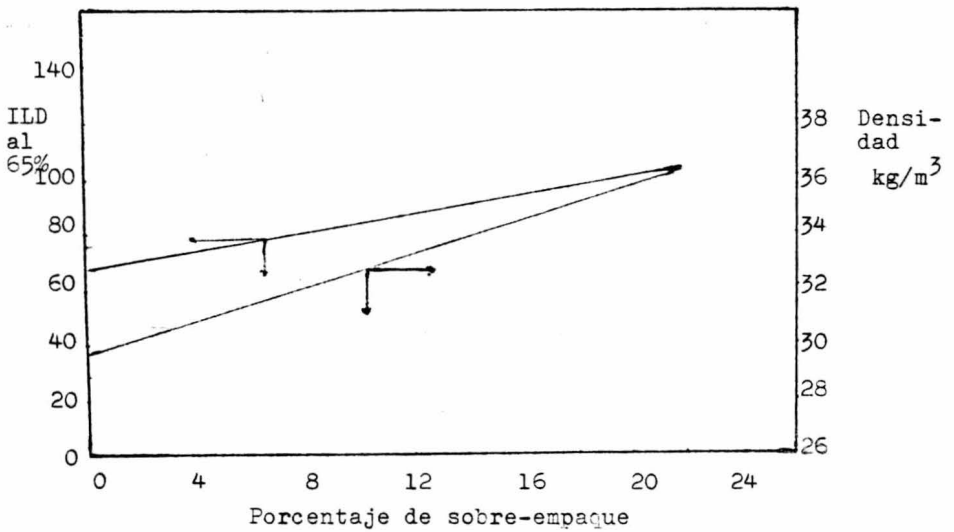


Como era de esperarse, la densidad disminuye en forma significativa al aumentar la concentración de fluorocarbón y la firmeza disminuye. También se pierde resistencia al desgarre al aumentar la concentración de fluorocarbón y ésto refleja la dependencia de ésta propiedad con respecto a la densidad. El aumento en deformación permanente puede ser explicado por la vaporización del agente soplante auxiliar, lo que reduce la cantidad de calor disponible para el curado de la espuma.

Por último, puede afirmarse que mientras los agentes soplantes auxiliares disminuyen la densidad y la indentación de la espuma, se puede obtener un efecto contrario por medio de un sobre-empaque, es decir, introduciendo al molde una cantidad de materiales mayor que la estrictamente necesaria, lo cual se muestra en la siguiente figura:

FIGURA # 11

EFECTO DEL SOBRE-EMPAQUE EN LA DENSIDAD Y EN LA INDENTACION

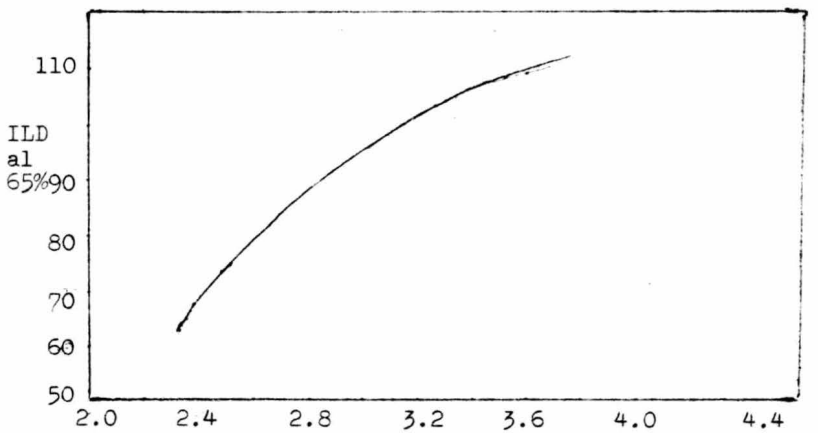


4.- EFECTO DEL AGUA.

Como agente soplante que es el agua, se varía en la formulación para controlar la densidad, sin embargo, al variar el contenido de agua en una formulación se afectan otras variables. Conforme se aumenta la cantidad de agua, particularmente por encima de tres partes, se pierden las propiedades de la espuma de alta resiliencia, disminuyendo el factor sag y la resiliencia. En la siguiente figura se muestra la relación entre la firmeza de la espuma y el contenido de agua de la formulación.

FIGURA # 12

EFECTO DEL AGUA SOBRE LA FIRMEZA DE LAS ESPUMAS MOLDEADAS



La influencia de las estructuras ureicas conforme aumenta el agua produce capacidades de carga mayores cuando la densidad de la espuma se mantiene constante. La densidad de la espuma se puede mantener constante empleando técnicas de sobre-empaque. Cuando se permite que disminuya la densidad al aumentar el agua, la firmeza también disminuye, pero no tanto como podría esperarse debido a las ureas que se forman.

Por otro lado, si se disminuye la densidad, aumentando el agua, las propiedades de resistencia al desgarre disminuyen en forma proporcional. Finalmente, la resistencia a la fatiga y la durabilidad de la espuma se ven afectadas en forma negativa cuando se aumenta la cantidad de agua en una formulación.

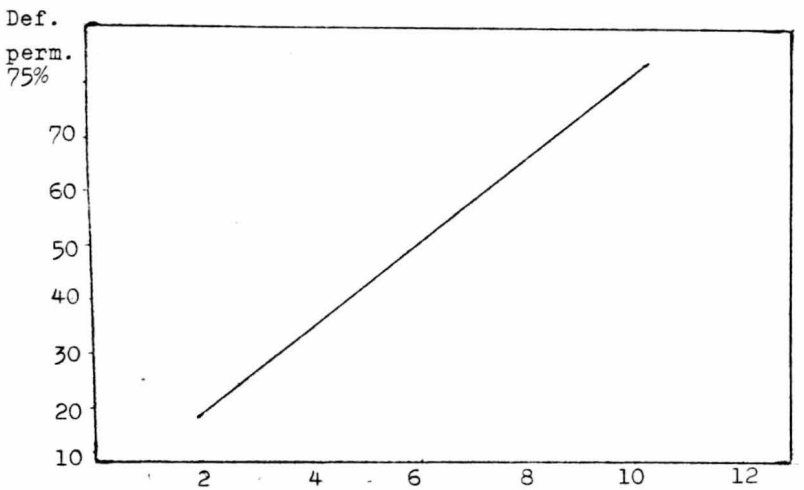
5.- EFECTO DE LOS ISOCIANATOS.

Se usan muchos isocianatos y mezclas de éstos materiales en las

formulaciones de alta resiliencia. El tipo de isocianato y la proporción del mismo en la formulación tiene un importante efecto en las propiedades de la espuma. En particular, el efecto de los isocianatos poliméricos es extremadamente complicado, pero en concreto, se puede decir que cuando aumenta la concentración de isocianato polimérico, mejora la resistencia a la deformación permanente, aunque disminuyen otras características como elongación, tensión y desgarre. Estos cambios en las propiedades de la espuma pueden ser atribuidos a un incremento de las uniones cruzadas causado por la mayor funcionalidad de los isocianatos poliméricos. Esta suposición está apoyada por el hecho de que con otros aditivos entrecruzadores como aminas trifuncionales y polioles de bajo peso molecular altamente hidroxilados, también se obtienen resultados similares.

FIGURA # 13

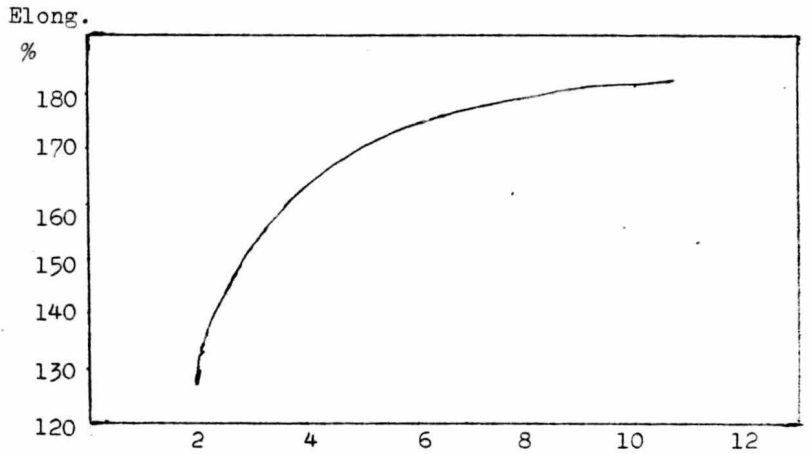
EFECTO DE UN ISOCIANATO POLIMERICO SOBRE LA DEFORMACION



Proporción de TDI 80/20 y un isocianato polimérico

FIGURA # 14

EFECTO DE UN ISOCIANATO POLIMERICO SOBRE LA ELONGACION



Proporción de TDI 80/20 y un isocianato polimérico.

3.2c) DESCRIPCION DE LOS PROCESOS Y EQUIPOS EMPLEADOS EN LA FABRICACION DE ESPUMAS DE ALTA RESILIENCIA.

Muchas variables además de las químicas influyen en el moldeo de piezas de alta resiliencia, éstas variables son principalmente mecánicas y pueden ser divididas en tres categorías, que son:

a) Variables de proceso, que incluyen temperatura del molde, temperatura de los componentes, grado de empaque y patrón de llenado.

b) Agente desmoldante y

c) Moldes, en donde intervienen variables tales como material de fabricación, diseño y ventilación. Consideremos primero las variables de proceso.

La temperatura de los componentes, es una de las variables más fáciles de controlar y es también una de las que mas influyen en las propiedades finales de la espuma afectando en la forma en que se describe a continuación a las siguientes características:

Densidad de la espuma: La densidad decrece normalmente cuando se aumenta la temperatura debido a que aumenta la reactividad del sistema y se forman mas celdas por unidad de volumen, con paredes mas delgadas.

Encogimiento: Conforme se aumenta la temperatura, la tendencia al encogimiento aumenta también. Normalmente las espumas que se hacen a 23 °C no requieren de rompimiento de celdas después de desmoldarlas, mientras que otras espumas producidas a temperaturas mayores si requieren rompimiento de celdas para evitar rompimientos irreversibles.

Facilidad para fluir: La masa reaccionante depositada en el molde, tiene mayor dificultad para fluir conforme aumenta la temperatura de los ingredientes. El efecto de ésta disminución en facilidad de flujo se manifiesta generalmente en una baja calidad de la espuma, principalmente en la superficie de la pieza.

Porosidad: El tamaño de los poros de la superficie aumenta cuando aumenta la temperatura de los componentes aumentando la facilidad con la que pasa el aire a través de la superficie. Esto es una ventaja cuando los asientos de espuma se forran con telas porosas que requieren una espuma también porosa que siga los movimientos de la tela.

Propiedades generales de la espuma: La deformación permanente es en forma general independiente de la temperatura de los componentes. La resistencia a la tensión y a la elongación se reducen un poco conforme aumenta la temperatura del poliol. Se cree que también la resistencia al desgarre se vé afectada al aumentar la temperatura de los componentes.

Otra variable muy importante en la fabricación de espuma moldeada de alta resiliencia, es la temperatura del molde. Se ha encontrado que el rango de temperatura mas adecuado es de 40 a 57 °C. Se ha visto también que si se desea obtener espuma de 40 kg/M^3 de densidad, es mas conveniente trabajar en la parte alta del rango, y si la espuma va a tener una densidad de 32 kg/M^3 es mejor operar en la parte in-

ferior del rango. Las principales características que se ven afectadas por la temperatura del molde son:

Calidad de la superficie: Normalmente disminuye cuando se opera fuera del rango mencionado, produciéndose defectos tales como piel suelta, burbujas y colapsos en la superficie junto con densificaciones externas.

Espesor de la piel:La piel de la pieza reduce su espesor conforme aumenta la temperatura del molde, lo cual es deseable.

El grado de sobre-empaque es otra variable que se debe tener en cuenta para obtener una espuma de calidad aceptable. El sobre-empaque es la cantidad de material que se deposita en el molde en exceso con respecto a la cantidad teóricamente necesaria para llenarlo perfectamente. Normalmente se agrega de un 5 a un 10 % de sobre-empaque para obtener una espuma de buena calidad, ya que de otra forma se vé afectada principalmente la capacidad de carga (ILD) de la espuma, la cual aumenta considerablemente al aumentar el sobre-empaque.

Generalmente en algunos moldes geométricamente complicados o moldes muy grandes, el patrón de llenado es una variable crítica. No solo se requiere que el vaciado de la espuma se haga adecuadamente para asegurar un flujo correcto hacia las partes difíciles del molde, sinó que debe ser igual durante todos los ciclos, debido a que si no se logra ésto se presentan dos tipos de defectos graves: a) Capacidad de carga no uniforme. En un asiento largo para automóvil una parte moldeada puede variar en ILD al 65 % de deflexión hasta en 5 o 10 libras entre el asiento del chofer y el asiento del pasajero, lo cual es generalmente debido a una mala distribución de la mezcla reaccionante en el molde y al movimiento del mismo en la linea de producción. Para evitar ésto, es necesario seleccionar un patrón de llenado adecuado y depositar mas espuma en el centro del molde que apunta en el sen-

tido del movimiento del mismo. b) Calidad de la superficie. Esta característica puede ser dañada bastante si toda la mezcla reaccionante se deposita en un extremo del molde, ya que en éste caso, la espuma trata de llenar el molde avanzando en tres direcciones; éste esfuerzo trae como resultado graves densificaciones y colapsos, así como una distribución no uniforme del tamaño de celda. Lo ideal es permitir que la espuma crezca en una sola dirección, o sea verticalmente, para lo cual se debe de escoger un patrón de llenado adecuado.

El tipo de agente desmoldante que se usa en el molde de espuma de alta resiliencia es en extremo importante, ya que no solamente sirve para poder separar la pieza del molde sin que se dañe, sinó que produce porosidad en la superficie de la pieza. Se usan normalmente ceras microcristalinas de un punto de fusión cuando menos 15 grados superior a la temperatura máxima del molde, disueltas en percloroetileno. Básicamente el agente se aplica a la superficie del molde cuando éste está caliente para provocar la evaporación del solvente, logrando así que el molde quede cubierto de pequeñas partículas cristalinas de cera, éstas partículas producen heterogeneidad en la superficie de la espuma cuando ésta se está formando.

La composición y el diseño de los moldes, es fundamental para la obtención de espuma moldeada de alta resiliencia de buena calidad. Idealmente el molde debe ser fabricado de aluminio fundido, debe estar diseñado en tal forma que el sello entre la tapa y la base del molde sea lo mas perfecto posible o en todo caso debe usarse un sello elastomérico o de hule siliconado que abarque todo el perímetro del molde. Las principales propiedades que se afectan debido a un molde defectuoso son la calidad de la superficie y la porosidad de la misma, en el primer caso, debido a que si el sello entre tapa y base no es bueno, la espuma fluirá hacia afuera del molde causando densificaciones en

la piel, así como grietas internas en la pieza. En el segundo caso las imperfecciones del molde provocan corrientes de espuma en diferentes direcciones que evitan el crecimiento unidireccional de la espuma dañando la porosidad de la superficie.

La ventilación del molde es la última variable importante para la obtención de espuma de buena calidad, la localización y el número total de crificios para la ventilación, es un factor crítico que determina la oclusión de aire en la espuma y por lo tanto la formación de burbujas internas; también se puede ver afectada la calidad de la superficie debido a una localización impropia de las ventilas.

En algunos moldes donde es imposible tener un cierre hermético, las ventilas bien localizadas pueden evitar algunos defectos sobre todo en la superficie. Por otro lado, conforme aumenta el número de ventilas en el molde, la capacidad de carga de la pieza tiende a disminuir hasta en 10 o 15 libras, y por otro lado, cuando aumenta el número de ventilas se minimiza el encogimiento y la reproducibilidad en la capacidad de carga aumenta así como la resistencia al desgarre y a la elongación.

Hasta ahora en ésta parte se han tratado algunas de las variables mas importantes que entran en juego en la fabricación de espumas moldeadas de alta resiliencia, ya que si se entiende la importancia del control de éstas variables, es mas fácil describir el equipo y el proceso que se usa en éste caso.

El proceso para la elaboración de espuma de alta resiliencia es similar al de la espuma tradicional moldeada, con la única posible diferencia de que dependiendo de las condiciones de operación, la linea de moldeado de alta resiliencia puede o no llevar horno de curado y de post curado.

Una típica linea de producción de espuma de alta resiliencia

consiste en un transportador que puede ser mecanizado o de rodillos de gravedad, generalmente en forma ovalada o elíptica, aunque existen algunos cuadrados con una longitud que varía entre los 30 y los 100 metros. La velocidad de éstos transportadores vá de 0.5 m/min si el movimiento es manual a 7 m/min si la linea es mecanizada, aunque existe una linea en operación que lleva una velocidad de 23 m/min. El número de moldes que se colocan en la linea, depende del tamaño y del diseño de éstos, pero en forma general siempre se hace lo posible por acomodar en la linea el mayor número de moldes posible. La linea se divide en porciones iguales imaginarias que se llaman estaciones para distribuir mejor las operaciones, asignándose un determinado número de estaciones a cada operación. Si la linea es de velocidad constante, la asignación de estaciones a las operaciones también es una asignación de tiempo disponible a cada operación. El número de estaciones, y el tiempo disponible para cada estación varía de linea a linea porque depende de factores mecánicos y de diseño de la misma, pero como ejemplo ilustrativo se puede considerar la siguiente linea que se describe:

Forma de la linea:	Elíptica
Longitud total:	192 pies (58.56m)
Longitud de una estación:	8 pies (2.44 m)
Número de estaciones:	24
Velocidad de la linea:	16 ft/min (4.87m/min)
Tiempo total de un ciclo:	12 minutos
Capacidad de la linea:	120 piezas/hora.

DISTRIBUCION DE OPERACIONES EN LA LINEA

OPERACION	No DE EST.	LONGITUD DE TRANSPORTADOR.	TIEMPO
Llenado del molde	1	8 pies (2.44m)	0.5 min.
Cerrado del molde	1	8 pies (2.44m)	0.5 min.
Curado de la pieza	16	128 pies (39 m)	8.0 min.
Apertura del molde	1	8 pies (2.44m)	0.5 min.
Desmoldado de pieza	1	8 pies (2.44m)	0.5 min.
Aplicación de desmoldante	1	8 pies (2.44m)	0.5 min.
Enfriamiento de molde	2	16 pies (4.88m)	1.0 min.
Colocación de insertos metálicos	1	8 pies (2.44m)	0.5 min.
TOTAL:	24	192 pies (58.56 m)	12.0 min.

El personal requerido son 4 obreros, uno a cargo de la máquina espumadora, uno desmoldando, uno aplicando desmoldante, y uno colocando los insertos).

Una linea de este tipo tendría una capacidad de producción de aproximadamente 600 toneladas anuales, que es mas o menos el 60 % del mercado mexicano en éste tipo de producto.

Puede observarse que ésta linea en particular puede acomodar un horno de curado de 39 metros de longitud, para que la pieza reciba calor externo durante 8 minutos y se acelere el curado. Esto tiene por objeto disminuir el tiempo que debe transcurrir entre el vaciado en el molde y el desmoldado de la pieza, disminuyendo así el tiempo total del ciclo, lo cual trae como consecuencia un mejor aprovechamiento de los moldes que en general son muy costosos. Actualmente el mejor aprovechamiento que se logra de los moldes es de 4 ciclos por hora, es decir cada molde produce unas 7 200 piezas en un año, y en vista de que un molde fundido tiene un costo aproximado

de 45 000.00 pesos y se debe depreciar idealmente en tres años debido a los frecuentes cambios de modelo en las lineas de los autos, se carga solamente por depreciación de moldes 2 pesos por pieza producida; ésto es lo que se toma en cuenta para la instalación de un horno de curado, que representa una inversión inicial considerable, pero también implica un gran ahorro a la larga ya que aumenta la productividad de los moldes hasta en un 50 % al reducir el tiempo del ciclo, disminuyendo así los costos de producción.

Un horno de post-curado, que ésta linea en particular no tiene, significa en la mayoría de los casos un gasto innecesario y un equipo sin mayor utilidad. Es justificable la instalación de un horno de post-curado solo en el caso de que se tenga una producción excesiva que haga imposible la existencia de un inventario de producto terminado mayor a un dia de producción, ya que en éste caso se vuelve necesario terminar, empacar y enviar al cliente el producto a las 24 horas de fabricado. Para que éste caso se presente, es necesario que la planta tenga una producción superior a las 6 toneladas diarias, lo cual es muy improbable, y en todo caso imposible en el mercado mexicano. Teóricamente, un post-curado durante 30 minutos a una temperatura de 150 ^{o}F (65 ^{o}C) hace que la espuma alcance su grado de polimerización final mas rápidamente, sin embargo se ha visto que la diferencia en las caracteristicas que determinan el grado de curado en una espuma, entre dos piezas fabricadas y probadas al mismo tiempo, una post-curada y la otra no, es inferior al 15 %. Es decir, en todo caso, el post-curado disminuye en un 15 % el tiempo que tarda la espuma en adquirir sus propiedades permanentes, por lo que en una linea de capacidad normal, y contando con espacio suficiente para almacenar la producción de 1 o 2 días, es totalmente innecesaria la instalación de un horno de post-curado.

Las máquinas espumadoras que normalmente se utilizan para hacer espuma de alta resiliencia son de baja presión y alto esfuerzo cortante: en general las máquinas de alta presión no son muy adecuadas por la elevada viscosidad de los polioles poliméricos que los hace muy difíciles de manejar en las bombas de pistones de las máquinas de alta presión.

Las máquinas están equipadas casi siempre con instrumentos de control de tiempo de disparo, lo cual a su vez controla la cantidad de mezcla reaccionante depositada en el molde. Dada la importancia de la dosificación exacta de los materiales en un proceso de moldeado, tanto por los resultados que ésto tiene en la calidad del producto como en la economía de la operación, los instrumentos de control del tiempo de disparo que poseen las máquinas modernas son altamente sofisticadas y consisten en equipos electrónicos programables que operan con una exactitud de una centésima de segundo. Por lo demás, las máquinas de moldeo de espuma de alta resiliencia son muy similares a las de moldeo de espumas convencionales.

Hasta ahora se han presentado los aspectos técnicos que rigen la fabricación y las características de los tipos de espumas que nos ocupan en forma genérica, pero sin presentar en forma específica una comparación entre ambas que pueda ilustrar concretamente las ventajas de una sobre la otra, por lo que a continuación se hace una breve recopilación y algunos comentarios sobre las mencionadas características.

Si comparamos los cuadros de características de los dos tipos de espuma que fueron presentados en las páginas 54 y 80, obtendremos el siguiente cuadro:

CUADRO COMPARATIVO DE RESULTADOS

Caracteristica	Unidad	Valor obtenido formulación convencional	Valor obtenido formulación A. R.
Densidad	lb/ft^3, kg/m^3	2.15, 34	2.65, 42.5
Resist. Tensión	lb/in^2	14.4	24.8
Elongación	%	215	191
Resist. Desgarre	lb/in	1.14	2.0
ILD			
25 % deflexión	$lb/50\ in^2$	33	32.7
65 % deflexión	"	70	95
Factor sag		2.12	2.91
Retorno 25 %	%	63	82.7
Deformación permanente			
50 % deflexión	%	6.34	--
75 % deflexión	%	--	11.4
90 % deflexión	%	18.15	10.1
Fatiga (40 000 ciclos)			
ILD			
25 % deflexión	$lb/50\ in^2$	18	24
Deformación permanente			
50 % deflexión	%	32.8	--
75 % deflexión	%	--	20.3
90 % deflexión	%	92.3	41.8

En éste cuadro es evidente la superioridad técnica de la espuma de alta resiliencia en casi todas las características que fueron analizadas. Se observa que en las propiedades mas comunes, (tensión, elongación y desgarre) la espuma de alta resiliencia tiene con la excepción de la resistencia a la elongación mejores valores, lo cual dá como resultado una mayor confiabilidad en el manejo y montaje de la espuma en bastidores o armazones automotrices, pero los factores que demuestran con mayor contundencia las ventajas de la espuma de alta resiliencia son los cuatro que aparecen a continuación.

1.- Indentación.

Se puede ver en el cuadro comparativo que a pesar de que la indentación de ambas espumas al 25 % de deflexión es prácticamente igual, existe una gran diferencia en la indentación al 65 %, lo cual produce un factor sag radicalmente mayor en la espuma de alta resiliencia. El factor sag alto es indicativo de un mayor comfort como se ha explicado anteriormente.

2.- Retorno.

El valor de retorno de 82.7 % de la espuma de alta resiliencia contra el de 63 % de la espuma convencional, indica claramente una mayor elasticidad de la primera, que le permite recuperar sus características rápidamente después de haber sido sometida a una deformación aguda y conservarlas durante mayor tiempo.

3.- Deformación permanente.

Los valores de deformación permanente al 90 % de deflexión demuestran que la funcionalidad de las espumas de alta resiliencia en la aplicación de asientos y respaldos para la industria automotriz es mayor que la de las espumas convencionales, ya que son capaces de soportar mejor las deformaciones y las altas temperaturas a las que es sometido el acojinamiento en un automóvil.

4.- Fatiga.

Por último, la prueba mas drástica y mas convincente en cuanto a la calidad de una espuma es la prueba de fatiga dinámica, asimismo es la mas significativa en cuanto a la duración de una espuma de acuerdo a un determinado uso. Se observa que después de haber sido sometidas ambas espumas a la prueba de fatiga dinámica, la espuma de alta resiliencia conserva sus propiedades de indentación y de resistencia a la deformación permanente en mayor grado que la espuma convencional; se puede agregar que el valor de 41.8 % es realmente bueno ya que rara vez se obtienen valores inferiores al 75 % aún con espumas convencionales formuladas especialmente con la intención de mejorar los resultados de la prueba de fatiga dinámica. Esta prueba es equivalente a aproximadamente 5 años de uso de la espuma de acojinamiento en un automóvil sometido a condiciones de uso normales.

CAPITULO IV

ANALISIS COMPARATIVO DE COSTOS DE PRODUCCION ENTRE LAS ESPUMAS TRADICIONALES MOLDEADAS Y LAS DE ALTA RESILIENCIA.

En ésta sección analizaremos las posibilidades de competencia de la espuma de alta resiliencia con la espuma tradicional desde el punto de vista económico, analizando primero los precios de las materias primas necesarias para la producción de espuma de un tipo y del otro, y después comparando los costos de operación de dos lineas de producción de capacidad equivalente.

4.1 ANALISIS COMPARATIVO DE COSTOS DE MATERIAS PRIMAS.

Este análisis está basado en precios de materias primas en la Ciudad de México al día 10 de octubre de 1976, siendo algunas de éstas materias primas de importación y otras de fabricación nacional, por lo que éste análisis perdería su validez en cualquier otra parte y posiblemente en cualquier otra fecha.

Consideremos primero una formulación normal para la obtención de espuma de poliuretano tradicional curada en caliente:

Materia prima	partes	precio	costo relacionado
Poliol convencional	100.000	20.85 $/kg	2085.00 $
Tri-etilen diamina	0.120	270.75 "	32.49 "
Silicón	1.200	156.90 "	188.28 "
Octoato de estaño	0.210	163.80 "	34.40 "
Ftalato de di-octilo	4.000	28.50 "	114.00 "
H_2O	4.000	-	-
TDI 80/20	51.300	16.10 "	825.67 "
TOTAL	160.83 p.		3279.84 "

Es decir, 160.83 kilogramos de materia prima que intervienen en una formulación tienen un costo de 3279.84 $. Es de esperarse

que con una formulación así, se obtenga una pérdida por evolución de gases del orden del 6 %, y una pérdida por derrame de los moldes del orden del 5 %, aunque ésto es muy variable y depende como ya se dijo del diseño del molde. Después de los cálculos correspondientes, ésto significa que 143.62 kgs de espuma tienen un costo de 3279.84 $ o sea un costo por kilogramo de 22.84 $. La densidad que se puede esperar con esa cantidad de agua es de 36 kg/M^3, por lo que el costo por metro cúbico de ésta espuma será de 822.15 $\$/M^3$.

Resumiendo:

Pérdidas por evaporación:	6 %
Pérdidas por derrame:	5 %
Costo por kg de espuma:	22.84 $/kg
Costo por M^3 de espuma:	822.15 $\$/M^3$

Comparemos ahora con una formulación diseñada para obtener espuma de alta resiliencia:

Materia prima	partes	precio	costo relacionado
Poliol polimérico	40.000	24.50 $/kg	980.00 $
Poliol convencional	60.000	23.10 "	1386.00 "
Cat. amínico (1)	0.300	56.00 "	16.80 "
Cat. amínico (2)	0.600	112.10 "	67.26 "
Silicón	1.350	191.80 "	258.95 "
Dibutil dilaurato de estaño	0.030	130.90 "	3.95 "
H_2O	3.500	-	-
Isocianato polimérico	8.200	35.17 "	288.38 "
TDI 80/20	32.800	16.10 "	528.08 "
TOTAL	146.78		3529.42 "

Con ésta formulación es de esperarse una pérdida por evolución de gases del 4 % y consideraremos una pérdida por derrame del 5 %

igual que en el caso anterior, ésto implica que 133.86 kg de espuma de alta resiliencia tienen un costo de 3529.42 $ o sea un costo por kilogramo de 26.37 $. Se puede esperar una densidad de 39 kg/M^3 o sea un costo por metro cúbico de 1028.29 $.

Resumiendo:

Pérdidas por evaporación:	4 %
Pérdidas por derrame:	5 %
Costo por kg de espuma	26.37 $/kg
Densidad:	39 kg/M^3
Costo por metro cúbico	1028.29 $/$M^3$

Esta parte del análisis no es muy favorable para la espuma de alta resiliencia.

Sin embargo ahora analizaremos los costos de producción de ambos tipos de espuma en la linea.

4.2 ANALISIS COMPARATIVO DE COSTOS DE OPERACION.

Podemos comparar los costos de operación de dos lineas de producción, una de espuma de alta resiliencia y otra de espuma moldeada tradicional y analizar el costo por kilogramo producido en cada una de ellas para normar un criterio en cuanto a la conveniencia de instalar una linea de producción de espuma de alta resiliencia.

4.2a) COSTO DE OPERACION PARA UNA LINEA DE ESPUMA DE ALTA RESILIENCIA

Los factores que se tomarán en cuenta para la determinación de los costos serán:

1.- Renta del area ocupada
2.- Consumo de energía eléctrica
3.- Mano de obra
4.- Costo de moldes
5.- Costo de maquinaria y equipo — Depreciación
6.- Combustibles y lubricantes
7.- Materiales indirectos.

Se considerará una linea con una velocidad de operación de 4.5 m/min y un tiempo de ciclo de 12 minutos. Tendría por lo tanto 54 m de longitud. Podemos considerar además que la misma máquina puede fabricar ambas espumas por lo que no se incluye.

1.- RENTA. Una linea de ésta longitud junto con un espacio razonable de operación y almacenamiento temporal de materias primas y materiales en proceso puede ser acomodada en una áres de 280 m^2. Un promedio de la renta mensual por m^2 construido en diferentes zonas del D. F. es de 24 $/$m^2$, por lo que tendremos un gasto diario por renta del local de 216.00 $/día.

2.- CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA. En base a comparaciones razonables con algunas lineas en operación, podemos considerar que una linea de éste tipo consume 15 Kwhr.

3.- MANO DE OBRA. Si la linea no tiene equipo para la apertura y el cerrado automático de los moldes, se requieren: 1 operario de la máquina, 1 encargado de cerrar los moldes, 2 desmoldadores, 1 encargado de la limpieza y aplicación de desmoldante y 1 supervisor. Es decir, 5 operarios de sueldo mínimo y una persona de 200.00 $/día; total 650.00 $/día.

4.- COSTO DE MOLDAJE. En una linea de 54 m se pueden acomodar 27 moldes del tipo de los asientos y los respaldos automotrices no individuales, los cuales de acuerdo a cotizaciones de diferentes proveedores de moldes fundidos de aluminio tienen un costo no menor a 45 000.00 $ cada uno. Por lo tanto la inversión en moldaje es de 1 215 000.00 $. Estos moldes tendría que depreciarse en 3 años de operación debido a los frecuentes cambios de modelo, por lo que la depreciación anual sería de 405 000.00 $.

5.- INVERSION EN MAQUINARIA Y EQUIPO. Una linea de espuma de alta resiliencia prácticamente no necesita horno de curado, sin embargo

para obtener mejores resultados en la operación y en la calidad de las piezas producidas, se puede considerar un horno de curado en el cual las piezas estarían durante tres minutos para acelerar la polimerización y evitar que las piezas se deformen al ser desmoldadas. De acuerdo a cotizaciones de los proveedores de hornos y transportadores automatizados, el costo de un horno instalado es de aproximadamente 18 000.00 $/metro y el de un transportador automatizado instalado de 8 000.00 $/metro.

Longitud de linea: 54 m

Costo de la linea: 432 000.00 $

Longitud de horno: 13.5 m

Costo del horno: 243 000.00 $

Inversión global: 675 000.00 $

Este equipo se deprecia en 10 años

Depreciación anual: 67 500.00 $

6.- COMBUSTIBLES Y LUBRICANTES. Un horno de 13.5 m de longitud con una temperatura promedio de 100 ^{o}C consumiría 60 m^3 de gas natural diariamente, con un costo de 50.00 $/día y la lubricación de la cadena de transmisión del transportador requeriría 1 kg/día de grasa grafitada, es decir 180.00 $/día.

7.- MATERIALES INDIRECTOS. Una linea de éste tipo tendría una producción de 21 000 piezas por mes lo cual requiere en materiales desmoldantes: 500.00 kg de cera (25 gramos por molde) y 2 000.00 kgs de percloroetileno para preparar el desmoldante, así como 600 kgs de cloruro de metileno como material de limpieza. Es decir, 15 000.00 $/mes de cera, 50 000.00 $/mes de percloroetileno y 9 800.00 $/mes de cloruro de metileno.

Desglosando las cifras calculadas anteriormente en base a un día de operación de la linea, obtenemos el siguiente resumen:

RESUMEN

1.- RENTA	216.00	$/día
2.- CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA	56.00	"
3.- MANO DE OBRA	650.00	"
4.- DEPRECIACION DE MOLDES	1 350.00	"
5.- DEPRECIACION DE EQUIPO	225.00	"
6.- COMBUSTIBLES Y LUBRICANTES	230.00	"
7.- MATERIALES INDIRECTOS	3 400.00	"
TOTAL COSTO DE OPERACION	6 127.00	"

Una linea así, tendría una producción mensual, suponiendo piezas de 45 kg/m^3 de densidad y 3 kg de peso, de 63 000 kgs, o sea 2864 kgs por día, por lo que el costo de operación por kilogramo producido es de 2.14 $/kg.

Costo de operación por kg en una linea de producción de espuma de alta resiliencia = 2.14 $/kg.

4.2b) COSTO DE OPERACION PARA UNA LINEA DE ESPUMA TRADICIONAL

Consideraremos desde luego los mismos factores que para el cálculo anterior. La velocidad de la linea sería la misma solo que dadas las características químicas de una formulación tradicional curada en caliente, el tiempo del ciclo será de 20 minutos, 12 de los cuales estarían los moldes dentro de un horno de curado a 150 °C.

1.- RENTA. Con una velocidad de 4.5 m/min y 20 minutos de tiempo de ciclo, la longitud de la linea será de 90 metros y puede ser acomodada en una área de 460 m^2 con una renta de 24.00 $/$m^2$ mes.

2.- CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA. Un transportador de éste tamaño requiere un consumo de energía eléctrica del orden de 25 Kwhr.

3.- MANO DE OBRA. Básicamente la mano de obra es la misma que en el caso anterior, ya que las operaciones son las mismas y la velocidad de la linea también. Por lo tanto el gasto diario por éste concepto es de 650.00 $/día.

4.- COSTO DE MOLDAJE. En una linea de 90 metros se pueden acomodar 45 moldes automotrices no individuales, cuyo costo es de 45 000.00$ por cada uno, y por lo tanto la inversión en moldes es de ... 2 025 000.00 $, y si consideramos su depreciación a 3 años, tendríamos un costo por depreciación anual de moldaje de 675 000.00$.

5.- INVERSION EN MAQUINARIA Y EQUIPO. La longitud del horno en éste caso sería de 54 metros y considerando los mismos costos de horno y transportador instalado que en el caso anterior tendríamos:

Longitud de linea : 90 m

Costo de la linea: 720 000.00 $

Longitud de horno: 54 m

Costo del horno: 972 000.00 $

Inversión global: 1 692 000.00 $

Depreciación anual: (10 años) : 169 200.00 $

6.- COMBUSTIBLES Y LUBRICANTES: En éste caso el gasto de gas natural para el horno de 54 metros y con una temperatura de 150 ^{o}C sería de 360 m^3, con un costo de 300.00 $/día. El consumo de grasa grafitada sería de 2.5 kg/día o sea 475.00 $/día.

7.- MATERIALES INDIRECTOS. Una linea así tiene una producción mensual de 21 000 piezas, por lo que el consumo de cera, percloroetileno y cloruro de metileno, que depende solo del número de piezas fabricadas sería el mismo que en el caso anterior, es decir 3 400.00 $/día.

En base a lo anterior, obtenemos el siguiente resumen de costos de operación por día en una linea de producción de espuma moldeada tradicional:

RESUMEN

1.- RENTA	368.00	$/día
2.- CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA	93.00	"
3.- MANO DE OBRA	650.00	"
4.- DEPRECIACION DE MOLDES	2 250.00	"
5.- DEPRECIACION DE EQUIPO	564.00	"
6.- COMBUSTIBLES Y LUBRICANTES	775.00	"
7.- MATERIALES INDIRECTOS	3 400.00	"
TOTAL COSTO DE OPERACION	8 100.00	"

Suponiendo una densidad para éste material de 35 kg/m^3, y por lo tanto un peso de las piezas de 2.330 kg, ésta linea tendría una capacidad mensual de 48 930 kgs de espuma moldeada curada en caliente, o sea una producción diaria de 2 224 kgs, ésto representa un costo de operación por kg de 3.65 $/kg.

Costo de operación por kilogramo en una linea de producción de espuma moldeada tradicional curada en caliente: 3.65 $/kg.

CONCLUSIONES

Se puede observar que la espuma de alta resiliencia ofrece ventajas técnicas y económicas con respecto a la espuma moldeada tradicional curada en caliente.

Desde el punto de vista técnico, factores tales como el sag, el porcentaje de recuperación, la resistencia a la deformación permanente, y sobre todo los valores de fatiga dinámica, inclinan la balanza hacia el lado de la espuma de alta resiliencia, y por el lado económico, a pesar de que el costo de los materiales es mayor para fabricar espuma de alta resiliencia que para moldeada tradicional, éste factor puede ser compensado si se logra colocar el producto en el mercado con un precio de venta mayor al de la espuma curada en caliente con los argumentos de mayor calidad y duración y sobre todo considerando que las especificaciones de la industria automotriz son tan estrictas que dificilmente pueden ser logradas con espuma curada en caliente; (el porcentaje de piezas rechazadas por control de calidad es tres veces inferior para la espuma de alta resiliencia).

Por otro lado, los costos de operación son 42 % menores para producir espuma de alta resiliencia, lo cual es un factor importante para tomar una decisión sobre que tipo de espuma producir.

Se puede argüir, que el análisis económico anterior resultó favorable a la espuma de alta resiliencia debido a que la densidad de la espuma tradicional es inferior, y por lo tanto, la capacidad de la linea, aunque en número de piezas sea igual a la de la linea de alta resiliencia, en kilos producidos es inferior y por lo tanto el costo de operación por kilogramo resultó mayor, pero debe de tenerse en cuenta, que si la utilidad que se pretende obtener por kilogramo de espuma vendido es igual en ambos casos, digamos un 18 % sobre precio de venta, entonces conviene vender y por lo tanto producir

materiales mas densos, ya que en éste caso la utilidad en base a volumen es mayor y por lo tanto será de todos modos mas conveniente producir en la linea en la cual se obtengan mas kilos de producto terminado con el mismo número de metros cúbicos producidos y en el mismo tiempo de operación.

BIBLIOGRAFIA

1.- MILBY ROBERT V. "Plastics Technology" McGraw Hill Inc. Ist Ed. New York 1973.

2.- BENDER R. J. "Handbook of Foamed Plastics" Lake Publishing Co. Libertyville, Ill. 1965.

3.- DONBROW B. "polyurethanes" Van Nostrand Reinhold Co. New York 1965

4.- SAUNDERS J. H. "Polyurethanes Chemistry and Technology" Van Nostrand Reinhold Co. New York 1963.

5.- DOYLE E. N. "The Development and use of Polyurethan Products" McGraw Hill Book Co, New York 1971.

6.- BUIST J. M. and GUDGEON H. "Advances in Polyurethane Technology" McLaren and Sons LTD, London 1968.

7.- WRIGHT P. and CUMMING A. P. "Solid Polyurethane Elastomers" Mc Laren and Sons LTD, London 1969.

8.- FRANK KARL "Prüfgerite für Kantschuk, Gummi und Kunstoffe" Frank Mannheim,Rheinau 1968.

9.- AMPSON A. J. and BLAICH C. E. "Rubber Age" 1961, 89, 263.

10.- ZWOLINSKI L. M. and FRINK J. W. "High resiliency cold molded urethane foam" Journal of Cellular Plastics Vol. 8, No 1, 20-29 1972.

11.- POWELL D. G., PUIG J. E. and VAN LEWEN B. G. "Polyols and Requirements for ambient cured foams" Journal of Cellular Plastics Vol. 8 No 2, 90-99, 1972.

12.- PATTEN W. and PRIEST D. C. "Highly resilient, cold molded urethane flexible foam" Journal of Cellular Plastics Vol 8 No 3 134-143 (1972)

13.- WOLFE H. "Designing high resilience molded foams" Journal of Cellular Plastics, Vol 9 No 3, 134-138, 1973.